

Doc 9756
AN/965



Manuel d'enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation

Partie III Enquêtes

Approuvé par le Secrétaire général
et publié sous son autorité

Première édition — 2011

Organisation de l'aviation civile internationale

**Doc 9756
AN/965**



Manuel d'enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation

**Partie III
Enquêtes**

Approuvé par le Secrétaire général
et publié sous son autorité

Première édition — 2011

Organisation de l'aviation civile internationale

Publié séparément en français, en anglais, en arabe, en chinois, en espagnol et en russe par l'ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE 999, boul. Robert-Bourassa, Montréal (Québec) H3C 5H7 Canada

Les formalités de commande et la liste complète des distributeurs officiels et des librairies dépositaires sont affichées sur le site web de l'OACI (www.icao.int).

Première édition, 2011

**Doc 9756, Manuel d'enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation
Partie III, Enquêtes**

N° de commande : 9756P3
ISBN 978-92-9249-779-8

© OACI 2015

Tous droits réservés. Il est interdit de reproduire, de stocker dans un système de recherche de données ou de transmettre sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, un passage quelconque de la présente publication, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'Organisation de l'aviation civile internationale.

AVANT-PROPOS

L'objet du présent manuel est d'encourager l'application uniforme des normes et pratiques recommandées de l'Annexe 13, ainsi que de fournir aux États les informations et les indications sur les méthodes, pratiques et techniques pouvant être utilisées dans les enquêtes sur les accidents d'aviation. Étant donné que les enquêtes sur les accidents varient dans leur complexité, un document de cette nature ne peut aborder toutes les éventualités. Cependant, on y trouvera les techniques et méthodes les plus courantes. Ce manuel est destiné aux enquêteurs chevronnés aussi bien qu'inexpérimentés, mais il ne remplace pas la formation ni l'expérience dans les domaines des enquêtes.

Le présent manuel sera publié en quatre parties, comme suit :

Partie I — Organisation et planification ;

Partie II — Procédures et listes de vérification ;

Partie III — Enquêtes ;

Partie IV — Communication des résultats.

Comme ce manuel porte aussi bien sur les accidents que les incidents, les expressions « accidents » et « enquête sur les accidents », par souci de concision, s'appliquent également aux « incidents » et aux « enquêtes sur les incidents ».

Les documents de l'OACI ci-après donnent des indications et des renseignements supplémentaires sur des questions connexes :

- Annexe 6 — *Exploitation technique des aéronefs*
(Partie 1 — *Aviation de transport commercial international — Avions*,
Partie 2 — *Aviation générale internationale — Avions*,
Partie 3 — *Vols internationaux d'hélicoptères*) ;
- Annexe 9 — *Facilitation* ;
- Annexe 12 — *Recherches et sauvetage* ;
- Annexe 13 — *Enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation* ;
- *Manuel de médecine aéronautique civile* (Doc 8984) ;
- *Manuel d'instruction sur les facteurs humains* (Doc 9683) ;
- *Manuel de gestion de la sécurité (MGS)* (Doc 9859) ;
- *Manuel sur les organismes régionaux d'enquête sur les accidents et incidents* (Doc 9946) ;
- *Manuel de politiques et procédures d'enquête sur les accidents et les incidents* (Doc 9962) ;
- *Facteurs humains. Étude n° 7 — Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents* (Cir 240) ;
- *Éléments d'orientation sur l'assistance aux victimes d'accidents d'aviation et à leurs familles* (Cir 285) ;
- *Directives pour la formation des enquêteurs sur les accidents d'aviation* (Cir 298) ;
- *Dangers des lieux d'accidents d'aviation* (Cir 315).

Le présent manuel, qui remplace le Doc 6920 dans sa totalité, sera amendé périodiquement en fonction des nouvelles techniques d'enquête et des nouveaux renseignements qui pourront devenir disponibles.

Les lecteurs sont invités à proposer des éléments en vue de leur inclusion éventuelle dans les prochaines éditions du manuel. Ces documents doivent être adressés comme suit :

Le Secrétaire général
Organisation de l'aviation civile internationale
999, boul. Robert-Bourassa
Montréal (Québec)
Canada H3C 5H7

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Chapitre 1. Introduction	III-1-1
1.1 Processus d'enquête	III-1-1
1.2 Collecte des données	III-1-1
1.3 Analyse des données	III-1-3
1.4 Présentation des résultats	III-1-3
Chapitre 2. L'épave.....	III-2-1
2.1 Lieu de l'accident.....	III-2-1
2.2 Photographie	III-2-1
2.3 Répartition de l'épave.....	III-2-11
2.4 Examen des marques d'impact et des débris.....	III-2-14
Appendice 1 au Chapitre 2. Liste de photographie pour les enquêteurs	III-2-17
Appendice 2 au Chapitre 2. Méthode d'établissement des schémas de répartition de l'épave	III-2-19
Chapitre 3. Enquête organisationnelle	III-3-1
3.1 Généralités	III-3-1
3.2 Le modèle de Reason et l'enquête organisationnelle	III-3-1
3.3 Modèle d'enquête organisationnelle	III-3-3
3.4 Problèmes éventuels des enquêtes organisationnelles	III-3-7
3.5 Méthodologie	III-3-7
3.6 Considérations finales	III-3-11
Chapitre 4. Enquête sur l'exploitation	III-4-1
4.1 Généralités	III-4-1
4.2 Antécédents de l'équipage	III-4-2
4.3 Qualifications/compétences de l'équipage	III-4-3
4.4 Périodes de service et de repos de l'équipage.....	III-4-4
4.5 Gestion des tâches et gestion des ressources en équipe (CRM).....	III-4-4
4.6 Équipement personnel.....	III-4-5
4.7 Établissement du plan de vol.....	III-4-6
4.8 Poids et centrage	III-4-7
4.9 Cartes aéronautiques et bases de données de navigation.....	III-4-8
4.10 Directives d'exploitation.....	III-4-8
4.11 Entrevues avec les témoins.....	III-4-11
4.12 Détermination de la trajectoire de vol finale.....	III-4-14
4.13 Déroulement du vol	III-4-15

	<i>Page</i>
Chapitre 5. Environnement opérationnel de l'aéronef	III-5-1
5.1 Enquête sur les conditions météorologiques	III-5-1
5.2 Enquête sur les services de la circulation aérienne.....	III-5-9
5.3 Installations et services d'aérodrome	III-5-31
5.4 Givrage.....	III-5-37
5.5 Hydravions	III-5-52
5.6 Oiseaux/faune	III-5-57
Chapitre 6. Enquête sur les performances de l'aéronef.....	III-6-1
6.1 Introduction.....	III-6-1
6.2 Activités du Groupe des performances.....	III-6-2
6.3 Sources de données.....	III-6-7
Chapitre 7. Enregistreurs de bord.....	III-7-1
7.1 Généralités	III-7-1
7.2 Enregistreurs de données de vol.....	III-7-6
7.3 Enregistreurs de conversations de poste de pilotage	III-7-10
7.4 Animation du vol.....	III-7-13
7.5 Autres dispositifs d'enregistrement.....	III-7-14
7.6 Besoins futurs.....	III-7-19
7.7 Conclusion.....	III-7-21
Chapitre 8. Reconstitution de l'épave.....	III-8-1
8.1 Généralités	III-8-1
8.2 Décision de reconstituer une épave	III-8-1
8.3 Types de reconstitution	III-8-2
8.4 Reconstitution sur les lieux de l'accident	III-8-3
8.5 Reconstitution hors des lieux de l'accident.....	III-8-4
8.6 Reconstitution virtuelle	III-8-4
8.7 Identification des éléments de l'épave.....	III-8-4
8.8 Résumé	III-8-6
Chapitre 9. Enquête sur les structures.....	III-9-1
9.1 Matériaux structuraux	III-9-1
9.2 Types de ruptures des matériaux	III-9-4
9.3 Examen de la cellule, y compris le train d'atterrissage et les commandes de vol	III-9-6
9.4 Fatigue des matériaux	III-9-8
9.5 Identification des ruptures statiques	III-9-14
9.6 Modes d'application de la charge	III-9-21
9.7 Désintégration en vol.....	III-9-23
9.8 Matériaux composites.....	III-9-27
9.9 Analyses en laboratoire	III-9-67
9.10 Fractographie	III-9-67
9.11 Problèmes des aéronefs vieillissants.....	III-9-69
9.12 Prolongation de la durée de vie utile	III-9-81

	Page
Chapitre 10. Enquête sur les collisions en vol.....	III-10-1
10.1 Introduction.....	III-10-1
10.2 Sources d'information.....	III-10-1
10.3 Utilisation des indices matériels	III-10-2
10.4 Repérer et mesure les rayures utiles.....	III-10-4
10.5 Méthodes de calcul de l'angle de collision.....	III-10-7
10.6 Détermination des angles de collision et de convergence dans différents scénarios	III-10-10
10.7 Résumé.....	III-10-13
Chapitre 11. Enquête sur la propagation des incendies	III-11-1
11.1 Objectif	III-11-1
11.2 Compétences de l'enquêteur.....	III-11-1
11.3 Introduction au processus de combustion	III-11-2
11.4 Incendies et explosions liés au carburant.....	III-11-3
11.5 Incendies au sol	III-11-6
11.6 Sources d'inflammation	III-11-6
11.7 Effets de l'incendie sur les métaux	III-11-8
11.8 Structures composites.....	III-11-8
11.9 Évaluation des lieux de l'accident.....	III-11-9
11.10 Conseils pour l'enquête sur la propagation de l'incendie.....	III-11-12
Appendice au Chapitre 11. Glossaire de l'inflammabilité	III-11-13
Chapitre 12. Enquête sur les groupes motopropulseurs.....	III-12-1
12.1 Généralités	III-12-1
12.2 Turbines à gaz.....	III-12-2
12.3 Moteurs alternatifs et turbopropulseurs	III-12-32
12.4 Indices fournis par l'examen de l'hélice	III-12-38
12.5 Gestion des groupes motopropulseurs.....	III-12-44
12.6 Nature et qualité du carburant.....	III-12-44
12.7 Prélèvement d'échantillons.....	III-12-44
12.8 Examen par des spécialistes.....	III-12-45
12.9 Autres sources d'information	III-12-45
12.10 Bibliographie.....	III-12-47
Chapitre 13. Enquête sur les systèmes	III-13-1
13.1 Généralités	III-13-1
13.2 Système hydraulique	III-13-2
13.3 Système électrique.....	III-13-12
13.4 Systèmes de pressurisation et de climatisation	III-13-31
13.5 Système de protection contre le givrage et la pluie	III-13-33
13.6 Instruments.....	III-13-34
13.7 Systèmes de navigation	III-13-48
13.8 Commandes de vol.....	III-13-50
13.9 Systèmes de détection et de protection incendie	III-13-62
13.10 Système de pressurisation	III-13-62
13.11 Système de train d'atterrissage	III-13-64
13.12 Système de carburant	III-13-69
13.13 Système anticollision embarqué.....	III-13-79
13.14 Système d'avertissement de proximité du sol amélioré (EGPWS).....	III-13-80

	Page	
13.15	Systèmes à mémoire non volatile.....	III-13-80
13.16	Parachute à déploiement pyrotechnique.....	III-13-83
Chapitre 14.	Enquête sur la maintenance	III-14-1
14.1	Objectif.....	III-14-1
14.2	Portée.....	III-14-1
14.3	Enquête sur les erreurs de maintenance.....	III-14-2
14.4	Groupe de la maintenance.....	III-14-21
14.5	Transporteurs aériens.....	III-14-24
14.6	Enquête sur les aéronefs de l'aviation générale.....	III-14-38
14.7	Les facteurs humains en maintenance.....	III-14-40
	Appendice au Chapitre 14. Données sommaires de maintenance.....	III-14-43
Chapitre 15.	Enquête sur les hélicoptères	III-15-1
15.1	Généralités.....	III-15-1
15.2	Particularités des modèles.....	III-15-1
15.3	Enquête technique.....	III-15-2
15.4	Enquête sur l'environnement opérationnel.....	III-15-15
Chapitre 16.	Enquête sur les facteurs humains.....	III-16-1
16.1	Généralités.....	III-16-1
16.2	Approche systémique de l'enquête sur les facteurs humains.....	III-16-2
16.3	Activités d'enquête.....	III-16-19
	Appendice 1 au Chapitre 16. Modes de défaillance.....	III-16-37
	Appendice 2 au Chapitre 16. Processus intégré d'enquête sur les facteurs humains.....	III-16-43
	Appendice 3 au Chapitre 16. Références.....	III-16-53
Chapitre 17.	Survie, évacuation, recherches, sauvetage et lutte contre l'incendie.....	III-17-1
17.1	Introduction.....	III-17-1
17.2	Détails de l'enquête.....	III-17-2
17.3	Constatations médicales et pathologiques.....	III-17-9
17.4	Équipes d'intervention.....	III-17-9
17.5	Entrevues.....	III-17-13
Chapitre 18.	Enquête pathologique	III-18-1
18.1	Généralités.....	III-18-1
18.2	Contribution de l'enquête pathologique.....	III-18-2
18.3	Mise au courant du pathologiste.....	III-18-4
18.4	Opérations à effectuer sur les lieux de l'accident.....	III-18-4
18.5	Opérations à effectuer à la morgue.....	III-18-7
18.6	Indices pouvant être décelés par l'examen pathologique.....	III-18-14
18.7	Remise aux autorités compétentes des restes et des objets personnels des victimes.....	III-18-18
18.8	Les survivants de l'accident.....	III-18-18
18.9	Autres aspects de l'enquête pathologique.....	III-18-19
18.10	Résumé.....	III-18-21

	Page
Chapitre 19. Enquête sur les sabotages par explosifs.....	III-19-1
19.1 Généralités	III-19-1
19.2 Indices relevés par l'enquêteur.....	III-19-1
19.3 Indices métallurgiques.....	III-19-7
19.4 Structure et composition des fragments	III-19-11
19.5 Chimie et évaluation des matériaux	III-19-15
19.6 Effets des fronts de Mach.....	III-19-24
Chapitre 20. Enquête sur la conception des systèmes	III-20-1
20.1 Objet et portée.....	III-20-1
20.2 Processus d'assurance conception	III-20-1
20.3 Processus de certification.....	III-20-2
20.4 Processus d'évaluation de la sécurité	III-20-3
20.5 Sécurité de la conception	III-20-6
20.6 Fiabilité et sécurité des systèmes.....	III-20-7
20.7 Sécurité des systèmes et l'enquêteur sur les accidents d'aviation	III-20-8
20.8 Enquête sur les systèmes	III-20-9
20.9 Essais, évaluation et enquête.....	III-20-10
20.10 Résumé.....	III-20-11

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 PROCESSUS D'ENQUÊTE

1.1.1 Une enquête sur un accident est un processus systématique d'évaluation et d'élimination de toutes les causes possibles d'un événement malencontreux pour ne retenir que celles qui s'appliquent à cette enquête. Si l'enquête révèle des carences qui ne se sont pas directement liées à cet accident, l'équipe d'enquête doit aussi en prendre note et les communiquer à l'autorité compétente, même si ces renseignements ne sont pas inclus dans le rapport d'enquête officiel. De nombreux accidents semblent présenter des caractéristiques communes, mais ces similitudes peuvent être trompeuses. Il est donc très important que les enquêteurs gardent l'esprit ouvert et qu'ils évitent de mettre l'accent sur une caractéristique en particulier au détriment des autres. Vu la faible fréquence des accidents, les enquêteurs doivent saisir toutes les occasions de suivre une formation auprès des transporteurs aériens, de l'aviation militaire, des constructeurs d'aéronefs et d'autres enquêteurs sur les accidents pour se tenir à jour et acquérir les meilleures méthodes d'enquête. Bon nombre de grandes entreprises de transport aérien et de constructeurs d'aéronefs disposent de ressources pour les enquêtes sur les accidents et les enquêteurs devraient les consulter dans le cadre de leur formation périodique. Les exercices d'application des plans d'urgence exécutés périodiquement par les transporteurs aériens et les aérodromes et les scénarios utilisés dans le cadre de ces exercices permettent aussi aux enquêteurs d'améliorer leur formation. Ces relations seront utiles aux enquêteurs pour déterminer efficacement les causes des accidents et des incidents graves.

1.1.2 Les enquêtes sur les accidents comprennent trois étapes (Figure III-1-1) :

- a) la collecte des données ;
- b) l'analyse des données ;
- c) la présentation des résultats.

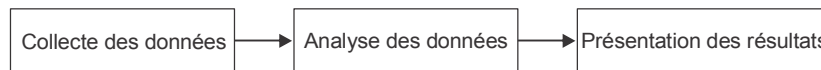


Figure III-1-1. Processus d'enquête

1.2 COLLECTE DES DONNÉES

1.2.1 La première étape du processus d'enquête consiste principalement à déterminer les données qui s'appliquent à l'accident et à les recueillir, en donnant la priorité aux données très périssables. La collecte des données se transforme souvent en un processus continu à mesure que se précisent les événements qui entourent l'accident. Les données recueillies au début de l'enquête peuvent donc être combinées à d'autres données obtenues plus tard pour confirmer et valider les facteurs qui ont pu contribuer à l'accident. Il faut notamment collecter :

- a) les données sur l'accident ;
- b) les données météorologiques ;
- c) les données techniques ;
- d) les données sur les facteurs humains.

Collecte des données sur l'accident

1.2.2 Obtenir les données de référence importantes pour faciliter la collecte des données météorologiques, des données sur les performances de l'aéronef et des données du contrôle de la circulation aérienne. Les sources premières de ces données sont les plans de vol, les données radar des services de la circulation aérienne (ATS), les cartes de navigation et les cartes topographiques. Ces données doivent notamment inclure :

- a) la date (UTC et LMT) ;
- b) l'heure (UTC et LMT) ;
- c) le lieu :
 - 1) l'emplacement général ;
 - 2) les coordonnées de quadrillage ;
 - 3) l'altitude et la topographie ;
- d) le point de départ ;
- e) l'altitude ou le niveau de vol de croisière ;
- f) la destination et les escales (avec les ETA et les ETD), et les pistes radar.

Collecte des données météorologiques

1.2.3 Les conditions météorologiques prévues et locales peuvent avoir une incidence importante sur les conditions de vol et les performances de l'aéronef ; elles comprennent notamment les conditions atmosphériques, la position du soleil ou de la lune, le vent et des conditions inhabituelles telles que les cendres volcaniques, la fumée, le cisaillement du vent, les illusions visuelles ou le givrage, ainsi que les caractéristiques du point de départ ou du point de destination qui ont pu influencer sur le profil de décollage ou d'atterrissage, telles qu'un départ précipité ou une réserve supplémentaire de carburant pour des retards ou détournements prévus.

Collecte des données techniques

1.2.4 Ces données proviennent de l'enquête effectuée sur les lieux de l'accident ainsi que des états de maintenance, des registres de fabrication, des dispositifs embarqués de collecte de données et des analyses en laboratoire des éléments de l'aéronef. Ces informations peuvent aussi servir de base à la reconstitution synthétique et à la simulation du vol. Les rapports de maintenance et l'examen d'événements semblables dans les bases de données sur les accidents/incidents peuvent aussi fournir des indications utiles.

Collecte des données sur les facteurs humains

1.2.5 Les données sur les facteurs humains sont parfois les plus difficiles à obtenir dans les accidents mortels parce qu'il y a peu de témoins pour confirmer les actions de l'équipage de conduite et les conditions auxquelles il devait faire face. Les entrevues avec le personnel de maintenance et les collègues peuvent être très émotives et difficiles. Les résultats des autopsies ainsi que la reconstitution des actions de l'équipage à partir des données des enregistreurs de bord et des enregistreurs du contrôle de la circulation aérienne peuvent donner des indices sur les actions de l'équipage de conduite. Les défaillances des systèmes peuvent aussi exiger des entretiens avec le personnel de maintenance et le personnel de service au sol. Ces entretiens doivent se tenir le plus tôt possible pendant que les personnes se rappellent encore clairement les faits et qu'elles n'ont pas encore subi l'influence des conversations avec des collègues.

1.3 ANALYSE DES DONNÉES

L'analyse des données doit se faire parallèlement à la collecte des données. Elle soulève souvent d'autres questions qui exigent des données, des simulations ou des consultations supplémentaires. Les résultats d'une analyse révèlent rarement une cause unique et une solution spécifique. Les membres des diverses équipes d'enquête doivent se consulter régulièrement afin de collecter et de traiter les données nécessaires.

1.4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les comptes rendus d'accidents doivent être présentés dans le format prescrit dans l'Annexe 13 afin qu'ils puissent être incorporés dans la base de données ADREP. Les résultats des enquêtes sur les incidents sont souvent plus utiles et plus avantageux pour la sécurité que ceux des enquêtes sur les accidents.

Chapitre 2

L'ÉPAVE

2.1 LIEU DE L'ACCIDENT

2.1.1 Le lieu de l'accident doit être déterminé et noté. Il est important de localiser le point d'impact et, si l'épave n'est pas située au même endroit, d'identifier l'emplacement de la plus grande partie de l'épave et l'étendue de la zone de débris. La manière la plus facile de procéder est d'utiliser un récepteur de satellite du système mondial de localisation (GPS) et des cartes aéronautiques ou des photographies aériennes. Les récepteurs GPS sont disponibles en plusieurs formats. Les petits récepteurs portables sont suffisamment précis pour localiser le lieu de l'accident et même les distances générales entre les objets dans la zone de débris. Voir le § 2.3.9 du présent chapitre pour plus de renseignements sur l'utilisation des récepteurs GPS.

2.1.2 Le lieu peut aussi être déterminé en traçant les relèvements et les distances à partir de repères connus sur une carte à grande échelle, ou en utilisant une photographie aérienne du lieu de l'accident et en la rapportant à une carte appropriée. L'altitude du lieu doit être déterminée ainsi que, s'il y a lieu, toute déclivité importante dans la zone de l'accident. Dans certains cas, lorsqu'il est estimé que la topographie est importante pour l'enquête, il peut être souhaitable de faire établir un profil de terrain par un géomètre. Il convient d'utiliser des cartes locales et les cartes aéronautiques appropriées pour déterminer le lieu de l'accident par rapport aux installations des routes aériennes et aux aéroports. Le plan de l'aérodrome et des cartes d'approche doivent être utilisés lorsque l'accident s'est produit à l'approche ou au décollage.

2.2 PHOTOGRAPHIE

Introduction

2.2.1 La photographie est un élément important du processus d'enquête. Des photographies claires et bien cadrées permettent à l'enquêteur de conserver les indices périssables, d'étayer l'information fournie dans le rapport et d'illustrer les conclusions de l'enquête. Les enquêteurs doivent avoir des connaissances suffisantes en photographie pour prendre des photos de qualité ou pour communiquer efficacement avec les photographes professionnels de manière à obtenir des photos qui contribuent à illustrer clairement le rapport écrit.

Équipement

2.2.2 L'enquêteur ne doit pas oublier, lorsqu'il choisit son équipement, que les accidents d'aviation ne se produisent pas toujours à des endroits d'accès facile. Il ne sait jamais sur quelle distance il devra transporter l'équipement, à quelles conditions il devra faire face durant l'enquête ni s'il aura accès à l'électricité, au téléphone ou à Internet. L'équipement de l'enquêteur doit être compact et léger et facile à transporter et à utiliser quelles que soient les circonstances.

2.2.3 *Appareils photo.* L'appareil photo doit être durable et fiable et avoir suffisamment de fonctions pour répondre aux besoins du photographe. Les commandes doivent être faciles à utiliser, même avec des gants. L'obturateur doit pouvoir se synchroniser avec un flash électronique externe. La plage focale de l'objectif doit être suffisante pour répondre à la plupart des situations et permettre la prise de vues rapprochées. Si l'appareil fonctionne avec des piles, il faudra emporter des piles supplémentaires. Les enquêteurs peuvent choisir parmi plusieurs types d'appareils photo mais, quel que soit le modèle choisi, il est essentiel que la personne qui prend les photos ait une expérience de la photographie extérieure dans des conditions défavorables ou traumatisantes.

- a) Les *appareils photo jetables* sont produits par presque tous les grands fabricants mondiaux de pellicule photographique. Ils sont faciles à utiliser et plusieurs ont un flash intégré. L'appareil est remis au laboratoire de photographie et n'est pas retourné à l'utilisateur. Celui-ci reçoit les négatifs et les épreuves et il peut les faire scanner pour les stocker sous forme numérique. Ces appareils prennent de bonnes photos claires pourvu qu'ils soient employés à l'intérieur de leurs paramètres de conception. Ils sont munis d'objectifs à focale fixe qui ne peuvent pas être utilisés pour les prises de vues rapprochées. Le seul réglage possible du temps de pose pour tenir compte des différentes conditions d'éclairage est l'activation du flash. Le flash est assez puissant pour être efficace à des distances de deux à trois mètres. Ces appareils sont bon marché, petits et compacts, très faciles à utiliser et prennent de bonnes photos. Si l'enquêteur possède un appareil plus complexe, un appareil jetable est un bon appareil de secours en cas de défaillance de l'appareil photo principal.
- b) Les *appareils photo compacts* sont plus polyvalents que les appareils jetables. Ceux qui sont actuellement sur le marché sont en général complètement automatiques, y compris la mise au point et le temps de pose. Beaucoup d'entre eux possèdent des objectifs à focale variable (zoom) et certains permettent la prise de vues rapprochées. Ils utilisent des pellicules ou des supports numériques. Ces appareils sont polyvalents, compacts, légers, faciles d'emploi et peuvent être utilisés dans des conditions météorologiques difficiles. Ils sont un excellent choix pour l'enquêteur qui a peu d'expérience en photographie.
- c) Les *appareils reflex mono-objectif* possèdent un miroir entre l'objectif et la pellicule ou le capteur de lumière, qui intercepte les rayons lumineux provenant de l'objectif et les renvoie sur un verre dépoli utilisé par le photographe pour cadrer l'image et faire la mise au point. Essentiellement, le photographe voit ce que voit l'appareil. Ces appareils photo sont les plus polyvalents disponibles actuellement et, employés avec les bons accessoires, ils peuvent être utilisés pour presque tous les besoins photographiques des enquêtes sur les accidents. Ce sont les appareils qui exigent le plus de connaissances en photographie et le plus d'expérience dans leur utilisation pour être employés efficacement. Ils sont disponibles en format analogique, qui utilise la pellicule traditionnelle, ou en format numérique.
- d) Les *caméscopes* sont extrêmement utiles pour les enquêteurs. Les appareils modernes sont légers et compacts et l'enregistrement vidéo numérique peut être traité à l'ordinateur à l'aide d'un logiciel de montage facile d'emploi. Les enquêteurs devraient utiliser des caméscopes pour enregistrer les activités de lutte contre l'incendie et de sauvetage sur le site de l'accident, pour prendre des notes pendant l'inspection du site et pour enregistrer les étapes d'enlèvement de l'épave, son chargement sur les véhicules et son déchargement dans un hangar ou toute autre aire d'entreposage. Au moins un caméscope devrait être employé pour enregistrer les étapes du démontage des éléments.

2.2.4 Les *accessoires* facilitent la photographie de l'épave et aident le photographe à améliorer la qualité des photos. Les accessoires suivants sont utiles pour les enquêteurs :

- a) *Lentilles et objectifs.* On peut utiliser des lentilles supplémentaires, qui se fixent devant l'objectif principal, ou des objectifs interchangeables ; dans ce dernier cas, l'objectif principal s'enlève et est remplacé par un autre objectif. L'idéal est un objectif à focale variable de 28mm à 135mm pour une

pellicule de 35 mm, ou son équivalent en numérique, qui possède aussi un réglage macro. L'utilisation d'un objectif combinant ces fonctions évite d'avoir à transporter des accessoires lourds.

- b) *Flash.* Le flash est utile pour éclaircir les ombres dans les scènes en plein soleil. La plupart des appareils photo compacts et de nombreux appareils reflex mono-objectif ont un flash intégré. Ces flash apportent une lumière supplémentaire dans des conditions de faible éclairage, mais ils ne sont généralement pas assez puissants pour éclaircir les ombres des scènes en plein soleil. Vu qu'ils sont intégrés à l'appareil photo, le photographe ne peut pas régler l'angle du faisceau lumineux. Le meilleur flash pour un enquêteur est un flash amovible qui peut être détaché de l'appareil photo et orienté indépendamment. Les projecteurs, l'éclairage photographique ou les caméscopes permettant de filmer sous faible éclairage sont utiles la nuit ou par faible visibilité.
- c) *Filtres.* Ces dispositifs se fixent devant l'objectif et filtrent la lumière qui arrive sur la pellicule ou le capteur. Les plus utiles pour les enquêteurs sont les filtres UVa, UVb, skylight et polarisant. De nombreux photographes installent un filtre UV ou un filtre skylight sur l'objectif pour le protéger de la poussière, de l'humidité, du brouillard salin ou d'autres dangers. Les filtres UVa et UVb éliminent les rayons ultraviolets qui sont rendus par le bleu sur la pellicule et qui ont pour effet de voiler les photos. Les filtres skylight sont utiles pour la prise de photos dans les zones sombres et atténuent la tendance des dominantes bleues du ciel à modifier les couleurs de la photographie. Les appareils numériques peuvent compenser cette tendance par l'équilibrage des blancs. Le filtre polarisant est utile pour réduire les reflets sur les surfaces brillantes (eau, verre ou autres matériaux), mais il ne réduit pas les reflets sur les surfaces métalliques. Consulter le guide d'emploi de l'appareil photo.
- d) *Supports.* Le support le plus courant est le trépied. Il doit être léger et robuste et offrir une gamme complète de réglages en hauteur, y compris la possibilité de positionner l'appareil près du sol, afin de permettre à l'enquêteur de prendre de vues rapprochées de l'épave au sol.
- e) *Déclencheur souple/déclencheur à distance.* Cet accessoire permet de prendre des photos sans transmettre à l'appareil photo un mouvement qui pourrait rendre l'image floue.
- f) *Carnet de notes.* Il est nécessaire d'utiliser un carnet ou tout autre dispositif permettant de prendre des notes pour identifier chaque photo par sujet et indiquer ce qu'elle signifie. Certains appareils photo et caméscopes ont aussi une fonction d'horodatage, ce qui peut être utile pour la tenue des dossiers.

Pellicule et supports électroniques

2.2.5 Certains enquêteurs utilisent encore la pellicule photographique, mais les supports numériques deviennent rapidement l'outil de choix des enquêtes. Les appareils numériques de qualité supérieure produisent des photos claires de première qualité, faciles à archiver, à éditer et à insérer dans les documents d'information et les rapports. Le support numérique donne immédiatement accès à la photo et l'enquêteur n'a pas à attendre le développement de la pellicule ni le tirage des épreuves. L'enquêteur contrôle physiquement les images dès le départ, éliminant ainsi tout risque de perdre ou d'endommager la pellicule ou de compromettre des renseignements exclusifs. Il peut immédiatement voir l'image et déterminer si elle est acceptable ou s'il doit prendre une autre photo. En outre, vu leur grande capacité de stockage, les nouveaux appareils numériques peuvent enregistrer plusieurs centaines de photos et il est facile d'emporter plusieurs dispositifs de mémoire pour stocker un nombre presque illimité de photos numériques à un coût minime. Ces photos peuvent ensuite être transmises sur Internet en pièces jointes à un courriel. Les téléphones portables possèdent maintenant cette fonction et les enquêteurs pourraient les utiliser à différents points d'une zone de débris pour échanger rapidement des images.

Éléments à photographier sur le lieu de l'accident

2.2.6 La règle générale à observer pour la prise de photos est de commencer par les indices les plus périssables et de finir par les indices les plus durables. L'Appendice 1 au Chapitre 2 contient une liste des éléments à photographier sur le lieu de l'accident.

2.2.7 Commencer par utiliser une caméra vidéo pour enregistrer les activités de lutte contre l'incendie et de sauvetage. Fixer la caméra à un trépied et faire un zoom arrière pour capter l'ensemble du lieu. Démarrer la caméra et filmer en continu. Si la durée de l'intervention est longue, changer les bandes à mesure qu'elles arrivent à la fin de leur durée d'enregistrement. Si plus d'une caméra vidéo est utilisée, filmer à partir du plus grand nombre de points d'observation possibles sans nuire aux activités d'intervention. La vidéo sera utile plus tard pour plusieurs raisons : elle constitue un dossier des activités d'intervention et les enquêteurs pourront l'employer pour déterminer les dommages qui ont été causés par les équipes d'intervention et ceux qui ont été causés par l'accident. Elle peut aussi être utilisée pour la formation des équipes de lutte contre l'incendie et des équipes de sauvetage. S'il peut prendre des photos sans se mettre en danger ni nuire aux activités d'intervention, l'enquêteur devrait photographier des indices périssables tels que les marques au sol et les traces de dérapage.

2.2.8 Dès que l'incendie est éteint et qu'ils ont la confirmation que le lieu de l'accident ne présente plus de dangers, les enquêteurs doivent photographier toutes les traces de dérapage et marques au sol qui restent. Le médecin légiste local commencera à enlever les corps, et tous les corps ou parties de corps qui se trouvent sur les lieux doivent être photographiés et catalogués avant d'être déplacés. Tout autre indice médical tel que des traces de tissus sur l'épave doit être photographié le plus tôt possible. Les dommages causés à la propriété privée doivent aussi être documentés.

2.2.9 L'étape suivante consiste à prendre des photos aériennes du lieu de l'accident. Une façon facile et efficace de prendre ces photos est de confier le travail à un entrepreneur spécialisé en photographie aérienne. Dans ce cas, il faut aussi s'assurer que le photographe comprend très exactement l'information recherchée et ce qu'il doit photographier. Une bonne façon pour un enquêteur de prendre lui-même les photographies aériennes est d'utiliser un hélicoptère. Il ne doit pas oublier de se sécuriser et de sécuriser l'équipement. Tenir l'appareil de manière à ce que l'axe de l'objectif soit le plus vertical possible. Prendre plusieurs photos depuis chaque position en utilisant des temps de pose différents. Utiliser une grande vitesse d'obturation pour obtenir des images très claires. Éviter de mettre l'appareil photo en contact avec la structure de l'hélicoptère durant la pose car les vibrations de l'hélicoptère seront transmises à l'appareil photo et dégraderont l'image. Incorporer une pièce d'équipement, par exemple un véhicule, dans la scène photographiée pour donner une idée de l'échelle. Dans la mesure du possible, prendre des photos à différents moments de la journée, car les différents jeux d'ombres révéleront des détails différents.

2.2.10 Durant l'inspection initiale du lieu de l'accident, il peut être utile qu'un assistant transporte un caméscope. Enregistrer les premières impressions sous forme de notes vidéo accompagnées de notes vocales. Cet enregistrement peut aussi être employé pour informer les membres de l'équipe d'enquête nouvellement arrivés, les équipes d'intervention pour les matières dangereuses et le personnel médical chargé de récupérer les corps.

2.2.11 La tâche suivante consiste à photographier l'épave. Si toute l'épave est concentrée dans une petite zone et que toutes les parties sont facilement visibles depuis un seul point d'observation, prendre des photos depuis tous les points cardinaux et points intermédiaires de la boussole. Le photographe doit se tenir à la même distance du centre de l'épave pour chaque photo. Veiller à ce que les notes indiquent la direction dans laquelle la photo a été prise. Si l'épave est dispersée sur une grande superficie, il peut être impossible de photographier la scène au complet. Dans ce cas, photographier chaque élément ou groupe d'éléments importants. Prendre au moins une photo depuis les quatre points cardinaux puis se rapprocher pour montrer les détails. Veiller à noter l'emplacement de l'élément ou groupe d'éléments de l'épave sur le schéma de l'accident. Prendre des photos qui illustrent les dommages aux éléments de l'épave, les faciès de rupture et les marques témoins. Les photographes et les enquêteurs ne doivent jamais essayer de remonter les pièces cassées, car ils risquent de détruire le faciès de rupture et d'altérer les indices de la cause de la défaillance. Lorsque l'épave est enlevée du site ou si elle doit être déplacée pour permettre l'accès à d'autres indices, prendre des

photos avant qu'elle ne soit déplacée. Lorsque des éléments importants de l'épave sont enlevés du site, utiliser une caméra vidéo pour enregistrer le processus de préparation des éléments pour le transport, leur chargement à bord du véhicule et leur déchargement et mise en place au lieu de destination. Dans la mesure du possible, enregistrer sur vidéo le processus de démontage ou d'ouverture des éléments. Photographier d'autres indices importants comme les traces d'incendie, les traces d'échauffement des structures, les ruptures structurelles, la position des commutateurs et les disjoncteurs. Photographier tout dommage causé aux arbres ou au feuillage environnants ainsi que les marques au sol laissées par les éléments de l'épave après la rupture initiale de l'aéronef. Photographier le point d'impact depuis un point d'observation situé dans l'axe de la trajectoire de vol de l'aéronef. Tout élément présent dans l'épave qui ne devrait pas s'y trouver doit aussi être photographié. Photographier également tout élément où il manque un composant essentiel. Par exemple, si l'enquête révèle qu'il manque une goupille sur une attache critique, photographier cette attache ainsi qu'une autre attache qui soit correctement installée.

2.2.12 Documenter les conditions environnementales s'il y a possibilité que les conditions météorologiques, l'angle du soleil, une illusion visuelle ou l'absence de références visuelles aient pu contribuer à l'accident. Il faut non seulement documenter dès que possible les conditions météorologiques au moment de l'accident, mais recréer l'angle et la lumière du soleil ou de la lune à une autre date dans les mêmes conditions représentatives. Ces points peuvent aussi être simulés, particulièrement dans le cas d'une enquête sur un impact sans perte de contrôle, de manière à ne pas mettre en danger un autre aéronef en essayant de recréer les conditions de l'accident.

2.2.13 Compte tenu des coûts des accidents d'aviation et de leurs enquêtes, la photographie est peu coûteuse. Prendre autant de photos qu'il le faut. Prendre une photo à exposition normale et la répéter à la moitié et au double de l'exposition indiquée par l'appareil. Les photographes appellent cette technique « bracketing ». Elle permet de s'assurer qu'au moins une des photos sera correctement exposée. Si un flash amovible est utilisé, éclairer le sujet de différentes directions et prendre des notes pour chaque photo. Les notes doivent contenir suffisamment de renseignements pour pouvoir identifier la photo plus tard et savoir ce qu'elle signifie. Ce processus est moins important en photographie numérique puisqu'il est possible de vérifier chaque photo immédiatement pour s'assurer qu'elle contient l'information requise.

Comment prendre de bonnes photos

2.2.14 Pour prendre une bonne photo, il faut tenir compte de cinq paramètres : la composition, l'éclairage du sujet, la mise au point, l'ouverture de l'objectif et la vitesse d'obturation. Il est essentiel de bien connaître son équipement photographique et il est recommandé de pratiquer la prise de photos dans des conditions défavorables. Les photographes d'accidents d'aviation peuvent aussi photographier les séances de formation aux enquêtes sur les accidents et les incidents ou les conditions dans les salles de cours, et acquérir une expérience supplémentaire dans le cadre d'une formation interdisciplinaire avec des pompiers industriels ou des équipes d'enquêtes criminelles.

2.2.15 La composition est l'agencement des éléments de la scène photographiée. Voici quelques conseils pour bien composer la photo. Se rapprocher du sujet pour qu'il remplisse le cadre le mieux possible. Éliminer les détails superflus ou qui distraient l'attention, ce qui n'est pas toujours possible dans les scènes d'accident vu qu'il y a risque d'endommager d'autres indices. Pour contourner ce problème, photographier chaque pièce et les éléments gênants tels qu'ils se trouvent dans la scène puis couvrir ces éléments avec du tissu ou déplacer la pièce à un endroit où elle peut être photographiée sans les éléments susceptibles de détourner l'attention. Une toile d'une teinte ou d'une couleur contrastante constitue un bon arrière-plan. Incorporer une règle, un ruban à mesurer ou un objet commun de dimensions connues (par exemple, un crayon) dans l'image pour donner une idée des dimensions du sujet. Prendre la photo sous différents angles pour s'assurer qu'elle contient toute l'information requise. Les appareils numériques présentent un avantage dans ces cas, car ils permettent à l'enquêteur de vérifier les photos immédiatement pour voir si elles contiennent toute l'information requise ou si leur qualité technique est suffisante.

2.2.16 Le deuxième paramètre est l'éclairage. Le meilleur éclairage pour photographier les épaves est un éclairage doux, diffus et uniforme. Un jour couvert est habituellement parfait : les ombres ne masquent pas les détails et la lumière diffuse ne cause pas de reflets brillants excessifs sur les surfaces métalliques ni d'autres reflets susceptibles de distraire l'attention. Ces conditions peuvent ne pas être présentes sur les lieux d'un accident et l'enquêteur doit donc prendre d'autres moyens pour contrôler l'éclairage. Si une petite partie de l'épave se trouve en plein soleil, la photographier à l'endroit où elle se trouve ; utiliser un filtre skylight ou la balance des blancs de l'appareil photo pour compenser la dominante bleutée caractéristique des ombres. On peut aussi utiliser un flash pour éclaircir les ombres. Les Figures III-2-1 et III-2-2 montrent l'effet du flash d'appoint. La plupart des appareils photo et flash combinés automatiques comportent un réglage permettant d'éclaircir les ombres par fort ensoleillement.

2.2.17 Pour que la photo soit efficace, l'image doit être nette. La plupart des appareils photo modernes font la mise au point automatiquement et bon nombre d'entre eux permettent au photographe de désactiver la fonction automatique pour faire la mise au point manuellement. Il faut en général choisir la partie la plus importante du sujet et faire la mise au point sur cette partie, puis composer l'image dans le viseur et prendre la photo. Si l'appareil utilisé fait la mise au point automatiquement, il est probable qu'il est doté d'une fonction de verrouillage qui permet au photographe de verrouiller la mise au point sur la partie choisie du sujet et de recomposer l'image. Consulter le guide d'emploi de l'appareil photo pour plus de renseignements sur cette fonction.

2.2.18 L'ouverture de l'objectif commande l'intensité de la lumière qui atteint la pellicule ou le capteur. Le nombre indiqué sur la bague de réglage de l'ouverture (par ex., 1.2, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, etc.) est le nombre d'ouverture et correspond simplement à la distance focale de l'objectif divisée par le diamètre de l'ouverture de l'objectif. L'intensité de la lumière qui frappe la pellicule ou le capteur numérique diminue à mesure que le nombre s'élève, chaque nombre laissant passer la moitié de la lumière admise par le nombre précédent. Les photographes emploient de grandes ouvertures dans les conditions de faible éclairage et de petites ouvertures sous une forte lumière. La plupart des appareils photo modernes ont une fonction de sélection automatique de l'ouverture de l'objectif, mais le photographe préférera la régler manuellement dans certains cas. Une grande ouverture diminue la profondeur de champ de l'image. La profondeur de champ est la distance entre le point le plus rapproché et le point le plus éloigné de l'image dont la netteté est acceptable. La fermeture du diaphragme (ce qu'on appelle « diaphragmer ») réduit l'ouverture et augmente la profondeur de champ. Les enquêteurs peuvent tirer avantage de cette caractéristique de tous les objectifs. Même si une petite ouverture donne une netteté acceptable à toute l'image, l'enquêteur peut ouvrir le diaphragme pour incorporer intentionnellement dans la zone de flou les éléments qui peuvent distraire l'attention et mettre ainsi en évidence un élément particulier de la composition. Les Figures III-2-3 et III-2-4 montrent comment l'ouverture de l'objectif modifie la profondeur de champ. Si l'ouverture du diaphragme est réglée manuellement, il faudra sélectionner la vitesse d'obturation appropriée. Certains appareils règlent la vitesse automatiquement. Consulter le guide d'utilisation de l'appareil photo pour les renseignements sur le mode priorité diaphragme.

2.2.19 La vitesse d'obturation commande le temps pendant lequel l'obturateur laisse passer la lumière qui frappe la pellicule ou le capteur. Les vitesses d'obturation s'expriment généralement en fractions de seconde et, sur la plupart des appareils photo, le sélecteur indique les vitesses en incréments (1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4000, etc.), chaque vitesse étant la moitié de la vitesse précédente. Il existe plusieurs techniques pour déterminer la meilleure vitesse d'obturation. Une sensibilité de 1/(vitesse ISO) de la pellicule ou la sensibilité choisie pour le capteur numérique est généralement une bonne vitesse de départ. Pour une pellicule ayant une sensibilité ISO 100, par exemple, utiliser une vitesse d'obturation de 1/125 s. Pour éviter toute dégradation de l'image causée par le bougé de l'appareil photo, choisir une vitesse qui soit au moins 1/(distance focale de l'objectif). Si l'objectif a une focale de 100 mm, utiliser une vitesse d'au moins 1/100 s ou 1/125 s. Si la vitesse d'obturation est réglée manuellement, il faudra sélectionner l'ouverture de diaphragme appropriée. Certains appareils règlent l'ouverture automatiquement. Consulter le guide d'utilisation de l'appareil photo pour les renseignements sur le mode priorité vitesse.



Figure III-2-1. Cette photo illustre le problème de la prise de photos avec le plein soleil comme seul éclairage. Elle vise à montrer les dommages causés par la chaleur à la section turbine, mais l'ombre masque la plupart des détails des dommages.



Figure III-2-2. Cette photo a été prise en utilisant un flash d'appoint assez puissant pour éclaircir les ombres créées par l'exposition en plein soleil. Les dommages causés à la section turbine sont clairement visibles.

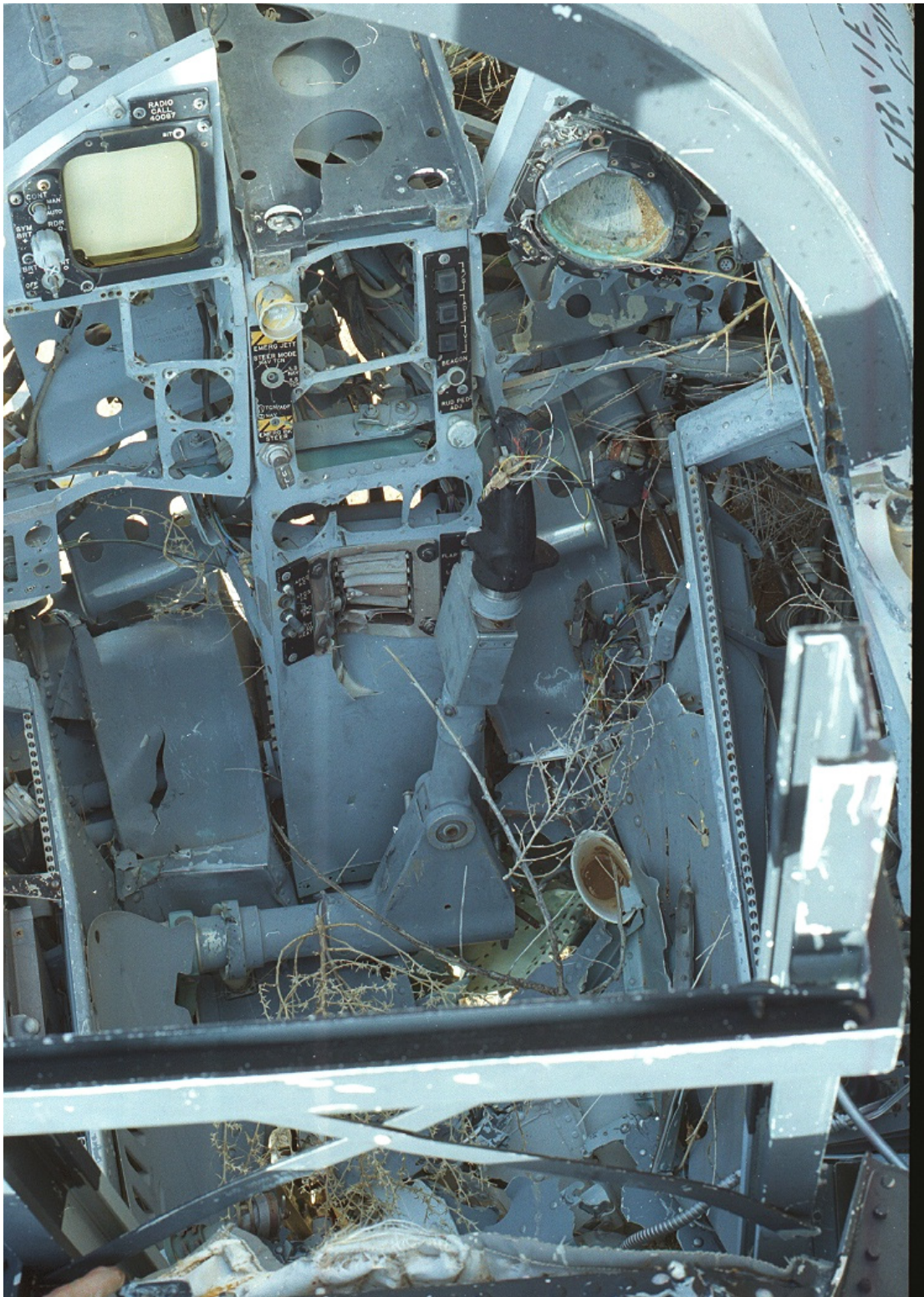


Figure III-2-3. Cette photo a été prise avec une ouverture relativement petite pour obtenir une profondeur de champ maximale. Noter que tous les éléments de l'image sont dans la zone de netteté.

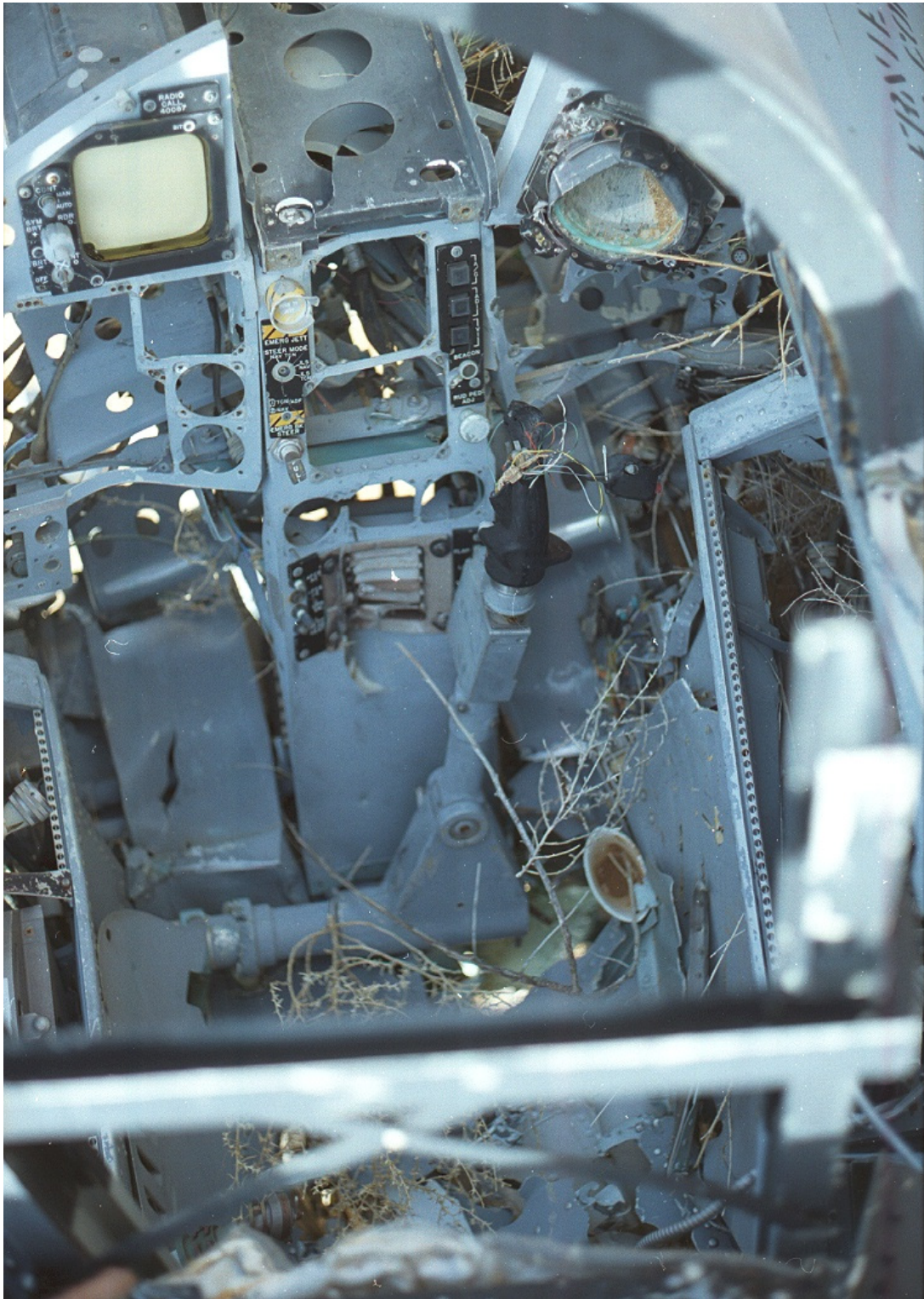


Figure III-2-4. Cette photo a été prise avec une ouverture relativement grande. La barre en avant-plan est floue, mais le tableau de bord est dans la zone de netteté et est ainsi mis en évidence.

Conseils pour améliorer la photographie d'enquête

2.2.20 Bien identifier le sujet. Le meilleur moyen est d'écrire les renseignements d'identification sur une grande fiche et de la placer près du sujet pour qu'elle apparaisse dans un coin de la photo. Prendre de bonnes notes sur le sujet et la signification de chaque photo. Les enquêteurs peuvent prendre des milliers de photos durant une enquête et de bonnes notes leur permettront de repérer et d'identifier les photos importantes. Inclure une règle ou un objet de dimensions connues dans la photo pour donner une idée des dimensions de l'objet.

2.2.21 Tenir l'appareil photo le plus fermement possible et appuyer sur le déclencheur de l'obturateur le plus délicatement possible afin d'éviter de bouger l'appareil. Pour prendre des photos avec une faible vitesse d'obturation ou en macro avec une très faible profondeur de champ, fixer l'appareil sur un trépied afin d'éviter tout mouvement qui risque d'altérer l'image ou de la rendre floue et utiliser le déclencheur souple ou le déclencheur à distance.

2.2.22 Prendre la plupart des photos en couleur. Certains objets, tels que les faciès de rupture et les fissures structurales, sont souvent plus nets en noir et blanc. Dans ces cas, les photos numériques couleur peuvent être converties en noir et blanc à l'ordinateur à l'aide d'un logiciel de traitement des photos.

2.2.23 Certaines petites parties de l'épave peuvent avoir une forme irrégulière et il peut être difficile de les placer sur une surface de travail. Pour faciliter la tâche, on peut employer un sac de riz ou de haricots secs recouvert d'un tissu de couleur neutre pour positionner et stabiliser le sujet.

2.2.24 Si le sujet est un composant endommagé ou défectueux, photographier aussi un composant normal aux fins de comparaison.

Coordination avec un photographe professionnel

2.2.25 S'assurer que le photographe sait à quoi s'attendre sur le lieu de l'accident, qu'il comprend les dangers que présente le site, qu'il possède tout l'équipement de protection personnelle nécessaire et qu'il sait comment s'en servir. Il doit savoir qu'il ne doit rien déplacer sur le lieu de l'accident. Voici une liste de l'équipement et des fournitures que doit avoir le photographe :

- a) deux appareils photo reflex mono-objectif 35mm ou deux appareils photo reflex numériques dotés de fonctions complètes ;
- b) objectifs zoom à focale de 28 à 135 mm pour un appareil photo 35mm ou l'équivalent pour un appareil photo numérique ;
un objectif macro ;
un flash externe assez puissant pour éclaircir les ombres dans les scènes en plein soleil ;
un posemètre/flashmètre ;
un trépied ;
un déclencheur souple ;
des filtres polarisants, UVa/b et skylight ;
une charte de gris, une charte de couleurs ;
20 rouleaux de pellicule 35mm de 36 poses ou l'équivalent en stockage numérique ;
des piles supplémentaires pour le travail de photographie prévu ;
un sac robuste pour transporter l'équipement et le protéger des éléments.

Tous les éléments de cette liste sont des outils de base du photographe professionnel et presque tous les photographes les transportent avec eux dans leur travail.

2.2.26 La présente section n'est qu'un rappel des techniques de base de la photographie des enquêtes sur les accidents. Il existe de nombreuses autres techniques photographiques qui peuvent être utiles pour les enquêteurs ; elles sont expliquées plus en détail dans les nombreux livres disponibles dans les librairies ou les magasins spécialisés dans la photographie. Bon nombre d'entre elles sont aussi décrites dans le manuel de l'utilisateur qui accompagne l'appareil photo. Lire les instructions du manuel et plusieurs livres sur la technique photographique. Pratiquer la prise de photos en utilisant tout l'équipement photographique de la trousse de l'enquêteur jusqu'à ce qu'elle devienne une seconde nature. L'enquêteur pourra ainsi utiliser au mieux le temps disponible et obtenir les meilleures photos possibles. Utiliser l'équipement fréquemment pour s'assurer qu'il fonctionne correctement.

2.3 RÉPARTITION DE L'ÉPAVE

2.3.1 L'enquête menée sur le lieu de l'accident doit commencer par une évaluation de l'épave pour s'assurer que les principaux éléments de structure et les gouvernes se trouvent dans la zone de répartition de l'épave. Examiner rapidement les lieux pour déterminer si les principaux éléments de structure s'y trouvent : ailes, empennage horizontal et vertical, le bon nombre de moteurs, le bon nombre d'hélices et de pales d'hélice, etc. Déterminer aussi si toutes les gouvernes se trouvent dans la zone : ailerons, volets, gouvernes de profondeur, volets de compensation, déporteurs, etc. Comme le nombre de gouvernes peut être relativement élevé, la pratique la plus courante consiste à fournir à chaque membre un simple schéma de l'aéronef (que l'on peut habituellement tirer du manuel de l'exploitant ou du manuel de maintenance). Chaque membre de l'équipe peut indiquer en couleur sur le schéma chaque élément de structure identifié et chaque gouverne retrouvée. Tous les schémas peuvent ensuite être comparés pour permettre à l'équipe d'enquête de s'assurer que l'aéronef au complet se trouve sur le lieu de l'accident. L'absence d'une partie importante de la structure ou d'une gouverne peut indiquer qu'elles ont été perdues avant l'impact et leur recherche doit débiter le plus tôt possible ; c'est la raison pour laquelle cet inventaire de base doit être établi dès le début de l'enquête.

2.3.2 Évaluer les caractéristiques de base du terrain autour du lieu de l'accident avant de procéder à une analyse détaillée. Si le terrain présente une pente montante au point d'impact, les indices de l'impact peuvent indiquer un angle plus prononcé qu'en terrain plat ou sur une pente descendante. De même, si la zone est fortement boisée, le degré d'impact peut être plus élevé que si la zone était dépourvue de grandes structures de végétation.

2.3.3 Les enquêteurs doivent établir l'ampleur de la dislocation de l'aéronef. Si elle est importante, elle peut être déterminée par un examen pédestre. Commencer au point de contact initial avec le sol ; essayer de déterminer la direction générale de la rupture et suivre cet axe. Identifier les éléments de structure qui se trouvent sur le chemin en notant s'ils suivent l'axe ou s'ils se trouvent à gauche ou à droite de l'axe. Faire un croquis préliminaire des débris sans porter trop d'attention à l'échelle. Lorsque les dernières parties sont notées le long de l'axe suivi, l'enquêteur peut supposer qu'il n'y en a aucune autre plus loin, mais il devrait continuer à suivre le chemin pendant encore une certaine distance pour confirmer que les derniers éléments trouvés sont réellement les derniers. Il arrive souvent que la forte inertie des objets lourds les projette loin de la zone normale de débris. Une fois qu'il a déterminé la limite longitudinale de la zone, l'enquêteur peut procéder de la même manière pour déterminer l'étendue de la zone de part et d'autre de l'axe longitudinal. Toutes les activités d'enquête peuvent ensuite être concentrées à l'intérieur des limites établies, ce qui facilite les missions d'enquête et garantit que les membres de l'équipe d'enquête ne sortiront pas de ces limites sans consulter l'enquêteur désigné. Dans le cas d'une désintégration en vol ou d'une collision aérienne, les données radar peuvent aider à repérer la zone de débris initiale et à déterminer l'étendue de la répartition de l'épave. Elles sont également essentielles pour localiser le lieu de l'accident lorsque celui-ci se produit au-dessus d'une étendue d'eau.

Récupération des enregistreurs

2.3.4 L'enquête sur le terrain doit commencer par dresser la liste des enregistreurs qui se trouvaient à bord de l'aéronef. Les enquêteurs doivent être au fait de tout dispositif de stockage de données, outre les enregistreurs de

données de vol et les enregistreurs de conversations de poste de pilotage, susceptible de fournir des informations utiles, par exemple, les mémoires des enregistreurs à accès rapide ou les mémoires non volatiles des cartes de circuits imprimés. Consulter les représentants du constructeur et de l'exploitant pour déterminer quels sont ces dispositifs. Leur emplacement et leur apparence doivent être bien compris avant d'examiner l'épave afin de pouvoir repérer et récupérer ces précieuses sources d'indices avant que le temps ou les conditions du lieu ne compromettent davantage les données. Les enquêteurs doivent recevoir les instructions concernant la manipulation des supports, tel que l'immersion dans l'eau ou l'utilisation d'un sac antistatique, avant de les manipuler ou de les récupérer. Il est possible que les données de vol et les données sur les performances des moteurs aient été transmises automatiquement aux services d'exploitation ou de maintenance du transporteur aérien par liaison de données ; ces données doivent être mises à la disposition de l'équipe d'enquête.

Jalonnement de l'épave

2.3.5 Lorsque de petits éléments de l'épave sont identifiés, et notamment lorsque des objets sont enlevés du site, l'enquêteur doit placer un jalon visible dans le sol pour en marquer l'emplacement de manière à maintenir l'intégrité du lieu de l'accident pour les activités futures, par exemple, lorsqu'un expert doit retourner plus tard sur le lieu de l'accident pour récupérer une petite pièce endommagée ou trouver un élément lié à un objet déjà retiré du site.

2.3.6 Utiliser des jalons facilement visibles. Les aéroports ont habituellement des réserves de tiges de métal munies de drapeaux marqueurs de différentes couleurs. L'avantage de ces types de jalons est qu'il est possible d'en emporter une grande quantité sur le site de l'accident ; ils sont cependant moins visibles dans les environnements à feuillage dense et donc moins utiles dans ces cas. À l'autre extrême, les équipes d'enquête ont utilisé des piquets de bois allant jusqu'à 5 cm x 5 cm x 1,2 m (2 po x 2 po x 4 ft). Ces piquets sont facilement visibles une fois en place, mais il faut un gros marteau pour les planter fermement en terre. En outre, il est difficile pour un enquêteur d'en emporter un grand nombre en même temps, ce qui l'oblige à se déplacer plusieurs fois, mais cela ne signifie pas que ces piquets ne soient pas utiles dans certains environnements. L'enquêteur doit s'efforcer d'utiliser les jalons qui s'adaptent le mieux au lieu de l'accident et non forcément ceux qui lui sont fournis au départ.

2.3.7 Identifier chaque jalon dès qu'il est mis en place par un numéro unique et noter le numéro et sa signification dans un journal. L'enquêteur désigné peut assembler un journal principal pour permettre le retour à certains endroits ou pour identifier la répartition des débris. Lorsque plusieurs enquêteurs visitent le site et jalonnent les éléments importants, il peut être utile d'attribuer un système de numérotation à chaque enquêteur. Par exemple, un enquêteur peut utiliser les numéros 1-99, un autre les numéros 100-199 et ainsi de suite de manière à ne jamais attribuer le même numéro à deux jalons et à pouvoir établir une carte principale de la répartition des débris. Il faut prendre soin de protéger l'identification du jalon pour ne pas perdre les renseignements qu'il contient. Écrire le numéro et l'identification de l'objet sur une étiquette à l'épreuve des intempéries. Remettre un marqueur indélébile à chaque membre de l'équipe d'enquête pour inscrire le numéro d'identification et la description de l'objet des deux côtés du jalon. Ces marqueurs doivent permettre de conserver les renseignements pendant tout le temps requis par l'équipe d'enquête.

2.3.8 Comme il est indiqué plus haut, les jalons doivent être placés pour permettre de repérer de petits éléments qui seront enlevés plus tard et pour marquer l'emplacement de chaque objet qui a été enlevé du site pour examen. Les jalons doivent aussi être placés aux endroits où sont trouvés des corps humains qui sont enlevés du site. Dans tous les cas, une photo montrant le jalon et l'objet ensemble peut se révéler utile plus tard. Les marques importantes au sol peuvent aussi être jalonnées. Si la marque au sol est longue, il peut être utile de planter un jalon à chaque extrémité ; si elle présente une courbe ou une configuration particulière, il peut être nécessaire de placer plusieurs jalons pour pouvoir reproduire la marque une fois que le sol aura été modifié ou recouvert par le vent, les précipitations ou le mouvement de l'équipement. Il faut aussi prévoir une manière de jalonner les objets situés dans les marécages ou d'épaisses broussailles où les piquets et les étiquettes normales ne seront pas visibles.

Localisation au GPS

2.3.9 La plus grande disponibilité et précision des récepteurs GPS facilite la tâche des enquêteurs sur le lieu de l'accident. Avant l'emploi de ces dispositifs, une équipe d'arpentage devait se rendre sur le lieu de l'accident et déterminer la position des débris/jalons pour les enquêteurs ; l'équipe d'enquête peut maintenant combiner l'identification initiale des débris de l'épave et le jalonnement avec l'introduction de leur position dans une base de données du système GPS. Il suffit ensuite pour établir la carte finale (voir le § 2.3.4) de combiner les emplacements des différents relevés GPS effectués durant l'enquête.

2.3.10 La précision des récepteurs GPS varie avec la technologie utilisée. Les récepteurs GPS militaires peuvent établir les positions à quelques centimètres ou pouces près. Les récepteurs portables disponibles sur le marché peuvent déterminer la position avec une précision de 3 à 5 m (10 à 15 ft). À noter cependant que même si la précision absolue des positions des points relevés n'est que de 5 m (15 ft), les points sont fixes et leurs positions relatives ne changent pas. Il faut veiller à ce que toutes les cartes, les récepteurs GPS et les positions relevées utilisent les mêmes bases de données de levés géodésiques et leurs versions les plus récentes afin d'éliminer ou de réduire au minimum les erreurs et toute confusion qui pourraient être causées par différentes sources de données ou de références.

2.3.11 Vu que les satellites de référence peuvent être différents ou occuper des positions légèrement différentes lorsque les positions sont relevées, il est important de déterminer toutes les positions au même moment et avec le même récepteur GPS. Si la position géographique établie auparavant n'est pas disponible (documentée), l'enquêteur doit placer un jalon à cet effet.

2.3.12 Les modèles de récepteurs GPS sont nombreux, et il est donc peu utile de donner des instructions précises dans le présent manuel, mais ils ont des points communs. Certains récepteurs possèdent des fonctions de terrain qui peuvent se révéler particulièrement utiles dans des conditions défavorables ou sur les lieux d'accidents où les débris sont dispersés sur une grande superficie. La plupart des récepteurs permettent d'entrer les positions dans la base de données du récepteur GPS sous forme de « points de cheminement » numérotés. Un grand nombre d'entre eux les numérotent automatiquement en séquence, éliminant le processus laborieux d'entrée manuelle. Certains récepteurs permettent d'entrer des termes descriptifs courts, mais cette fonction ne devrait être employée que lorsqu'elle permet de fournir des renseignements utiles qui ne peuvent pas être reproduits plus tard.

2.3.13 Le nombre de points de cheminement disponibles varie, mais il est probable que le nombre de points requis durant l'examen sur le terrain sera supérieur à celui que peut stocker un seul GPS. Il faudra donc télécharger les points sur un ordinateur tous les jours (ou lorsque la mémoire est pleine) et les placer dans un fichier séparé. Les points de cheminement peuvent ainsi être effacés du récepteur avant le prochain examen sur le terrain, donnant de nouveau accès à tous les points disponibles.

Schéma de répartition de l'épave

2.3.14 Après l'examen initial de l'ensemble du lieu de l'accident et la prise de photos, la première étape de l'enquête proprement dite consiste généralement à déterminer la répartition de l'épave. Il s'agit de mesurer les distances et les relèvements de l'épave principale ainsi que les éléments dispersés de l'épave, y compris le contenu de l'aéronef, les survivants et les victimes, les marques d'impact et les traces au sol, et de porter ces renseignements sur un schéma à une échelle appropriée.

2.3.15 L'enquêteur devrait pouvoir faire le tracé du schéma de répartition de l'épave dans de nombreux cas d'accidents, mais si aucun relevé GPS n'a été effectué, il faudrait envisager de faire appel à un géomètre qualifié lorsque les circonstances de l'accident sont telles que les débris de l'épave sont extrêmement dispersés.

2.3.16 Le tracé du schéma de répartition de l'épave doit être exécuté avec le plus grand soin afin qu'il soit complet et exact, car l'analyse du schéma peut révéler des types ou des successions de ruptures possibles et la bonne interprétation de constatations ultérieures peut souvent dépendre d'une consultation du schéma initial. Ce schéma ne sert pas seulement de document de référence durant toute l'enquête, mais il constitue un élément extrêmement important du dossier de l'enquêteur pour compléter le rapport écrit.

2.3.17 L'enquêteur doit se fonder sur les circonstances de l'accident pour déterminer la nature et le nombre de renseignements qui doivent figurer sur le schéma d'un accident donné, mais dans la plupart des cas, le schéma doit indiquer les points où se trouvent tous les ensembles principaux de l'épave, les pièces, les accessoires et le fret, ainsi que les endroits où ont été trouvés les victimes et les survivants et, si elle est disponible, leur identité. Les marques d'impact initial et autres traces au sol doivent aussi figurer sur le schéma et il convient d'indiquer de manière appropriée la pièce ou l'élément de l'aéronef qui a fait la marque. Lorsque les caractéristiques du terrain semblent avoir joué un rôle dans l'accident ou eu une incidence sur la nature ou l'ampleur des dommages structurels, elles doivent aussi être notées sur le schéma de répartition de l'épave. Les dimensions pertinentes, les notes descriptives et les endroits d'où ont été prises les photos parachèvent le schéma.

2.3.18 Plusieurs méthodes peuvent être employées pour tracer le schéma de répartition de l'épave. Voici deux méthodes simples :

- a) lorsque les éléments de l'épave sont concentrés sur une petite superficie, les distances et les relèvements (magnétiques) peuvent être mesurés depuis un point central de l'épave. L'emplacement des éléments peut être indiqué sur un diagramme polaire (voir l'Appendice 2 au Chapitre 2) ;
- b) lorsque l'épave est dispersée, on peut tracer une ligne de référence qui suit généralement la trace laissée par l'épave principale, selon la topographie ; mesurer les distances le long de cette ligne à partir du point de référence, puis perpendiculairement à la ligne de référence jusqu'aux éléments dispersés de l'épave. Ces renseignements peuvent ensuite être utilisés pour établir un schéma en utilisant une échelle appropriée. L'emploi de papier quadrillé peut être utile pour tracer des diagrammes simples (voir l'Appendice 2 au Chapitre 2).

2.3.19 Lorsque l'épave est morcelée en de nombreux éléments, la présentation du schéma peut être simplifiée en utilisant une lettre ou un chiffre pour chaque élément et en joignant une légende au schéma (voir l'Appendice 2 au Chapitre 2).

2.4 EXAMEN DES MARQUES D'IMPACT ET DES DÉBRIS

2.4.1 Il faut d'abord repérer les marques du premier impact de l'aéronef avec le sol. D'après ces marques et la répartition de l'épave, il est généralement possible de déterminer quelle partie de l'aéronef a heurté le sol en premier. On peut déduire la trajectoire de l'aéronef en examinant attentivement les traces sur le sol ou les marques laissées sur les arbres, les buissons, les rochers, les poteaux, les lignes de transport d'électricité, les bâtiments, etc. Les extrémités d'aile, les hélices et le train d'atterrissage laissent des marques visibles ou des parties arrachées aux points d'impact avec des objets fixes. Les traces sur le sol et à la hauteur des arbres ou des buissons cassés aideront à déterminer l'angle de descente et l'assiette de l'aéronef au moment de heurter le sol. L'examen des victimes de l'accident et du contenu de l'aéronef peut aussi aider à établir l'angle, l'assiette et la vitesse au moment de l'impact. Les déformations et le télescopage de la cellule permettront à l'enquêteur de déduire si l'aéronef s'est écrasé à grande ou à basse vitesse. Si la vitesse à l'impact est faible, l'aéronef ne subit que des dommages localisés, mais si la vitesse est grande, la voilure et l'empennage sont tordus et écrasés vers l'avant. Il y a eu des cas où l'aéronef a été complètement enseveli dans un cratère profond ; seuls quelques débris tordus étaient dispersés près du lieu d'impact. De courts sillons rectilignes de part et d'autre du cratère marquaient les bords d'attaque des ailes lorsque l'aéronef s'est écrasé presque à la verticale et à très grande vitesse. Si les moteurs ne sont pas profondément enfoncés dans le sol, c'est que la vitesse verticale de

descente était probablement faible ; si l'aéronef volait à très grande vitesse sous un faible angle de descente les débris de l'épave seront dispersés sur une grande distance le long d'une ligne ayant pour origine la trace du premier impact. Si les débris sont très dispersés le long de la trajectoire de vol, on peut présumer que la cellule s'est désintégrée avant l'impact. Il est en général possible de se représenter mentalement :

- a) la direction, l'angle et la vitesse de descente ;
- b) s'il y a eu ou non perte de contrôle pendant la descente ;
- c) si les moteurs fonctionnaient au moment de l'impact ;
- d) si la cellule de l'aéronef était intacte au moment du premier impact.

2.4.2 L'ampleur des dommages subis par l'aéronef accidenté donne une idée préliminaire des indices qu'il sera possible de tirer d'un examen approfondi de l'épave. Si on soupçonne une désintégration en vol, il est essentiel de planifier l'enquête pour faire en sorte que tous les indices qui pourraient aider à remonter jusqu'à la rupture originale soient tirés de l'épave avant qu'elle ne soit enlevée. Dans ces cas, les débris de l'aéronef sont souvent dispersés sur plusieurs kilomètres de boisé, de champs, de marais ou d'agglomérations et il peut être difficile de les localiser. Les équipes de recherche doivent ratisser la zone et la recherche doit se poursuivre jusqu'à ce que tous les éléments importants soient retrouvés. Il convient de faire appel au personnel militaire, à la police, aux écoliers et à la population locale en leur spécifiant qu'il est indispensable de signaler la position des débris sans les déplacer afin que l'enquêteur puisse les examiner et déterminer quelle était leur position exacte au moment de la chute. Les débris légers de faible densité ont tendance à dériver dans la direction du vent dominant au moment de l'accident tandis que les objets denses seront moins soumis à l'action du vent ; la connaissance de la direction du vent peut aider à les localiser plus rapidement. Avant de déplacer ou d'enlever un élément de l'épave, il faut :

- a) noter sa position ;
- b) peindre un numéro d'identification sur une partie non endommagée de l'élément, ou dans le cas d'éléments de petites dimensions, y fixer une étiquette ;
- c) noter la façon dont cet élément a heurté le sol et la nature du sol, et s'il a heurté des arbres ou des bâtiments, etc. avant d'atteindre le sol.

2.4.3 Ces notes, accompagnées de photos, seront fort utiles lors de l'examen détaillé qui se fera plus tard ; elles permettent parfois de distinguer les dommages causés par l'impact au sol des autres dommages. Toute pièce manquante doit faire l'objet d'une recherche spéciale et tout élément qui n'a pu être retrouvé doit être signalé dans le rapport.

2.4.4 Dans le cas d'accidents qui se produisent à l'atterrissage train sorti, il faut examiner et noter soigneusement les traces laissées par les pneus, noter la largeur de l'empreinte de chaque roue et la densité de la couleur des marques. Les marques de pneus peuvent fournir des indices de freinage, de dérapage ou de glissade et, en particulier, fournir un indice d'aquaplanage. Dans le cas de l'aquaplanage, le pneu peut laisser sur la piste une marque blanchâtre, très caractéristique, produite par les forces qui agissent sous le pneu durant l'aquaplanage.

2.4.5 Il ne faut jamais oublier que les victimes d'un accident d'aviation, si elles font l'objet du même examen objectif que l'aéronef, révèlent des renseignements importants sur la vitesse de l'aéronef, son assiette au moment de l'impact, l'ordre des ruptures, etc. Ce point est examiné plus en détail dans l'enquête sur les facteurs humains.

Appendice 1 au Chapitre 2

Liste de photographie pour les enquêteurs

Cette liste peut être utilisée sur le lieu de l'accident. Elle indique ce qu'il convient de photographier au début d'une enquête, avant que la scène ne soit perturbée. Les indices relevés au fur et à mesure du déroulement de l'enquête détermineront s'il est nécessaire de prendre d'autres photos.

Immédiatement après l'accident :

1. Opérations de lutte contre l'incendie (vidéo)
2. Opérations de sauvetage (vidéo)
3. Radar et ATC (enregistrements)
4. Conditions météorologiques (conditions prévues et réelles)

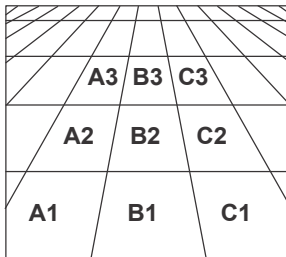
Dès que commence l'enquête :

1. Vue aérienne du site (vidéo)
2. Vue du site depuis chacun des points cardinaux de la boussole
3. Vue du site prise dans la direction dans laquelle volait l'aéronef au moment de l'impact
4. Marques au sol
5. Dommages aux arbres et au feuillage
6. Marques de dérapage
7. Inventaire photo des principaux éléments de l'épave
8. Gouvernes et actionneurs
9. Train d'atterrissage et autres composants hydrauliques
10. Positions des commutateurs dans le poste de pilotage
11. Dommages et décolorations causés par le feu ou la chaleur
12. Restes humains, blessures, traces de sang ou de tissus sur les éléments de l'épave
13. Éléments supplémentaires ou éléments voisins d'éléments non trouvés
14. Gros plan des faciès de rupture
15. Gros plan des composants mal installés
16. Gros plan de tout autre élément soupçonné d'avoir contribué à l'accident
17. Dommages causés à la propriété privée
18. Étapes de l'enlèvement, de l'ouverture ou du découpage des éléments
19. Toute autre photo estimée nécessaire

— — — — —

Appendice 2 au Chapitre 2

Méthodes d'établissement des schémas de répartition de l'épave



Grille

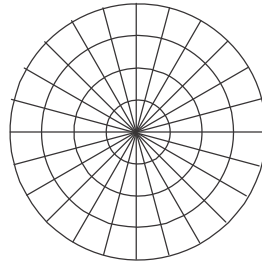
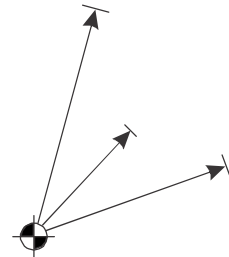
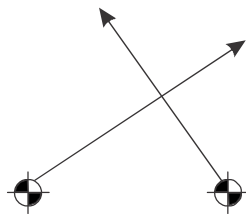


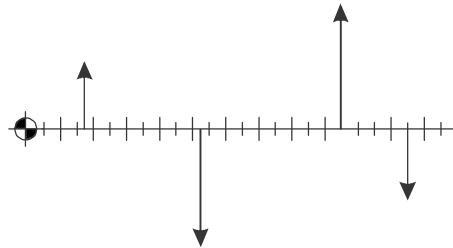
Diagramme polaire



Un point de repère



Deux points de repère



Ligne de référence

Éléments à inclure dans le schéma en plus de la position des différentes parties de l'aéronef, des caractéristiques de surface et des marques de référence :

- | | |
|--|---|
| a) le nord magnétique ; | i) l'emplacement des témoins ; |
| b) l'échelle ; | j) la direction et la vitesse du vent dominant ; |
| c) la trajectoire de vol ; | k) la direction du soleil et la hauteur ; |
| d) le point d'impact initial ; | l) l'emplacement des aides de navigation ou des aéroports ; |
| e) l'emplacement des principaux composants ; | m) la date et l'heure de l'accident ; |
| f) l'axe de dispersion de l'épave ; | n) le point de contact de la personne qui établit le schéma ; |
| g) l'emplacement des membres d'équipage et des passagers ; | o) le type et l'immatriculation de l'aéronef ; |
| h) le profil de propagation de l'incendie ; | p) la norme géodésique (par ex. WGS-84). |

Chapitre 3

ENQUÊTE ORGANISATIONNELLE

3.1 GÉNÉRALITÉS

3.1.1 On a constaté il y a longtemps que les défaillances des systèmes ou les problèmes de sécurité pouvaient dénoter des problèmes organisationnels. Il est devenu de plus en plus évident au cours des dernières années que les enquêtes sur les accidents d'aviation devaient tenir compte de questions organisationnelles telles que les systèmes de gestion et la culture d'entreprise.

3.1.2 L'enquête organisationnelle vise à mettre au jour les caractéristiques de l'organisation qui, même si elles sont éloignées des circonstances immédiates de l'accident, augmentent la probabilité que l'accident se produise. Si elles ne sont pas corrigées, ces conditions préexistantes, ou latentes, pourraient causer d'autres accidents.

3.2 LE MODÈLE DE REASON ET L'ENQUÊTE ORGANISATIONNELLE

3.2.1 Les accidents résultent de la conjonction d'un certain nombre de facteurs, chacun d'eux important mais non suffisant à lui seul pour compromettre l'efficacité des défenses du système. Les défaillances majeures d'équipement, ou les erreurs du personnel d'exploitation, peuvent rarement à elles seules ouvrir des brèches dans les défenses de sécurité. Ces ruptures sont souvent la conséquence de défaillances humaines dans la prise de décisions. Il peut s'agir de défaillances actives au niveau opérationnel ou de conditions latentes qui contribuent à briser les défenses de sécurité intrinsèques du système. La plupart des accidents comportent à la fois des défaillances actives et des défaillances latentes.

3.2.2 La Figure III-3-1 montre un modèle de causalité d'accidents qui aide à comprendre les interactions des facteurs organisationnels et des facteurs de gestion (c'est-à-dire des facteurs systémiques). Diverses défenses ont été intégrées dans le système d'aviation pour assurer une protection contre des performances inappropriées ou de mauvaises décisions à tous les niveaux du système : personnel de première ligne, différents niveaux de supervision et cadres supérieurs. Ce modèle montre que les facteurs organisationnels, notamment les décisions de gestion, peuvent créer des conditions de défaillance latente qui pourraient mener à un accident, mais qu'ils contribuent aussi aux défenses du système.

3.2.3 Les erreurs ou les violations qui ont un effet préjudiciable immédiat peuvent être considérées comme des actions dangereuses : elles sont généralement associées au personnel de première ligne (pilotes, contrôleurs, mécaniciens, etc.). Ces actions dangereuses peuvent pénétrer les défenses mises en place pour protéger le système d'aviation par la direction de l'entreprise, les autorités de réglementation, etc., et aboutir à un accident. Elles peuvent être le résultat d'erreurs normales ou de violations délibérées des procédures et des pratiques prescrites. Le modèle tient compte du fait qu'il existe, dans le milieu de travail, de nombreuses conditions qui provoquent des erreurs ou des violations susceptibles d'avoir une incidence sur le comportement des personnes ou des équipes.

3.2.4 Ces actions dangereuses sont accomplies dans un contexte opérationnel qui comporte des conditions dangereuses latentes. Une condition latente est le résultat d'une mesure ou d'une décision prise bien avant l'accident. Ses conséquences peuvent prendre beaucoup de temps à se manifester. Prises séparément, ces conditions latentes peuvent sembler inoffensives puisqu'elles ne sont pas perçues comme des carences systémiques.

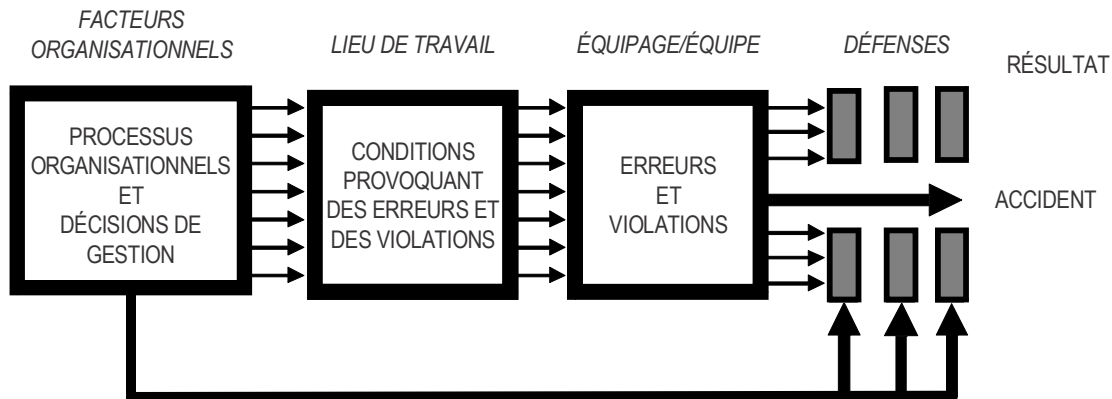


Figure III-3-1. Modèle de causalité des accidents
(Adapté du modèle de James Reason)

3.2.5 Les conditions dangereuses latentes peuvent ne devenir évidentes que lorsque les défenses du système sont percées. Elles peuvent être présentes dans le système bien avant l'accident et sont habituellement créées par des décideurs, des réglementeurs ou d'autres personnes très éloignées de l'accident, tant dans le temps que dans l'espace. Le personnel d'exploitation de première ligne peut hériter de défauts du système, comme ceux qui découlent d'une mauvaise conception de l'équipement ou des tâches, d'objectifs conflictuels (par ex., ponctualité du service au détriment de la sécurité), d'organisations défectueuses (par ex., mauvaises communications internes) ou de mauvaises décisions de gestion (par ex., report d'une tâche de maintenance). La gestion efficace de la sécurité vise à identifier et atténuer ces conditions dangereuses latentes à l'échelle du système plutôt qu'à déployer des efforts localisés pour réduire au minimum les actes dangereux posés par des individus. Ces actes dangereux peuvent n'être que les symptômes, et non les causes, de problèmes de sécurité.

3.2.6 La plupart des conditions dangereuses commencent par les décideurs, même dans les organisations les mieux gérées. Ces décideurs sont sujets aux partis pris et aux limites humaines normales aussi bien qu'à des contraintes très réelles de temps, de budgets, de politiques, etc. Puisque certaines de ces décisions dangereuses ne peuvent être évitées, il faut prendre des dispositions pour les détecter et en réduire les conséquences néfastes.

3.2.7 Des décisions faillibles prises par les cadres hiérarchiques peuvent prendre la forme de procédures inadéquates, d'une programmation peu judicieuse des horaires ou de négligence à l'égard de dangers manifestes. Elles peuvent conduire à des connaissances ou des compétences insuffisantes ou à des procédures d'exploitation inappropriées. La manière dont les cadres hiérarchiques et l'ensemble de l'organisation exercent leurs fonctions détermine les conditions qui produisent les erreurs ou les violations. Par exemple, dans quelle mesure la direction arrive-t-elle à fixer des objectifs réalisables, à organiser les tâches et les ressources, à gérer les affaires quotidiennes, à communiquer à l'interne et à l'externe, etc. ? Les décisions faillibles prises par la direction des entreprises et les autorités de réglementation sont trop souvent la conséquence d'un manque de ressources, mais éviter les coûts du renforcement de la sécurité du système peut se traduire par des accidents tellement coûteux qu'ils peuvent entraîner la faillite de l'exploitant.

3.2.8 Pour une analyse complète du modèle de Reason, voir la Circulaire 247, *Les facteurs humains, la gestion et l'organisation*.

3.3 MODÈLE D'ENQUÊTE ORGANISATIONNELLE

3.3.1 L'enquête organisationnelle vise à déterminer l'incidence des mesures et des décisions de gestion sur les opérations, la maintenance et les activités de soutien. Elle établit les influences qui étaient présentes avant un accident. Les facteurs directement influencés par les décisions de gestion et les liens entre eux sont essentiels pour découvrir les facteurs systémiques qui ont conduit à la suite d'événements aboutissant à l'accident ou, du moins, qui ont empêché l'application de défenses adéquates. La Figure III-3-2 montre ces facteurs.

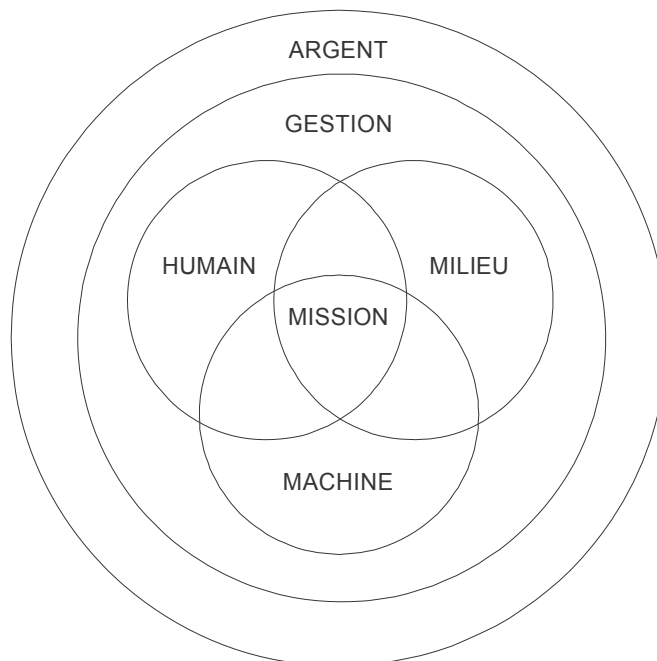


Figure III-3-2. Modèle d'enquête organisationnelle

Formulation de la mission

3.3.2 Au cœur de ce modèle se trouvent trois facteurs (l'humain, la machine et le milieu) qui, ensemble, forment la base de l'exploitation de l'aéronef (la mission). L'enquête sur chacun de ces facteurs est simple et elle est traitée dans d'autres sections du présent manuel, mais l'influence de l'organisation sur ces facteurs doit être examinée séparément :

- a) *L'humain*. Si le vol accidenté n'a pas été directement effectué par le propriétaire ou par l'exploitant, un processus organisationnel est intervenu dans le choix et l'adoption de la méthode employée par la personne qui a réalisé les actions en cause. La « personne » ne désigne pas seulement le pilote ou les membres d'équipage. Ce terme s'applique aussi bien à un membre du personnel de maintenance, du centre de coordination des vols, de la circulation aérienne, du personnel de conception ou à tout autre personnel participant aux opérations de l'aéronef, y compris la supervision gouvernementale.

Dans le cadre de ce concept, les politiques organisationnelles relatives à l'emploi, à la programmation des horaires, à la préparation des activités de la personne, à la supervision de ces activités et aux procédures de discipline doivent être examinées de très près. Par exemple, même s'il incombe

directement au membre d'équipage de se reposer suffisamment avant le vol, l'organisation de la gestion peut ne pas prévoir des politiques efficaces pour protéger les périodes de repos et peut en fait interrompre ces périodes sans tenir compte de la fatigue qui peut en résulter. Dans ce cas, on peut considérer que l'influence de l'organisation contribue à l'ensemble du résultat.

- b) *La machine.* Ce facteur désigne normalement l'aéronef, mais il inclut tout équipement de soutien de l'aéronef employé durant la maintenance et la préparation prévol. Il peut aussi inclure l'équipement utilisé dans l'environnement postaccident. L'enquête directe sur l'adéquation de l'équipement est simple, l'enquête organisationnelle, elle, vise à déterminer comment l'organisation a fourni l'équipement, comment se fait la maintenance de l'équipement et comment les personnes sont formées à l'utilisation de cet équipement. Le choix d'un équipement particulier est une décision organisationnelle. Par exemple, si l'équipement est une solution de rechange parce que l'organisation n'a pas fourni le bon équipement, l'influence organisationnelle a une incidence directe.
- c) *Le milieu.* Ce facteur désigne les conditions dans lesquelles se déroulent les autres actions. Il comprend les conditions météorologiques au moment où les actions ont été exécutées et la période de la journée où elles ont été exécutées, c'est-à-dire à la lumière du jour ou pendant les périodes d'obscurité. Il peut aussi comprendre les conditions en vol, c'est-à-dire les conditions météorologiques de vol à vue ou les conditions de vol aux instruments.

3.3.3 Les interfaces entre ces facteurs sont aussi cruciales que les éléments eux-mêmes. Elles constituent souvent des obstacles à l'échange d'informations ou à une supervision coordonnée de la gestion.

- a) *Interface humain-machine.* Ce point désigne toute mesure organisationnelle qui combine un équipement et une personne qui est de quelque façon incompatible avec cet équipement. Dans un aéronef, la conception du poste de pilotage ne peut pas tenir compte des personnes de toutes les tailles. Les concepteurs utilisent certaines normes pour permettre à la plupart des personnes d'avoir accès aux commandes et d'utiliser pleinement l'équipement. Si une personne est trop corpulente ou trop petite, n'est pas assez forte ou est limitée de quelque façon que ce soit, l'organisation doit tenir compte de ces limites au moment de choisir la personne ou l'équipement.
- b) *Interface humain-milieu.* Les activités qui entourent l'accident doivent être examinées à la lumière de la manière dont la personne a dû faire face à l'environnement. Par exemple, si la tâche de maintenance sous enquête s'est déroulée durant le jour, elle a pu être exécutée en plein soleil, dans la chasse-poussière ou lors de précipitations ; si l'organisation n'a pas pris de mesures pour réduire les risques d'erreurs dans ces conditions, elle devient alors un facteur contributif.
- c) *Interface machine-milieu.* La capacité de l'équipement de fonctionner efficacement dans le milieu est un élément essentiel de la décision de l'organisation d'utiliser cet équipement. Il serait imprudent, par exemple, d'utiliser un avion sur un aéroport dont la seule piste disponible est inférieure à la longueur minimale certifiée requise. Si l'organisation ne tient pas compte des limites des conditions environnementales prévues, leur contribution à l'accident est alors importante.

3.3.4 Ensemble, ces facteurs constituent la mission, c'est-à-dire l'activité dans laquelle était engagé l'aéronef au moment de l'accident. L'organisation est responsable de l'affectation des personnes et des machines et de la réalisation des activités prévues dans le milieu existant. L'acceptation des risques que cela comporte fait intervenir les influences organisationnelles dans l'analyse des accidents. La mission peut simplement être un vol du point A au point B, mais le choix de l'heure, de la route et des conditions pour réduire les risques prévus crée les conditions qui mènent finalement à l'accident. Si la tâche assignée à l'équipage de l'aéronef dépasse l'expérience des personnes concernées, c'est la structure organisationnelle qui doit mettre en place les défenses appropriées pour éviter les risques inutiles.

Direction et gestion

3.3.5 La direction de l'organisation gère les éléments qui constituent les facteurs de base. Elle comprend tous les niveaux de supervision, du plus haut responsable de la direction jusqu'aux superviseurs des personnes directement concernées. Elle englobe tous les facteurs traités plus haut parce les gestionnaires de tous les niveaux prescrivent la politique et les normes de comportement qui créent la culture d'entreprise. Cette culture peut tolérer des écarts par rapport aux règles en place lorsqu'elle doit faire face à une situation défavorable ou une situation qui accroît les risques. Elle peut être ouverte à la communication de ces facteurs, mais l'indécision ou l'ingérence des cadres intermédiaires peuvent faire obstacle. Lorsqu'il constate cette situation, l'enquêteur doit déterminer si le risque associé à la question de la culture a directement ou indirectement contribué à la suite d'événements qui ont mené à l'accident. Si tel est le cas, il faut procéder à un examen pour établir les causes. Dans le cas contraire, il faut envisager d'inclure dans le rapport les procédures qui présentent des carences risquant de mener à un accident.

3.3.6 L'examen des questions de gestion doit aussi porter sur les éléments extérieurs à l'organisation. Les organismes de supervision de l'industrie ou du gouvernement qui délivrent, contrôlent et surveillent les certificats d'exploitation ont souvent une influence sur la manière dont une condition ou un accident latents peuvent se manifester. Ainsi qu'une personne est confrontée à un dilemme créé par l'insistance de la direction d'appliquer des mesures plus risquées, de même toute la direction de l'organisation peut être influencée par un organisme de supervision enthousiaste ou indifférent, au détriment des précautions normales prévues par les règles.

3.3.7 *Procédures.* Les procédures font généralement partie de certains domaines de gestion ou de la supervision des actions des employés vu que la plupart des organisations œuvrant dans le domaine de l'aviation sont tenues par les organismes de réglementation de mettre en place des procédures qui garantissent l'efficacité et la sécurité des opérations et de la maintenance. Les enquêtes sur les opérations et la maintenance doivent tenir compte de ces procédures. L'enquête organisationnelle doit déterminer s'il existe des problèmes systémiques qui pourraient amener les procédures à créer un problème de sécurité, problème qui ne pourrait être évité par les actions d'une seule personne.

- a) Modifications apportées aux spécifications relatives aux opérations aériennes entre États. Les procédures OACI visent à simplifier ces transitions, mais il appartient à chaque État de formuler ses propres règlements opérationnels. Les équipages d'aéronefs qui passent d'un État à un autre peuvent avoir à faire face à des procédures qui vont à l'encontre de leurs propres procédures mais qu'ils doivent respecter tout en se conformant aux directives de leur propre État.
- b) Une organisation peut rationaliser ses opérations en mettant en place des procédures qui « garantissent » la conformité aux règlements et facilitent la gestion du personnel, par exemple, la manière de gérer les périodes de repos des équipages.
- c) Vu que de nombreux réglementeurs exigent que les exploitants publient leurs propres procédures d'utilisation, plus une organisation utilise un équipement longtemps, plus elle publie de procédures et ajoute des étapes pour faciliter le travail dans son propre environnement opérationnel. Une organisation peut par exemple mettre en place des procédures supplémentaires pour combattre la corrosion si un aéronef vole constamment dans un environnement très humide ou, inversement, appliquer des mesures anticorrosion minimales si l'aéronef est exploité dans un environnement très sec. Avec le temps, les manuels et les procédures de l'organisation peuvent être considérablement modifiés par rapport aux procédures publiées à l'origine par le fabricant. L'enquêteur organisationnel doit repérer ce changement graduel des procédures et examiner l'application de procédures modifiées depuis le début (fabricant) jusqu'à la mise en œuvre (exploitant). La normalisation et l'harmonisation de ces documents est un fardeau administratif important dans une grande organisation mais elles doivent être rigoureusement effectuées, surtout s'il n'y a pas de bibliothèque de référence centrale. Autrement, les diverses parties de l'organisation suivent des versions et des révisions différentes des procédures d'utilisation.

- d) Le transfert des renseignements contenus dans les éléments détaillés des manuels et des guides aux listes de vérifications pour le vol et aux fiches de maintenance doit être soigneusement examiné. En copiant des données cruciales, une organisation peut par mégarde omettre ou modifier une action de la liste de vérifications ou de la fiche de travail. Il peut être difficile pour la personne qui utilise l'information d'appliquer correctement la procédure sans l'élément manquant, particulièrement si le rythme d'exécution s'accélère, par exemple, durant une urgence en vol.

Financement

3.3.8 Le terme « financement » désigne l'adéquation des ressources. Avec des ressources suffisantes, les organisations exposent rarement leurs aéronefs, leur personnel ou le public à des risques inutiles. Quand les ressources se font plus rares, les organisations emploient des techniques destinées à tirer le maximum des ressources qui restent afin de poursuivre leurs activités. Même si ces techniques n'augmentent pas les risques de manière évidente, leur application à long terme pour économiser les ressources peut créer une culture de gestion qui permet l'incorporation d'un risque inacceptable sans tenir compte de ses incidences ou d'accepter ce risque comme faisant partie des « procédures normales d'exploitation ».

3.3.9 Les questions suivantes (autres que les ressources financières évidentes) doivent être examinées dans ce contexte.

- a) *Disponibilité des ressources humaines.* Un des points que doit examiner l'enquête lorsqu'il y a un écart par rapport à la pratique acceptée est le nombre d'effectifs disponibles. Il y a eu des cas où même si les membres d'équipage et les mécaniciens avaient les qualifications requises, leur nombre était insuffisant pour appliquer la réglementation en vigueur. Lorsque les ressources humaines sont limitées, le résultat est souvent un compromis dans les qualifications, les périodes de repos des membres d'équipage ou d'autres affectations.
- b) *Qualité des ressources humaines.* Il faut parfois évaluer le niveau d'expérience des divers membres du personnel à la lumière de l'accident. Même si les travailleurs et les superviseurs possèdent individuellement les qualifications requises, leur capacité d'exécuter constamment un travail de qualité dépend d'un ratio approprié entre travailleurs et superviseurs et des niveaux d'expérience de chacun. Une organisation, par exemple, a indiqué que le personnel de maintenance comprenait un certain nombre d'employés, mais l'enquêteur organisationnel a trouvé que, parmi ces employés, le nombre de superviseurs était extrêmement faible tandis que le nombre de stagiaires dépassait le nombre idéal. On peut aussi avoir le cas où le nombre de superviseurs est suffisant, mais où la plupart d'entre eux sont affectés aux quarts de jour alors que la majorité des activités de maintenance se déroulent la nuit avec un minimum de supervision. Le nombre d'employés ne correspond pas nécessairement à la qualité du travail exécuté.
- c) *Acquisition de pièces ou d'autres articles.* Une organisation qui subit la pression d'un manque de ressources peut avoir recours à d'autres moyens pour obtenir les pièces requises. Même si la qualité des pièces est un problème en soi pour l'enquête, l'enquêteur organisationnel cherche à déceler le comportement qui met la sécurité en danger par l'emploi d'autres méthodes. Par exemple, une enquête a révélé qu'une organisation qui avait besoin de pièces pour remettre un aéronef en service a prélevé les pièces requises sur un autre aéronef. Cette pratique ne signifie pas nécessairement un plus grand risque, mais l'aéronef donneur était en train de devenir un « magasin de pièces » qui permettait de retarder l'achat des pièces nécessaires. Les documents de consignment du retrait et de la réinstallation des pièces sont devenus trop difficiles à gérer et la documentation a fini par présenter des lacunes, ce qui a conduit à installer dans l'aéronef accidenté des pièces non consignées dans les fiches de maintenance et à des erreurs d'installation.

3.4 PROBLÈMES ÉVENTUELS DES ENQUÊTES ORGANISATIONNELLES

3.4.1 Plus les facteurs qui ont contribué à l'accident s'éloignent de l'accident dans le temps et dans l'espace, plus l'enquête risque de devenir subjective et plus les possibilités de désaccord entre les parties concernées augmentent, mais ce n'est pas une raison pour éviter les questions organisationnelles et systémiques.

3.4.2 Il ne faut pas oublier que plusieurs organisations peuvent être impliquées dans l'accident, bien qu'à des niveaux différents. Les facteurs organisationnels concernant chacune de ces organisations doivent être examinés séparément.

3.4.3 Il y a, dans la plupart des cultures, une forte tendance à chercher des coupables après un accident et une réticence tout aussi forte à examiner le rôle que des institutions comme les entreprises ou les organisations gouvernementales ont pu jouer dans l'accident. L'enquêteur organisationnel doit résister à ces pressions et trouver une façon de mener une enquête organisationnelle efficace tout en se conformant à la culture nationale.

3.5 MÉTHODOLOGIE

3.5.1 Chaque enquête organisationnelle étant unique, il est impossible de décrire en détail comment mener chaque enquête. La section qui suit explique comment appliquer le modèle de Reason aux enquêtes sur les accidents. Elle présente une liste utile des questions à explorer, liste qui peut aussi aider à rédiger les constatations sous une forme compatible avec des publications telles que la Circulaire 247, *Les facteurs humains, la gestion et l'organisation* et la Circulaire 240, *Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents*.

3.5.2 Le modèle de Reason n'est pas l'unique méthode ou cadre qui peut être employé dans une enquête systémique. D'autres méthodes comme la supervision de la gestion et l'arborescence des risques (MORT), le système d'analyse et de classification des facteurs humains (HFACS) et le cadre de gestion des menaces et des erreurs (TEM) peuvent aussi être utiles ; l'enquêteur organisationnel n'est pas tenu de se limiter à un modèle particulier, mais il est important d'employer un modèle ou un processus systémique pour s'assurer que TOUS les aspects de l'enquête sont examinés, sans préjuger des causes ou des responsabilités à l'origine des carences qui ont mené à l'accident.

Application du modèle de Reason aux enquêtes

3.5.3 L'enquêteur organisationnel compte souvent sur d'autres groupes pour relever les défaillances actives, les facteurs locaux, les défenses qui n'ont pas fonctionné ou l'absence de défenses. Dès qu'il obtient ces renseignements, il est en mesure d'examiner les facteurs organisationnels et systémiques sous-jacents qui ont permis à la situation de se développer.

3.5.4 Les enquêtes majeures peuvent comporter des séances d'information quotidiennes qui permettent à l'enquêteur organisationnel de se tenir au courant des progrès des autres groupes, mais l'enquêteur aura avantage à avoir dans chaque groupe un contact qui lui communique les informations pouvant avoir une incidence sur les questions organisationnelles.

3.5.5 Dans les premières étapes de l'enquête, l'enquêteur organisationnel peut suivre ou passer en revue les entrevues clés menées par d'autres groupes, tels que le Groupe de l'ATC ou le Groupe de l'exploitation, pour s'assurer que les questions organisationnelles ne sont pas négligées durant les entrevues, mais à mesure que progresse l'enquête il lui faudra peut-être procéder à des entrevues portant spécifiquement sur les questions organisationnelles.

3.5.6 En plus d'obtenir les informations fournies par les entrevues et les documents, l'enquêteur organisationnel peut recueillir les renseignements dont il a besoin par le biais de sondages ou de questionnaires structurés.

3.5.7 L'enquêteur organisationnel doit dresser une liste des organisations qui ont pu jouer un rôle dans la création de facteurs locaux ou systémiques. Par exemple, si l'accident s'est produit loin du siège de l'organisation, il est possible qu'il existe un niveau de supervision intermédiaire supplémentaire. Si l'organisation a recours à l'externalisation, pour la maintenance de l'aéronef par exemple, il peut exister des liens contractuels entre plusieurs organisations. Dans ce cas, il faut bien comprendre le lien entre chaque organisation pour détecter les failles dans la supervision de la gestion et les communications. Une fois qu'il comprend la structure de l'organisation, l'enquêteur doit examiner la relation du gouvernement avec ces organisations en ce qui concerne la délivrance et la supervision continue des certificats d'exploitation et de maintenance.

3.5.8 L'enquête peut révéler certaines faiblesses organisationnelles potentielles, mais il est possible qu'elles n'aient joué aucun rôle dans le développement de l'accident. Si ces faiblesses ne peuvent pas être rattachées aux défaillances actives, aux facteurs locaux ou aux défenses du scénario de l'accident, l'enquêteur organisationnel ne doit pas les inclure dans les facteurs ayant contribué à l'accident. Ces constatations doivent cependant figurer dans le compte rendu de l'accident et, s'il y a lieu, faire l'objet d'une recommandation de sécurité. Ces constatations pourraient figurer sous la rubrique « informations supplémentaires » du compte rendu.

Problèmes locaux et systémiques

3.5.9 Les paragraphes qui suivent donnent une liste des domaines qui peuvent présenter des problèmes ainsi qu'une série de questions qui peuvent guider l'enquêteur organisationnel dans son enquête. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres domaines peuvent être examinés dans le cadre de l'enquête.

Objectifs organisationnels

3.5.10 La plupart des organisations ont des objectifs qui entrent parfois en conflit, comme la nécessité d'être ponctuel et celle d'économiser le carburant. La manière dont l'organisation traite le conflit et équilibre ses objectifs peut avoir une incidence sur l'événement.

Les objectifs de l'organisation sont-ils formellement énoncés ?

Quelles sont les performances auxquelles s'attendent les propriétaires, les actionnaires ou le gouvernement ?

L'organisation possède-t-elle une politique de qualité ?

L'organisation possède-t-elle une politique de sécurité ?

Structure organisationnelle

3.5.11 Ce domaine comprend les facteurs liés à la structure et aux systèmes de l'organisation.

Les problèmes découlent-ils de la structure de l'organisation ?

Les responsabilités de la direction sont-elles clairement définies ?

Quelles actions des cadres et des autres membres du personnel sont récompensées ?

Quelles actions des cadres et des autres membres du personnel sont sanctionnées ?

Communications

- 3.5.12 La probabilité de l'accident aurait-elle été moindre si les communications internes avaient été meilleures ?
- Les stations locales communiquent-elles avec le siège ?
- Les cadres supérieurs sont-ils conscients des réalités opérationnelles ?

Planification

- 3.5.13 L'organisation fonde-t-elle ses activités sur le court terme ?
- L'organisation éprouve-t-elle des difficultés à prévoir les événements ?

Contrôle et surveillance

- 3.5.14 L'organisation a-t-elle mis en place des systèmes appropriés pour informer la direction des indicateurs clés de performance ?
- L'organisation possède-t-elle une politique ou un programme d'identification des dangers et de gestion des risques ?

Conception des systèmes et des composants

3.5.15 Les facteurs de conception sont considérés comme des facteurs systémiques parce que la conception des systèmes et des composants est normalement une activité éloignée de l'utilisation quotidienne des systèmes. Il est possible en fait que certains systèmes n'aient pas été « conçus », mais qu'ils se soient développés progressivement avec le temps. Les systèmes complexes au point où leur fonctionnement n'est pas compris des opérateurs (systèmes opaques) peuvent être particulièrement problématiques.

Les concepteurs ont-ils été informés de l'adéquation de leur conception ?

Y a-t-il eu des occasions de modifier la conception ?

Les opérateurs comprennent-ils les systèmes qu'ils utilisent ?

Si des systèmes techniques complexes sont en cause, y a-t-il une personne qui ait une compréhension générale du fonctionnement du système ?

Mémoire institutionnelle

- 3.5.16 Y a-t-il eu des fusions ou des acquisitions ?

La mémoire de l'organisation est-elle bien préservée ?

Y a-t-il dans le « folklore » de l'organisation des événements qui ont encore une incidence sur le fonctionnement de l'organisation ?

Procédures

- 3.5.17 Existe-t-il un conflit entre les règles non officielles et les procédures officielles ?

L'organisation serait-elle incapable de fonctionner si les procédures étaient rigoureusement appliquées ?

Y a-t-il des consignes ou des instructions locales qui entrent en conflit avec les consignes ou les instructions de l'organisation ?

Ressources

3.5.18 L'organisation possède-t-elle les ressources nécessaires pour recruter et former le personnel, assurer la maintenance de l'équipement et l'utiliser de manière responsable ?

L'organisation a-t-elle fait l'objet d'une restructuration importante ou a-t-elle récemment entrepris une restructuration qui a eu pour effet de réaffecter les ressources ailleurs dans l'organisation ?

Réglementation

3.5.19 À quelle fréquence l'organisme de réglementation visite-t-il l'organisation ?

L'organisme de réglementation est-il capable de faire appliquer la réglementation ?

Le réglementeur dispose-t-il d'une gamme de mesures (par exemple, des sanctions) pour encourager la conformité ?

Le réglementeur exige-t-il que l'organisation ait un système de gestion de la sécurité et en assure-t-il la supervision ?

Adaptation aux nouvelles technologies

3.5.20 L'organisation a-t-elle réagi de manière appropriée aux nouvelles technologies ?

Culture de l'organisation

3.5.21 L'organisation tolère-t-elle la prise de risques ?

La sécurité est-elle un objectif important pour l'organisation ?

L'organisation a-t-elle souvent eu à corriger des problèmes par le passé ?

L'organisation a-t-elle l'habitude d'éluder ou de dissimuler les problèmes ?

Gestion de la sécurité

3.5.22 L'organisation possède-t-elle un programme de gestion de la sécurité ?

L'organisation possède-t-elle un programme d'assurance de la qualité ?

Y a-t-il un service de la sécurité ? Si oui, de qui relève-t-il ?

L'organisation a-t-elle récemment fait l'objet d'un audit ?

Y a-t-il eu une analyse officielle des dangers de l'opération ?

3.6 CONSIDÉRATIONS FINALES

3.6.1 Pour être efficaces, les enquêtes doivent tenir compte du rôle des facteurs organisationnels, mais il est probable que l'enquête sur ces facteurs s'appuiera lourdement sur un jugement subjectif.

3.6.2 Une des considérations subjectives les plus importantes dans une enquête est de savoir quand s'arrêter. Les facteurs qui ont contribué à l'accident peuvent être très éloignés dans le temps et dans l'espace de l'accident lui-même et il peut être difficile de déterminer les limites de l'enquête organisationnelle. Cette décision dépend du cadre juridique dans lequel le service d'enquête exerce son activité. La règle générale qu'il peut être utile d'appliquer dans ces cas est que lorsque l'enquêteur organisationnel commence à arriver à des circonstances qui échappent au contrôle des dirigeants de l'organisation, l'enquête a dépassé les limites raisonnables.

Chapitre 4

ENQUÊTE SUR L'EXPLOITATION

4.1 GÉNÉRALITÉS

4.1.1 L'enquête sur l'exploitation a pour objet de rechercher et de signaler tous les faits relatifs au déroulement du vol et à l'activité de l'équipage de conduite avant, pendant et après le vol au cours duquel s'est produit l'accident.

4.1.2 L'enquête doit porter non seulement sur l'équipage de conduite, mais aussi sur le personnel participant directement aux opérations de l'aéronef. Il convient d'examiner le rôle des personnes comme les agents techniques d'exploitation, qui interviennent dans la planification et l'exécution du vol. Les paragraphes qui suivent sont axés sur l'équipage de conduite, mais la même enquête doit être menée auprès du personnel qui a joué un rôle dans le vol, même si ce point n'est pas traité en détail dans la présente section.

4.1.3 Les principaux éléments de l'enquête sur l'exploitation sont les suivants :

Antécédents de l'équipage

Qualifications/compétence de l'équipage

Temps de vol, périodes de service de vol et périodes de repos de l'équipage

Gestion des tâches, gestion des ressources en équipe (CRM)

Équipement personnel

Établissement du plan de vol

Poids et centrage

Cartes aéronautiques et bases de données de navigation

Directives d'exploitation

Entrevues avec les témoins

Détermination de la trajectoire de vol finale

Déroulement du vol

4.1.4 Il y a un lien étroit entre l'enquête sur l'exploitation et les autres phases de l'enquête ; ainsi, la trajectoire de l'aéronef reconstituée d'après les renseignements fournis par le contrôle de la circulation aérienne et d'après les déclarations des témoins doit être comparée à la trajectoire indiquée par les données de l'enregistreur de bord. Lorsqu'elle est possible, une comparaison de ce genre constitue l'un des principes fondamentaux d'une enquête convenablement menée, c'est-à-dire vérifier la valeur des renseignements provenant d'une source en les comparant aux renseignements sur le même point tirés d'une autre source. En ce qui concerne certains des domaines énumérés ci-dessus (trajectoire, performances, caractéristiques de manœuvrabilité), les essais en vol sont souvent très utiles pour

éclaircir ou confirmer certains points de détail, non seulement sur des sujets qui intéressent directement le Groupe de l'exploitation, mais aussi sur des sujets liés aux charges exercées sur la structure, au fonctionnement des systèmes, aux moteurs, etc.

4.1.5 Certains sujets concernant directement l'enquête sur l'exploitation sont traités séparément dans le présent manuel : les conditions météorologiques, les services de la circulation aérienne, les communications, la navigation et les installations aéroportuaires sont traités au Chapitre 5 et les performances des aéronefs sont traitées au Chapitre 6.

4.2 ANTÉCÉDENTS DE L'ÉQUIPAGE

4.2.1 L'étude de tous les faits concernant l'équipage constitue une partie importante de l'enquête sur l'exploitation et de l'enquête sur les facteurs humains. Comme ces deux aspects de la question sont étroitement liés, la collecte et l'évaluation des faits qui se rapportent à l'accident doivent être étroitement coordonnées de manière à tirer pleinement parti des renseignements obtenus.

Dossier personnel

4.2.2 Il convient d'obtenir les renseignements suivants pour chacun des membres de l'équipage en service :

- a) nom, âge, sexe ;
- b) fonction à bord (pilote commandant de bord, copilote, navigateur, mécanicien navigant, responsable du chargement, commissaire de bord, membre de l'équipage de cabine, etc.) ;
- c) dossier général de sa carrière en aviation (formation initiale et ultérieure, formation spécialisée, cours suivis, employeurs et fonctions exercées, conditions dans lesquelles les diverses licences et qualifications ont été obtenues, validité des licences, accidents ou incidents antérieurs et leurs causes) ;
- d) antécédents médicaux (maladies récentes ou interruptions récentes de l'activité en vol, dernier examen médical ; déterminer le facteur de fatigue en évaluant le temps de service et le temps de repos au cours des 28 jours qui ont précédé l'accident et les activités au cours des 7 jours et des 72 heures qui ont précédé l'accident) ;
- e) expérience générale et expérience sur le type d'aéronef accidenté [examen des carnets de bord, temps total de vol (de jour et de nuit, aux instruments s'il y a lieu ; temps total au cours des 90 jours, des 28 jours et des 24 heures qui ont précédé l'accident), type de formation au sol (simulateur d'entraînement au vol, etc.) et de formation en vol, derniers contrôles de compétence et contrôles en vol et au sol, notamment connaissance des procédures d'urgence, exercice d'évacuation d'urgence, évaluation faite par les superviseurs, les contrôleurs ou les exploitants] ;
- f) expérience de la route ou de l'aérodrome où s'est produit l'accident (connaissance de la route, conditions IMC ou VMC rencontrées précédemment, nombre d'atterrissages ou de décollages, connaissance des procédures).

4.2.3 Pour recueillir ces renseignements, l'enquêteur doit obtenir des déclarations d'autres membres de l'équipage ayant volé avec l'intéressé et utiliser en particulier les enregistrements des communications échangées lors de vols antérieurs, ainsi que les lectures des données de vol enregistrées au cours des phases précédentes du vol. L'ampleur des renseignements requis dépend de la nature de l'accident. Des entrevues avec les familles peuvent aussi permettre à l'enquêteur d'obtenir des renseignements utiles sur les antécédents de l'équipage.

Activités de l'équipage de conduite avant, pendant et après l'accident

4.2.4 L'évaluation des activités des membres de l'équipage n'intéresse pas seulement ceux qui participent à l'enquête sur l'exploitation ; dans de nombreux cas, cette évaluation a une grande importance pour les enquêtes sur les facteurs humains, l'évacuation, les recherches et le sauvetage et la prévention des incendies.

a) *Activités avant l'accident.* L'enquêteur doit en particulier déterminer :

- 1) les activités au cours des 7 jours et des 72 heures qui ont précédé l'accident, en s'attachant tout spécialement aux facteurs psychologiques susceptibles d'avoir eu une incidence sur les performances des membres de l'équipage, à leur état physique par rapport au cycle travail-repos et à l'irrégularité des repas, particulièrement s'il s'est produit un changement de longitude important lors d'un vol récent ;
- 2) les circonstances et distances du trajet jusqu'à l'aéroport avant le début du service de l'équipage, ainsi que les activités de chaque membre de l'équipage lors de la préparation du vol (calcul du poids et du centrage de l'aéronef, poids de carburant, plan de navigation, exposés météorologiques, vérifications prévol, etc.) ;
- 3) les activités et les tours de service pendant le vol. Ces renseignements sont généralement fournis par les membres d'équipage survivants et/ou les enregistrements ou les déclarations concernant les communications air-sol.

b) *Activités au moment de l'accident.* D'après les renseignements indiqués ci-dessus, l'enquêteur doit s'efforcer de reconstituer le rôle et le comportement de chacun des membres de l'équipage au cours des phases successives de l'accident proprement dit. Il importe également d'étudier, en liaison avec le Groupe des facteurs humains, le rôle joué par des facteurs tels que l'aménagement du poste de pilotage, les types de leviers de commande, les commutateurs, etc. Il faut tenir compte de considérations analogues lors de l'examen des blessures provoquées par l'impact et/ou des questions de surviabilité.

c) *Activités après l'accident.* Il est évident que le rôle de l'enquêteur et les renseignements utiles pour la conduite de l'enquête ne se limitent pas au déroulement du vol et de l'accident. Il faut également tenir compte des points suivants :

- 1) activités de l'équipage immédiatement après l'accident (état physique immédiatement après l'impact, conditions dans lesquelles l'équipage a évacué l'aéronef, participation des membres de l'équipage à l'évacuation des passagers et à l'organisation du sauvetage, etc.) ;
- 2) activités qui ont suivi (examens médicaux et tests déjà subis ou prévus, épreuves de compétence au sol et en vol, divers témoignages).

4.3 QUALIFICATIONS/COMPÉTENCES DE L'ÉQUIPAGE

4.3.1 Les enquêteurs doivent établir les qualifications de chacun des membres de l'équipage pour déterminer si le vol a été mené conformément à leur expérience et à leur formation. Plusieurs domaines de compétence des membres d'équipage exigent que certaines opérations soient exécutées périodiquement et à une certaine fréquence. Les qualifications initiales à elles seules ne témoignent pas du niveau de compétence nécessaire pour faire face aux conditions de vol rencontrées. La réglementation applicable de l'État qui délivre les certificats doit être examinée et comparée aux dossiers de formation des membres d'équipage, aux évaluations et aux inscriptions dans les carnets de

bord, selon le cas. Les enquêteurs doivent utiliser la réglementation comme guide, mais ils ne sont pas tenus de la considérer comme acceptable. Par exemple, le transport des passagers en vol de nuit exige généralement d'exécuter un certain nombre de décollages et d'atterrissages de nuit à l'intérieur d'une période déterminée. Un pilote qui exécute le nombre requis de décollages et d'atterrissages immédiatement avant un vol de nuit transportant des passagers peut être qualifié, mais sa compétence peut être mise en doute. Lorsque ce problème est au centre d'une enquête, l'enquêteur devra peut-être inviter l'autorité de réglementation à réexaminer la mise en place du règlement.

4.3.2 Plusieurs grands transporteurs aériens utilisent des aéroports qui exigent que les équipages aient les qualifications et les compétences correspondant aux conditions que présentent ces aéroports. La formation et la fréquence des vols sont habituellement enregistrées dans les dossiers de formation de l'exploitant.

4.4 PÉRIODES DE SERVICE ET DE REPOS DE L'ÉQUIPAGE

4.4.1 Il existe des réglementations nationales sur la durée de vol et des périodes de service des équipages et sur la durée prévue des périodes de repos avant de reprendre les vols. Il convient d'évaluer l'adéquation des périodes de repos de l'équipage de concert avec l'enquête du Groupe des facteurs humains. Dans le cas de longs vols et de longues périodes de service ou de vols à grande distance, la gestion de la période de service de l'équipage peut devenir un facteur. Les exploitants tiennent des dossiers du temps de vol, de service et de repos des équipages. L'enquêteur peut aussi obtenir des renseignements sur les activités et le repos des membres d'équipage à partir de fiches d'hôtel et d'entrevues avec les familles. Il doit cependant respecter la confidentialité de ces renseignements.

4.4.2 Dans l'évaluation des périodes de repos, il ne faut pas seulement mesurer la durée du temps passé en dehors du travail. Il faut aussi déterminer le temps disponible pour le sommeil durant cette période, les services qui sont mis à la disposition des membres d'équipage pour prendre ce repos et si les interruptions dans le cycle de repos ont joué un rôle dans le niveau général de fatigue de l'équipage.

4.5 GESTION DES TÂCHES ET GESTION DES RESSOURCES EN ÉQUIPE (CRM)

4.5.1 Il est souvent insuffisant d'évaluer les actions de l'équipage durant une situation d'urgence en ne tenant compte que d'une seule manœuvre d'urgence exécutée ou requise. Les enquêteurs doivent examiner l'ensemble de la situation qui requiert l'attention de l'équipage. Si les mesures nécessaires sont prises sans la présence de distractions ou d'autres conditions, l'exécution de la procédure requise est habituellement simple, mais lorsque l'équipage doit prendre des décisions dans le cadre de conditions concurrentes, leur exécution devient plus compliquée. Durant l'application de procédures d'urgence, la manière dont l'équipage priorise les conditions existantes et les mesures à prendre a une incidence sur l'exécution des procédures. Dans un cas extrême, il peut exister une « saturation de tâches » qui empêche d'exécuter certaines mesures ou d'en reconnaître la nécessité. Une mauvaise application des procédures peut aussi être due à l'utilisation récente d'un aéronef différent exigeant des procédures d'urgence différentes ou à une formation récente acquise à bord d'un aéronef différent.

4.5.2 La plupart des équipages de vols commerciaux sont bien formés à la CRM, qui aide les membres d'équipage à communiquer efficacement les conditions existantes et les mesures à prendre. Il a été démontré qu'une CRM efficace réduit le risque d'une mauvaise priorisation des tâches et qu'elle favorise même la prise de bonnes décisions. Même si elles sont pratiquées et évaluées durant la formation, les communications entre les membres d'équipage doivent être examinées pour déterminer si la CRM a été appliquée correctement ou si, pour une raison ou pour une autre, la situation s'est détériorée au point d'entraver les communications.

Interfaces humain-machine

4.5.3 La conception des postes d'équipage est fondée sur des principes d'efficacité. Les commandes sont conçues pour être facilement accessibles lorsqu'elles sont nécessaires et les instruments et voyants d'alarme sont placés de manière à être bien visibles. La disposition des commandes et des affichages tient compte de la taille, du poids, de l'extension nécessaire et de l'amplitude des mouvements des personnes, mais il est à peu près impossible de concevoir un aéronef adapté à TOUS les membres d'équipage possibles. Les aéronefs plus anciens ont souvent été pensés pour des personnes de plus petite taille. La plupart des aéronefs actuels ont été conçus pour assurer l'accessibilité des commandes à des personnes de 157 à 193 cm (5,2 à 6,3 ft). Les enquêteurs doivent évaluer l'anthropométrie des membres d'équipage à la lumière des commandes qu'ils ont dû solliciter durant le problème rencontré. L'expérience a montré que les personnes dont les mesures sont supérieures (ou inférieures) à l'anthropométrie de conception peuvent avoir des difficultés à exécuter les actions prévues. Il n'est pas rare, par exemple, qu'une personne de petite taille doive utiliser un coussin de siège ou des blocs sur les pédales de palonnier pour pouvoir solliciter efficacement les commandes, mais l'utilisation d'accessoires pour faciliter l'accès aux commandes peut en limiter le plein débattement.

4.6 ÉQUIPEMENT PERSONNEL

4.6.1 Il faut établir si l'équipement fourni aux membres d'équipage ou celui qu'ils ont emporté avec eux pour être utilisé dans l'exercice de leurs fonctions est efficace ou approprié. La présence ou l'absence de l'équipement est une question dont il faut tenir compte, mais il est plus important de savoir si l'équipement a été utilisé lorsque les circonstances l'exigeaient et s'il a fonctionné comme prévu. Des objets tels que des cagoules de protection contre la fumée, des lunettes ou des masques à oxygène sont prévus pour être utilisés dans des conditions particulières et il faut déterminer si ces équipements ont fonctionné correctement et s'ils n'ont pu assurer la protection nécessaire. L'âge, l'état, l'usure et l'adéquation de l'équipement doivent être évalués en fonction des caractéristiques de la personne. Les masques à oxygène, par exemple, doivent bien s'ajuster au visage pour fournir de l'oxygène non contaminé en présence de fumée ou d'autres émanations, mais les barbes peuvent nuire à l'efficacité du joint d'étanchéité. De même, des harnais ou des ceintures de sécurité usées par le temps peuvent ne pas retenir l'occupant comme prévu durant une décélération.

Accès aux commandes

4.6.2 Comme dans le cas de l'interface humain-machine, la capacité du membre d'équipage d'accéder aux commandes requises peut devenir un problème. Si une commande du poste de pilotage est placée de manière à ne pouvoir être utilisée que par un des deux pilotes, l'autre pilote risque de ne pas pouvoir l'utiliser du tout en cas d'urgence. L'exemple le plus courant est la barre d'orientation de l'atterrisseur avant, qui est normalement placée de manière à ne pouvoir être utilisée que par l'occupant du siège de gauche.

Visibilité intérieure et extérieure du poste d'équipage

4.6.3 À moins que le pilote ne soit entouré d'une verrière, certains éléments de structure de l'aéronef peuvent réduire la visibilité et empêcher le membre d'équipage de voir le trafic venant en sens inverse. Même avec une verrière, la zone située sous le fuselage n'est généralement pas visible à moins que l'équipage n'exécute des manœuvres pour voir les objets qui se trouvent dans cette zone. Les enquêteurs doivent évaluer la capacité du membre d'équipage de voir les objets dont la présence fait partie du scénario de l'accident. Les éléments de structure et les objets situés dans le champ de vision peuvent aussi empêcher de voir les objets venant en sens inverse. Dans certaines parties du pare-brise, les objets situés à l'extérieur de l'aéronef ne peuvent être perçus que par un seul œil. Les systèmes de visualisation tête haute et les instruments placés dans le champ de vision normal restreignent aussi forcément la visibilité. Voir la Figure III-4-1.

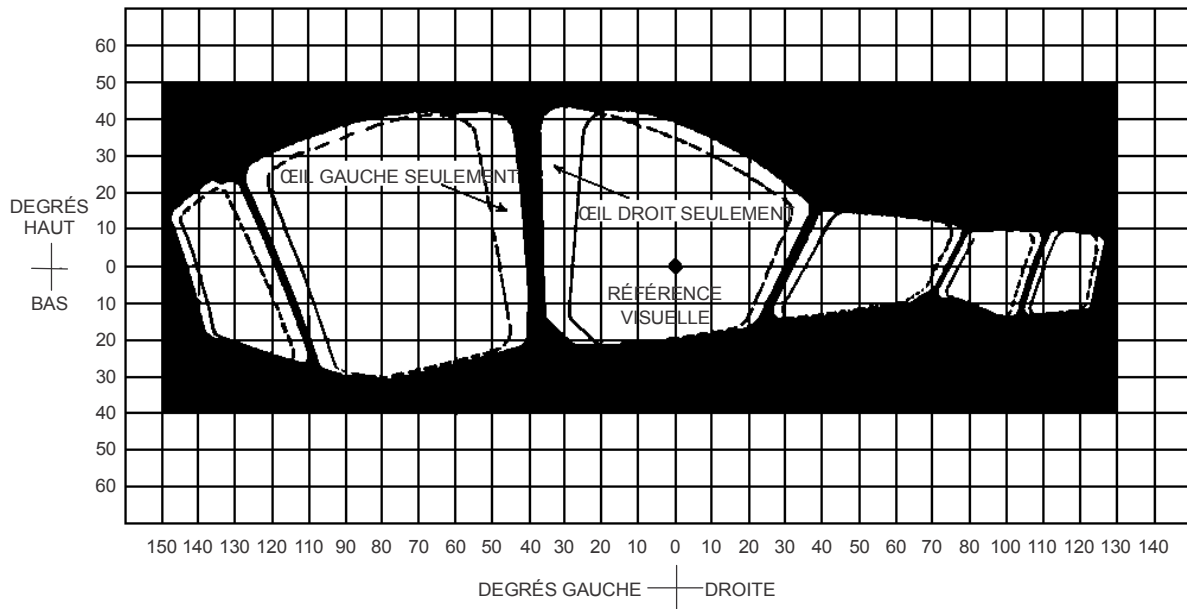


Figure III-4-1. Point de référence visuelle et zones ambino-culaires du commandant de bord. Les zones ombrées représentent la structure et ne sont pas visibles ni d'un œil ni de l'autre à moins que le commandant de bord ne s'écarte du point normal de référence visuelle.

4.6.4 Il faut aussi évaluer la capacité d'un membre d'équipage de voir les instruments, les voyants lumineux ou la position des commutateurs situés à l'autre extrémité du poste de pilotage. Un pilote instructeur qui doit porter des verres correcteurs dans le poste de pilotage, par exemple, peut trouver difficile de voler aux instruments dans un petit avion d'entraînement si les instruments qu'il doit regarder sont situés devant l'élève-pilote. Il y a eu des cas où la position du siège du pilote qui n'est pas aux commandes a empêché l'équipage de voir un voyant annonciateur s'allumer. L'éblouissement causé par le soleil peut aussi empêcher les membres d'équipage de voir des objets situés à l'extérieur de l'aéronef et des instruments, des voyants ou des commutateurs dans le poste de pilotage.

4.7 ÉTABLISSEMENT DU PLAN DE VOL

4.7.1 Pour de nombreux vols, un plan de vol est établi et déposé auprès des services de contrôle de la circulation aérienne. Ce plan fournit à l'enquêteur certains renseignements précis qui nécessitent un examen détaillé. De plus, dans le cas d'un vol commercial, l'équipage de conduite établit habituellement, avec l'aide des agents techniques d'exploitation, un plan de vol technique détaillé ou une feuille de navigation dont l'examen peut être utile à l'enquêteur. L'exploitant conserve généralement le double de ces documents. Dans le cas d'accidents mettant en jeu des questions de navigation ou de consommation de carburant, il est nécessaire de vérifier les plans de vol techniques et les feuilles de navigation pour s'assurer que les données graphiques ou tabulées (ou le programme informatique) qui ont servi de base à l'établissement des plans convenaient aux circonstances particulières du vol prévu, par exemple, aux conditions météorologiques, au type et au modèle d'aéronef, à l'altitude de croisière, etc.

4.7.2 Même si la question ne se pose que rarement lors des vols commerciaux en service régulier, il est souvent utile, spécialement dans le cas des vols effectués à la demande par des aéronefs légers et des vols d'instruction, de s'efforcer de déterminer les intentions de l'équipage au sujet du vol et les diverses manœuvres prévues.

4.7.3 Malgré la meilleure des planifications, des changements de route, les conditions météorologiques, un trafic non prévu, etc. peuvent modifier le profil du vol. Une fois que le vol s'écarte des conditions prévues, toutes les données du plan de vol changent aussi.

4.7.4 Effectuer des vols qui exigent des compétences qui dépassent les qualifications ou les habiletés du pilote risque de mener au désastre. Même si la planification organisationnelle et la formation de l'équipage doivent en principe permettre d'éviter ces risques, le résultat de certains vols montre qu'ils ont dépassé les limites établies. Un exemple courant dans les accidents d'aéronefs légers est la poursuite d'un vol dans des conditions de vol aux instruments par un pilote qui n'est pas qualifié pour ce type de vol ou dans un aéronef qui n'est pas équipé pour le vol aux instruments. Même si la décision de poursuivre le vol est le facteur principal, l'enquêteur doit essayer de déterminer la raison pour laquelle l'équipage ou le personnel de soutien a considéré ce choix comme acceptable.

4.8 POIDS ET CENTRAGE

4.8.1 Un devis de poids et centrage peut avoir été établi d'après le vol et les conditions météorologiques prévus. En général, pour les vols commerciaux, on utilise un formulaire normalisé, mais c'est rarement le cas pour les aéronefs légers. L'enquêteur doit tenir compte des points suivants et se procurer puis vérifier ce formulaire ou le reconstituer. Lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir ce formulaire, l'enquêteur doit utiliser les renseignements fournis par le constructeur :

- a) la pesée la plus récente de l'aéronef ;
- b) quantité de carburant et d'huile à bord (vérifier les ravitaillements, les déclarations du personnel d'avitaillement en carburant, les commandes de carburant, les vols précédents ; prélever des échantillons pour analyse en liaison avec l'enquête sur les groupes motopropulseurs) ;
- c) équipage et passagers à bord (vérifier le manifeste des passagers, les billets émis, les documents de douane ou de contrôle d'immigration, les déclarations des témoins de l'embarquement, les personnes embarquées ou débarquées aux escales précédentes, évaluer les poids normalisés ou déterminer les poids réels) ;
- d) fret et chargement (vérifier les manifestes, les documents de douane, les documents postaux et ceux des transitaires, les bagages transbordés en provenance d'autres vols, le poids des colis récupérés, les déclarations des personnes ayant assisté au chargement ou ayant effectué le chargement au dernier aéroport d'atterrissage et aux aéroports précédents, la répartition entre les divers compartiments à bagages, etc.).

4.8.2 Le poids et le centrage au moment de l'accident sont déduits des renseignements de base indiqués ci-dessus, compte tenu des circonstances du vol, et d'après la répartition et le poids du fret établis d'après l'examen de l'épave ainsi que l'emplacement et le poids des passagers et des membres de l'équipage déterminés d'après l'examen de l'épave (y compris l'examen pathologique s'il y a lieu).

4.8.3 Vérifier le réglage dans le poste de pilotage et la position du stabilisateur à incidence variable ou des volets de compensation, s'il y a lieu, par rapport au réglage et à la position qui correspondent au poids et au centrage de calcul de l'aéronef au moment de l'accident. Des écarts par rapport aux réglages prévus peuvent indiquer un déplacement anormal du poids et du centrage. Des problèmes de transfert de carburant ou de mauvaises estimations de la masse des passagers ou du fret ont causé des problèmes de manœuvrabilité ou des accidents parce que le centre de gravité dépassait les limites de l'aéronef.

4.9 CARTES AÉRONAUTIQUES ET BASES DE DONNÉES DE NAVIGATION

4.9.1 Il peut être nécessaire d'examiner les cartes dont disposait l'équipage pour la navigation et de juger si elles convenaient et étaient suffisamment précises pour la navigation requise dans le cas du vol en question ; il faudra peut-être aussi évaluer si elles diffèrent sensiblement des normes de l'Annexe 4, car l'uniformité est essentielle à une bonne utilisation des cartes. Les limitations inhérentes à certaines cartes, telles que les cartes spécialement établies pour les systèmes de radionavigation automatiques, doivent faire l'objet d'un examen critique. Lorsqu'il est évident qu'une certaine désorientation a pu se produire durant le vol, il peut également être utile d'examiner les relations fonctionnelles entre les diverses cartes établies pour les différentes phases du vol. Il peut aussi être utile de déterminer si les équipages de conduite pouvaient utiliser commodément les cartes dans l'espace limité de leurs postes de travail, et si l'éclairage était suffisant pour lire les cartes. Dans les aéronefs modernes, les cartes et l'information du système de gestion de vol (FMS) et du système mondial de localisation (GPS) sont affichées sur des écrans du tableau de bord. Les bases de données de ces systèmes doivent être vérifiées pour déterminer si elles sont exactes et à jour.

4.9.2 Selon la phase du vol au cours de laquelle s'est produit l'accident, l'enquêteur doit vérifier les cartes suivantes :

- Cartes de tracé de navigation
- Cartes de radionavigation
- Cartes de région terminale
- Cartes d'approche aux instruments
- Cartes aéronautiques (cartes topographiques)
- Cartes d'approche à vue
- Cartes d'atterrissage
- Cartes d'aérodrome
- Cartes de navigation aéronautique
- Cartes sur Internet
- Sacoques de vol électroniques
- Disponibilité du RAMS et des aides de navigation
- Bases de données GPS

4.10 DIRECTIVES D'EXPLOITATION

Manuel de vol

4.10.1 La source première de renseignements sur les performances de l'aéronef est le manuel de vol dont chaque aéronef doit être doté conformément aux normes de l'Annexe 6. La plupart du temps ces renseignements sont suffisants pour des enquêtes normales, mais il peut être nécessaire dans certains cas d'examiner les données qui ont servi de base à la définition des performances indiquées dans le manuel de vol afin d'en confirmer la validité par rapport aux circonstances particulières du vol accidenté. Dans ce cas, il peut être nécessaire de procéder à des recherches détaillées dans les dossiers du service de navigabilité compétent et du constructeur de l'aéronef. Le manuel de vol comprend normalement les sections suivantes :

Section 1 — Généralités

- enregistrement des amendements, plan d'ensemble de l'aéronef, dimensions, immatriculation, tableaux ou graphiques de conversion, définitions.

Section 2 — Limites d'emploi

- limites relatives aux éléments suivants : poids, poids de carburant, charges sur le plancher, centre de gravité, conditions atmosphériques (pression et température de l'air ambiant), fonctionnement des groupes motopropulseurs, vitesse anémométrique et nombre de Mach, manœuvres par vent traversier (vitesse maximale et direction), nombre minimal de membres d'équipage, nombre maximal d'occupants, système électrique et pilote automatique, etc.

Section 3 — Procédures d'urgence

- procédures d'exploitation essentielles en cas d'urgence prévisibles mais inhabituelles et exigeant des mesures immédiates et précises.

Section 4 — Procédures normales

- procédures à suivre en cas de dysfonctionnement qui ne figurent pas à la section 3, normalement pour les éléments suivants :

groupes motopropulseurs (moteurs et hélices)

circuit de carburant

circuit de lubrification des moteurs

système d'extinction d'incendie

circuits électriques

circuits hydrauliques

circuits pneumatiques

dispositifs de protection contre le givrage

systèmes de direction de vol

système de commandes de vol

pilote automatique

procédure à suivre en cas de forte turbulence

système de pressurisation et de conditionnement d'air

circuit d'oxygène

- Les procédures qui sont considérées comme faisant partie des compétences de base d'un pilote ne figurent pas dans le manuel.

Section 5 — Performances

- données quantitatives sur les performances de l'aéronef ; elles sont normalement présentées dans l'ordre suivant :

Généralités

Liste minimale d'équipements

Procédures et vitesses de décollage

Limites de performance [limites masse-altitude-température (limites WAT) selon les spécifications de montée]

Pentes de montée au décollage

Longueurs de piste au décollage

Données sur la trajectoire nette de décollage

Données de croisière

Procédures et vitesses d'atterrissage

Limite de montée à l'atterrissage (limite WAT à l'atterrissage)

Pentes de montée à l'atterrissage

Longueurs de piste à l'atterrissage

Autres données spéciales de performances

Manuel d'utilisation de l'avion, procédures d'exploitation normalisées ou listes de vérifications

4.10.2 Même si le manuel d'utilisation de l'avion (POH), les procédures d'exploitation normalisées (SOP) et la liste de vérifications de l'équipage sont tirés directement du manuel de vol, les enquêteurs doivent examiner les documents auxquels ont accès les membres d'équipage lors de l'application des procédures. En abrégant les procédures, les listes de vérifications omettent souvent des précisions. Bien qu'il soit important d'être bref, l'omission de certains détails dans la liste de vérifications peut modifier le moment ou les conditions d'application lorsque la procédure est considérée indépendamment. Il est faux de supposer que l'équipage se souviendra de toutes les précisions contenues dans le manuel de vol au moment de l'application d'une procédure d'urgence.

4.10.3 Les étapes indiquées dans le POH ou dans les SOP doivent correspondre exactement aux étapes spécifiées dans le manuel de vol. S'il existe des différences entre les deux, l'enquêteur doit essayer d'en déterminer la source. Dans le cas des procédures d'urgence, la différence peut passer inaperçue pendant longtemps, généralement jusqu'à ce qu'il soit nécessaire d'appliquer la procédure.

4.10.4 Les enquêteurs doivent être vigilants lorsqu'ils voient une procédure qui exige d'appliquer certaines étapes pendant une phase de vol différente. Le manuel de vol doit préciser ces procédures ; il doit indiquer qu'une étape doit être appliquée à un certain point et spécifier le moment exact où cette étape doit être appliquée, et répéter l'étape à

l'endroit approprié de la liste de vérifications. Par exemple, un accident d'un DC-9 a été causé par la sortie des aérofreins avant le toucher des roues. Ce système avait été activé par l'application, juste après le décollage, d'une procédure qui demandait de tirer un disjoncteur de commande. Le manuel de vol contenait une note indiquant que le disjoncteur devait être remis à sa position initiale pendant la circulation au sol « après l'atterrissage ». Cette étape était précisée dans la phase « approche et atterrissage » de la liste de vérifications sans explication. L'équipage a remis le disjoncteur à sa position initiale pendant la séquence des procédures avant atterrissage ce qui a eu pour résultat le déploiement des aérofreins et un atterrissage brutal.

Respect des consignes

4.10.5 Bien que le rôle de l'enquêteur ne soit pas de s'occuper des questions disciplinaires relatives au respect des règlements et des consignes, l'enquête sur l'exploitation doit nécessairement établir si les consignes applicables ont été respectées. Ces consignes doivent également être examinées en fonction de l'accident pour déterminer si elles étaient appropriées et suffisantes pour assurer la sécurité des opérations et si elles étaient présentées sous une forme facilement compréhensible. Il est important de distinguer entre les éléments qui ont un caractère obligatoire et ceux qui ont un caractère consultatif. Les consignes se présentent sous de nombreuses formes différentes, notamment :

Législation nationale

Annexes de l'OACI

Procédures de l'OACI pour les services de navigation aérienne

Manuel d'exploitation

Manuel de vol (et SOP)

NOTAM

Publications d'information aéronautique (AIP)

Instructions des exploitants à l'équipage de conduite

Circulaires d'information

Notices des constructeurs d'aéronefs

Consignes de navigabilité

Bulletins de service

4.11 ENTREVUES AVEC LES TÉMOINS

4.11.1 L'enquêteur ne doit pas oublier que, dans certains États, c'est à la police qu'il incombe de recueillir les déclarations des témoins durant une enquête sur un accident.

4.11.2 Selon les circonstances de l'accident, il peut être utile d'instituer un Groupe des témoins chargé de localiser les témoins et de les interroger. Dans ce cas, le Groupe doit normalement s'occuper de recueillir les déclarations des « témoins oculaires » qui se trouvaient au voisinage de l'accident. Les entrevues qui concernent d'autres groupes, par exemple, le groupe des structures, de l'exploitation, etc. sont habituellement menées par un enquêteur faisant partie de ce groupe.

4.11.3 Une des principales tâches de l'enquêteur consiste à recueillir des indices auprès des témoins ; les renseignements ainsi obtenus peuvent fournir une piste, car ils vont de pair avec les faits matériels découverts lors de l'examen du lieu de l'accident et de l'épave, et peuvent les compléter ou les rendre plus clairs. Toutefois, l'enquêteur ne doit pas oublier que tout le monde peut se tromper et il doit faire preuve d'une grande prudence lorsqu'il analyse des déclarations qui sont manifestement en contradiction avec les indices matériels établis. Il est souvent recommandé d'utiliser une maquette de l'aéronef lors de l'entrevue avec les témoins oculaires.

4.11.4 L'entrevue avec les témoins doit être un entretien plutôt qu'un interrogatoire. Un témoin qui est mis à l'aise, à qui on explique la nécessité de la sécurité aérienne et de la prévention des accidents et qui est encouragé à relater librement ce qu'il a vu, sans interruption ni intimidation, exposera habituellement ses observations de bon gré.

4.11.5 Il ne faut pas sous-estimer la nécessité de recourir aux services d'un interprète professionnel chaque fois que l'enquêteur interroge un témoin ne possédant pas la même langue maternelle que lui ; le niveau de communication peut être suffisant pour une conversation courante, mais de légères intonations dans l'exposé du témoin ou des détails qui peuvent avoir une importance technique peuvent facilement passer inaperçus en raison d'une traduction déficiente par le témoin, l'enquêteur ou toute personne autre qu'un interprète professionnel.

4.11.6 Il convient d'obtenir des déclarations écrites de toutes les personnes ayant assuré les services de la circulation aérienne ou le service de vol pour l'aéronef accidenté, ainsi que des personnes chargées de l'exploitation et de la maintenance des aides à la navigation utilisées par l'aéronef. Les efforts faits pour trouver les témoins ne doivent jamais se limiter à la phase qui précède immédiatement l'accident, mais doivent couvrir tous les points, y compris l'état de l'aéronef et les facteurs humains. Toute déclaration susceptible de jeter la lumière sur un point quelconque de l'enquête peut être importante. L'enquêteur ne doit pas se limiter à retrouver les témoins qui se trouvaient au voisinage immédiat du lieu de l'accident, mais il doit s'efforcer d'obtenir des déclarations concernant toute la trajectoire du vol, aussi bien auprès de l'équipage de conduite que des passagers (et s'il y a lieu, de leur famille), de l'exploitant, du constructeur, des services responsables et d'autres sources. Dans certains cas, le recours aux médias tels que la presse, la radio et la télévision aidera à obtenir des déclarations qui s'ajoutent à celles des personnes qui se sont présentées spontanément ou qui ont été interrogées par les autorités locales.

4.11.7 Selon la nature de la déclaration à recueillir (renseignements sur l'avitaillement en carburant ou description de l'ordre apparent d'une désintégration en vol) et le caractère des témoins interrogés (bavards, imaginatifs, bouleversés, réticents), l'enquêteur devra recueillir la déclaration dans des conditions très diverses dont il devra tenir compte. Le but de l'enquête doit être expliqué et, en général, il n'est pas souhaitable de recueillir une déclaration sous forme interrogative.

4.11.8 L'enquêteur peut disposer de moyens allant du simple carnet de notes à un équipement d'enregistrement portable ou standard, en passant par les services d'une dactylographe, d'une sténographe ou d'une sténotypiste. Il peut être nécessaire de disposer de locaux appropriés ou de moyens de transport convenables, ainsi que du matériel nécessaire pour étudier les cartes et les photographies.

4.11.9 En ce qui concerne la détermination de la trajectoire probable de vol, des essais en vol sont souvent effectués pour préciser et comparer les observations des témoins. Par exemple, un aéronef semblable à l'aéronef accidenté peut être utilisé pour parcourir une série de trajectoires pendant que des témoins au sol, accompagnés d'enquêteurs, observent le vol. Il est ensuite demandé aux témoins de comparer ces trajectoires à leur souvenir de la trajectoire suivie par l'aéronef accidenté. Il est souvent possible d'obtenir de cette manière des renseignements précieux sur l'altitude probable (ou la hauteur au-dessus du sol, selon le cas), le cap et l'assiette de l'aéronef. Dans certains accidents, il peut être intéressant d'utiliser un hélicoptère pour déterminer la trajectoire. Cette méthode est utile dans les cas où l'un des témoins peut déterminer la position de l'hélicoptère par rapport à un objet fixe au sol. Une série d'observations de ce genre permet d'effectuer un tracé qui reproduit avec précision la trajectoire de vol. Dans la mesure du possible, il est souhaitable d'assurer une liaison radio bilatérale entre l'enquêteur et l'aéronef utilisé pour la reconstitution de la trajectoire.

4.11.10 Il convient de tenir compte des principes généraux suivants :

- a) Les déclarations doivent être recueillies dès que possible après l'accident ; elles peuvent toujours être développées plus tard, s'il y a lieu, mais les premières déclarations sont en général les plus précises (les événements sont encore frais et présents à la mémoire et le processus d'interprétation a eu moins de temps pour agir).
- b) Il est toujours très utile d'entendre les témoins sur les lieux où ils se trouvaient au moment de l'accident, non seulement pour mieux comprendre la déclaration, mais aussi pour obtenir des détails complémentaires (surtout dans le cas des déclarations concernant la trajectoire de l'aéronef et les conditions environnementales de l'accident). L'enquêteur peut utiliser avec profit une boussole et un inclinomètre pour préciser les observations des témoins oculaires.
- c) Il est vivement recommandé que les entretiens avec les témoins se passent en tête à tête pour éviter d'influencer les autres témoins. Dans la mesure du possible, il faut encourager les témoins à ne pas discuter entre eux de leur témoignage avant que celui-ci n'ait été recueilli. Il est en général possible de tenir des discussions conjointes plus tard si elles se révèlent nécessaires.
- d) Aucune déclaration ne doit être rejetée d'emblée. La déclaration d'un témoin ayant une expérience de l'aviation n'est pas nécessairement la plus valable et l'enquêteur ne doit pas négliger les déclarations des autres témoins qui se trouvaient au même endroit. Les déclarations des enfants peuvent être extrêmement utiles, mais il faut être très prudent au moment de les recueillir et de les analyser. Il ne faut pas oublier que certaines lois nationales peuvent imposer des restrictions aux dépositions des personnes mineures.
- e) Les entretiens avec les témoins peuvent, jusqu'à un certain point, se dérouler en deux étapes : dans la première étape, l'enquêteur doit, dans la mesure du possible, laisser le témoin raconter comme il l'entend les événements qu'il a observés (sans aucune interruption, sauf pour l'empêcher de s'écarter du sujet) ; durant la seconde étape, l'enquêteur doit poser des questions pour éclaircir des points douteux ou soulever d'autres questions (mais les questions ne doivent jamais être formulées de manière à suggérer la réponse).
- f) Il est utile pour l'enquêteur d'être accompagné d'une personne qui puisse noter la déclaration ou l'enregistrer à l'aide d'un magnétophone. L'enquêteur peut ainsi se concentrer uniquement sur ce que dit le témoin et sur les questions qu'il devra poser.

4.11.11 S'il y a lieu, noter les renseignements suivants :

- renseignements personnels sur le témoin (nom de famille, prénoms, numéro d'employé, adresse, numéro de téléphone, âge, profession, expérience concernant le point sur lequel porte la déclaration) ;
- heure de l'observation (si elle a été notée ; sinon, telle qu'elle a été déterminée par rapport à d'autres événements) ;
- endroit où se trouvait le témoin au moment de l'observation (indiquer la position sur une carte au besoin) ;
- tout ce qui a été entendu ou vu au sujet de l'aéronef accidenté et, s'il y a lieu, des autres aéronefs qui se trouvaient à proximité, selon la phase du vol, par exemple : position des volets, compensation, circulation à la surface, point fixe, freins au démarrage, début du cabrage, angle de montée, vitesse estimée, altitude estimée, points survolés par l'aéronef, caps, manœuvres, position des commandes de vol, train d'atterrissage, objets détachés de l'aéronef, flammes d'échappement, feu ou fumée,

signaux lumineux, feux anticollision et éclairage de cabine, phares d'atterrissage, point de toucher des roues, utilisation des freins, inversion de poussée, tout bruit, phénomène ou mouvement paraissant anormal, etc.

- position de l'épave principale et des débris dispersés ;
- position des corps (état des ceintures de sécurité, etc.) ;
- tout croquis que peut fournir le témoin pour illustrer sa déclaration ;
- toute photo ou vidéo prises ;
- rapports des opérations de sauvetage ;
- noms et adresses d'autres témoins que pourrait connaître le témoin interrogé ;
- signature de l'un des exemplaires de la déclaration et de chaque croquis.

4.11.12 L'enquêteur doit noter sur la déclaration la date et le lieu où elle a été recueillie et peut aussi y inscrire son nom et ses fonctions.

4.11.13 Finalement, pour faciliter la consultation, les témoignages recueillis doivent être accompagnés d'une carte indiquant l'emplacement de chaque témoin au moment de l'accident et une légende permettant de se reporter aux déclarations de ces témoins.

4.12 DÉTERMINATION DE LA TRAJECTOIRE DE VOL FINALE

La reconstitution de la dernière phase du vol, c'est-à-dire celle de l'accident, nécessite une coordination étroite entre de nombreux groupes d'enquête mais elle relève avant tout de l'enquête sur l'exploitation. Il faut tenter de construire une image complète des derniers événements dans l'ordre où ils se sont produits et d'évaluer les relations entre eux. La durée à couvrir dépend des circonstances ; en général, elle doit commencer au moment où l'aéronef ne vole plus dans des conditions de sécurité et elle peut se terminer au moment où l'accident est de toute évidence devenu inévitable. Ce moment n'est pas nécessairement celui de l'impact avec le sol ; par exemple, dans le cas d'une rupture structurelle en croisière, l'accident est inévitable une fois que les ailes se sont détachées ; de même, en cas de « déséquilibre aérodynamique », lorsque l'aéronef est trop bas pour reprendre une assiette normale sans largement dépasser de nombreuses valeurs limites, l'accident est inévitable. Toutefois, dans les d'accidents qui se produisent au décollage ou à l'atterrissage, l'impact avec le sol constitue l'événement final et il peut être nécessaire d'utiliser ce moment comme point de départ de la reconstitution de l'accident, puis de remonter dans le temps afin de synchroniser les diverses sources d'information qui ont été établies en séquence par d'autres groupes d'enquête. L'enquête sur les enregistreurs de bord fournit la base de la reconstitution et l'enregistrement des communications radiotéléphoniques fournit le lien nécessaire avec les activités correspondantes au sol. L'enquête sur les structures doit déterminer la configuration de l'aéronef, tandis que l'enquête sur les facteurs humains peut compléter les témoignages et déterminer également un certain nombre de points importants sur l'état et l'efficacité de l'équipage de conduite. L'enquête sur les groupes motopropulseurs doit être à même d'indiquer la puissance fournie par les moteurs au moment de l'impact et l'enquête sur les systèmes doit pouvoir contribuer à déterminer en détail la configuration de l'aéronef. Enfin, la reconstitution doit être envisagée dans l'environnement indiqué par l'analyse des déclarations des témoins et dans les conditions météorologiques déterminées par l'enquête sur les conditions météorologiques.

4.13 DÉROULEMENT DU VOL

4.13.1 Les renseignements énumérés plus haut (sections 4.2 à 4.12) devraient mettre en lumière les points importants de l'enquête sur l'exploitation par rapport aux autres domaines de l'enquête sur l'accident. En fait, la synthèse de toutes les données obtenues par l'enquête sur l'exploitation constitue l'élément principal de la reconstitution du vol. Il peut également arriver que les caractéristiques de l'accident exigent non seulement la reconstitution du vol de l'aéronef accidenté, mais celle de vols antérieurs.

4.13.2 Même si l'enquête doit surtout porter sur la phase du vol au cours de laquelle s'est produit l'accident (voir la section 4.12), il est également souhaitable d'analyser le déroulement du vol tout entier. En outre, bien souvent, l'enquêteur a intérêt à procéder à un examen général des points principaux de l'enquête sur l'exploitation pour chacune des phases de vol. Par exemple, pour la phase de croisière, certains domaines, tels que l'équipage, les services de la circulation aérienne, la météorologie, l'établissement du plan de vol, les performances de l'aéronef et les déclarations des témoins fourniront des renseignements précis qui pourront nécessiter un examen plus approfondi selon la nature de l'accident.

4.13.3 Les données des enregistreurs de bord et des enregistreurs radar peuvent souvent être utilisées pour produire rapidement par ordinateur une trajectoire de vol qui tient compte des interventions de l'équipage et des instructions du personnel de soutien. Cette méthode peut aider à déterminer le moment et l'endroit où le vol a dévié de sa trajectoire ou à quel moment les manœuvres ont dépassé les limites de la structure de l'aéronef ou celles de la physiologie humaine.

Chapitre 5

ENVIRONNEMENT OPÉRATIONNEL DE L'AÉRONEF

5.1 ENQUÊTE SUR LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

5.1.1 Malgré les progrès technologiques réalisés dans la prévision météorologique et la diffusion et la présentation des données météorologiques (MET), les conditions météorologiques continuent à être un facteur dans les accidents d'aviation partout dans le monde. Pour les enquêtes sur un accident dans lequel les conditions météorologiques ont joué un rôle important, il y a intérêt à instituer un groupe distinct comprenant un personnel qualifié ayant une formation spécialisée en météorologie. S'il n'est pas jugé nécessaire de créer ce groupe, il peut être utile d'obtenir un compte rendu des conditions météorologiques d'un météorologiste qualifié (étranger à l'accident). Quelle que soit la solution adoptée, l'enquête doit en principe porter sur les points suivants.

Collecte des données météorologiques

5.1.2 Les produits et données MET recueillis varieront d'un État à l'autre selon la disponibilité des données (par ex., il y a peu de données pour les régions isolées) et la complexité des phénomènes météorologiques liés à l'accident. Plusieurs données d'observation et de prévision doivent cependant être obtenues. Il est recommandé de collecter des données pour une période de 12 heures avant l'accident et pour quelques heures après l'accident afin de déterminer les tendances et d'effectuer une analyse de continuité¹. Il est essentiel de documenter avec précision les conditions météorologiques prévues et observées.

5.1.3 Vu l'augmentation des projets de recherche multi-institutionnels et coopératifs et l'utilisation des données MET par les institutions privées, l'enquête doit tenir compte de plusieurs sources de données, notamment^{2,3} :

- a) services météorologiques nationaux ;
- b) services de l'aviation civile ;
- c) services météorologiques militaires ;
- d) sociétés météorologiques privées ;
- e) universités ;
- f) stations de télévision et radio ;
- g) services publics ;

1. S'il y a lieu, collecter et analyser les données sur les conditions météorologiques rencontrées par les survivants et les missions de recherche et de sauvetage (SAR).

2. Bureau Enquêtes Accidents (de France) (1995). Conditions météorologiques : Chapitre 3 — Investigations techniques — Le vol. *Manuel d'investigations techniques sur les accidents d'aviation*. Projet du Groupe d'étude des méthodes d'enquête sur les accidents de l'OACI — Mémorandum n° 26. Montréal (Canada), OACI.

3. National Transportation Safety Board (NTSB) (2002), Appendix H – Group chairmen checklists. In *Aviation investigation manual – Major team investigations*. Washington (DC).

- h) sites agricoles ;
- i) centres de recherche MET ;
- j) essais opérationnels MET ;
- k) réseaux de surveillance de la qualité de l'air ;
- l) sites Internet et webcams ;
- m) enregistrements vidéos ;
- n) déclarations des témoins (au sol et à bord) et services d'enquête sur les accidents d'aviation (lecture et analyse des FDR et CVR) ;
- o) déclarations des survivants (membres d'équipage et passagers).

Observations

5.1.4 Les conditions MET régnant au moment et au lieu de l'accident et, s'il y a lieu, sur la route suivie peuvent être déterminées d'après des données diverses, telles que :

- a) messages d'observations météorologiques régulières et spéciales d'aérodrome⁴ ;
- b) données sur l'état de la mer et données provenant des bouées ;
- c) observations MET au sol ;
- d) relevés des précipitations ;
- e) enregistrements barographiques ;
- f) enregistrements anémométriques ;
- g) enregistrements de télémètres de nuages ;
- h) comptes rendus des enregistrements RVR sur l'état de la piste ;
- i) cartes synoptiques de surface/cartes d'analyse de lignes de courant ;
- j) images de caméras/enregistrements vidéo, webcams ;
- k) cartes en altitude (pression, vent, température) ;
- l) cartes d'épaisseur, de tourbillons et de vitesse verticale ;
- m) observations en altitude ;
- n) cartes d'analyse des indices de stabilité ;
- o) comptes rendus en vol réguliers et spéciaux [AIREP (PIREP en Amérique du Nord)] ;

4. Collecter les données sur l'emplacement des stations d'observation et des capteurs météorologiques.

- p) données de radars météorologiques (données sur les précipitations et sur les vents Doppler) ;
- q) images et données de satellites MET ;
- r) données sur les éclairs ;
- s) enregistrements (diffusions VOLMET et données ATIS, CVR, FDR) ;
- t) conditions d'éclairement naturel (crépuscule, clair de lune, etc.) ;
- u) données du système avertisseur de cisaillement du vent dans les basses couches.

5.1.5 De précieux renseignements peuvent aussi être tirés des observations des stations météorologiques locales, des équipages d'autres aéronefs en vol, des déclarations des témoins et de l'examen de l'épave par un expert (dommages causés par la grêle, l'accumulation de glace, etc.).

5.1.6 Dans certains États, le personnel des services météorologiques aéronautiques doit effectuer des observations spéciales lorsqu'il estime qu'un accident risque de se produire ou lorsqu'un accident s'est produit à un aéroport ou à ses abords immédiats⁵. L'enquêteur doit porter une attention particulière à ces observations spéciales lorsqu'elles sont disponibles.

5.1.7 Le choix des données d'observation à collecter et à analyser dépend des circonstances de l'accident. Il est très souhaitable que l'enquêteur examine l'original, plutôt qu'une copie, des données enregistrées.

Prévisions

5.1.8 Les prévisions météorologiques qui se rapportent à l'accident doivent être documentées. Selon la nature de l'accident, il peut être nécessaire d'examiner tous les types de prévisions indiqués ci-dessous ou seulement certains d'entre eux :

- a) prévisions d'aéroport (TAF et TAF modifiées) ;
- b) prévisions pour le QNH régional (s'il y a lieu) ;
- c) prévisions maritimes ;
- d) prévisions des conditions météorologiques en altitude (pression, température et vent) ;
- e) prévisions des conditions météorologiques au sol/ligne de courant du vent gradiental (s'il y a lieu) ;
- f) avertissements météorologiques (y compris les avertissements civils/publics) ;
- g) prévisions SIGWX ;
- h) information des avis de cendres volcaniques et de cyclones tropicaux ;
- i) prévisions d'épaisseur, de tourbillons et de vitesse verticale ;
- j) prévisions des indices de stabilité ;
- k) prévisions de givrage ;

5. Il est souhaitable de prendre des dispositions permanentes de ce genre en prévision des accidents.

- l) prévisions de turbulence ;
- m) AIRMET ;
- n) SIGMET ;
- o) GAMET ;
- p) avertissements d'aérodrome et de cisaillement du vent.

5.1.9 En ce qui concerne les prévisions SIGWX, il faut porter une attention particulière aux messages de renseignements SIGMET (renseignements sur l'occurrence effective ou prévue de phénomènes météorologiques dangereux en route, tels qu'orages, forte turbulence, cisaillement du vent) qui auraient été diffusés et qui s'appliqueraient à une phase quelconque du vol.

Exposés avant le vol et documents de vol

5.1.10 Il convient de se procurer une copie de tous les documents météorologiques et aéronautiques concernant le vol afin de pouvoir les étudier. Il faut porter une attention particulière à l'actualité et à l'exactitude des renseignements opérationnels demandés par l'équipage de conduite et de ceux qui lui ont été fournis lors de la préparation prévol et durant le vol.

5.1.11 Il convient d'obtenir les déclarations du personnel qui a fourni les renseignements opérationnels à l'équipage, aussi bien avant le départ que pendant le vol en croisière. Il faut particulièrement déterminer si l'équipage a été convenablement informé des conditions météorologiques dangereuses.

Analyse après le vol

5.1.12 Il convient d'obtenir d'un météorologiste qualifié (étranger à l'accident) une évaluation des conditions météorologiques au cours du vol à partir d'une analyse de tous les renseignements météorologiques mis au jour par l'enquête. Il y a lieu d'envisager soigneusement la possibilité que se soient produits des phénomènes dangereux difficilement décelables d'après les prévisions et les observations disponibles au moment de l'accident, particulièrement dans le cas des accidents en route où il y a rupture structurelle. Ces phénomènes peuvent être des effets d'ondes orographiques, des cyclones tropicaux, une forte turbulence, de la pluie verglaçante, des cendres volcaniques, etc. S'il est estimé que les conditions météorologiques ont joué un rôle dans l'accident, il convient d'obtenir d'un spécialiste un tracé en coupe transversale du profil des conditions météorologiques pour les différentes phases du vol.

Adéquation du service

5.1.13 Il faut s'attacher à déterminer si l'équipage a été convenablement informé des conditions météorologiques dangereuses. L'enquête doit examiner les services d'observation et de prévision et les exposés avant le vol pour déterminer :

- a) si les règlements et les procédures applicables étaient satisfaisants et disponibles et s'ils ont été respectés⁶ ;

6. Certaines limites peuvent s'appliquer aux règlements sur les comptes rendus. Les différences éventuelles entre les avertissements aéronautiques et les avertissements civils/publics de phénomènes météorologiques violents peuvent être un facteur causal.

- b) si la charge de travail était excessive pour le personnel disponible ;
- c) si les prévisions et les exposés avant le vol étaient exacts et s'ils ont utilisé tous les renseignements connus applicables ;
- d) si les renseignements ont été communiqués au personnel aéronautique approprié, immédiatement et conformément aux procédures prescrites.

Adéquation des documents de vol et des messages en vol

5.1.14 Les phénomènes météorologiques locaux qui sont fréquemment observés à un aéroport particulier peuvent être indiqués à titre d'avertissement dans des suppléments de vol. Ces suppléments sont souvent utilisés pour les vols en conditions météorologiques de vol à vue (VMC) et il est possible que ces mêmes avertissements ne figurent pas dans les documents applicables aux vols en conditions météorologiques de vol aux instruments (IMC) pour le même aéroport. Il faut donc comparer ces documents pour déterminer s'il existe des différences. Par exemple, un supplément de vol pour un aéroport entouré d'un terrain accidenté où se produisent fréquemment de forts vents peut signaler une possibilité de turbulence mécanique, mais il est possible que cet avertissement ne figure pas sur les cartes d'approche aux instruments utilisées en régime IMC. Les enquêteurs doivent aussi tenir compte du fait que l'utilisation fréquente de ces aéroports peut amener un relâchement de la vigilance et l'exclusion de ces renseignements.

5.1.15 Il faut aussi examiner les messages transmis durant le vol. La plupart des pilotes reçoivent des SIGMET par radio et il n'existe donc pas de copie imprimée du message pour permettre une analyse complète. Il faut déterminer si les données étaient claires et précises et si les messages pouvaient être facilement compris et utilisés dans les conditions du vol. Les comptes rendus (par ex., AIREP/PIREP) peuvent aussi être limités. Ces limites sont particulièrement importantes dans le cas de comptes rendus sur le givrage ou la turbulence étant donné que leur interprétation est subjective.

Normes et politique opérationnelles

5.1.16 Les normes, qu'elles soient établies par une organisation, un groupe ou une personne, peuvent avoir une incidence considérable sur le comportement et les opérations. En ce qui concerne les conditions météorologiques, l'enquêteur doit analyser (si possible) les diverses organisations, les groupes et les normes appliquées par l'équipage de conduite. Il faut particulièrement examiner les normes et politiques de diffusion des renseignements et d'analyse des données ; il est possible, par exemple, que les pilotes aient pour norme de ne pas lire au complet les messages provenant des centres de coordination des opérations parce qu'ils sont très longs. Cette coutume de ne rechercher que certaines données peut avoir limité la compréhension des renseignements météorologiques fournis.

5.1.17 Il convient d'analyser les politiques opérationnelles des organismes de réglementation et des exploitants relatives aux vols en conditions météorologiques dangereuses pour déterminer s'il existe des différences par rapport à la réalité opérationnelle. Cette analyse peut aussi être appliquée aux normes de l'industrie (par exemple, pénétration des orages dans les régions terminales)⁷. Les conditions météorologiques prévues et observées doivent être comparées aux limites imposées à l'aéronef et à l'équipage, y compris les politiques réglementaires et institutionnelles.

7. Rhoda, D. A., et Pawlak, M. L. (1999). *An assessment of thunderstorm penetrations and deviations by commercial aircraft in the terminal area* (Project Report NASA/A-2). Springfield, VA: NTIS.

Disponibilité des données

5.1.18 La disponibilité des données est différente dans chaque enquête, probablement en raison du faible nombre de messages d'observations météorologiques dans les régions isolées et du manque de qualité de certains réseaux de collecte des données. Les technologies employées pour collecter, présenter et diffuser les données peuvent aussi être limitées. Dans ces cas, l'enquêteur peut avoir à innover considérablement dans ses techniques et outils d'analyse. Il peut être utile de consulter des collègues, experts et chercheurs dans ces domaines. Il est aussi recommandé de rechercher des informations et des avis dans les diverses sources de renseignements météorologiques disponibles (CMPZ, VAAC, TCAC, MWO, etc.).

Collecte des données sur l'accident

5.1.19 Certaines données importantes (par ex., heure de l'accident, route) doivent être obtenues pour faciliter ou compléter la collecte des données météorologiques. Il faut, par exemple, connaître la date et l'heure de l'accident pour recueillir les bonnes données. Les principales sources de ces données sont les plans de vol, les données radar des services de la circulation aérienne, les cartes de navigation et les cartes topographiques. Il faut notamment recueillir les renseignements suivants :

- a) date de l'accident (UTC et LMT) ;
- b) heure de l'accident (UTC et LMT) ;
- c) lieu de l'accident :
 - 1) emplacement général ;
 - 2) coordonnées de la grille ;
 - 3) altitude et topographie ;
- d) point de départ ;
- e) altitude ou niveau de vol de croisière ;
- f) destination et escales (avec les ETA/ATA et ETD/ATD) ;
- g) pistes radar.

Collecte de données techniques

5.1.20 La collecte de données techniques peut inclure le démontage et l'essai des instruments météorologiques ainsi que la collaboration avec d'autres groupes pour obtenir les données sur les instruments de bord (par ex., l'altimètre). Il faut aussi recueillir des données sur les outils utilisés par l'État, l'exploitant et les services ATS (par ex., technologie radar, imagerie satellitaire haute résolution, modèles de prévision numérique du temps).

Collecte de données sur les facteurs humains

5.1.21 En ce qui concerne la météorologie, il faut collecter les données sur les facteurs humains non seulement pour comprendre ce qui a motivé les décisions de l'équipage, mais aussi pour déterminer si des oublis ou des omissions organisationnels ont pu contribuer à l'accident.

5.1.22 Il convient de se procurer une copie de tous les documents météorologiques concernant le vol afin de pouvoir les étudier, en portant une attention particulière aux renseignements opérationnels demandés par l'équipage de conduite et à ceux qui lui ont été fournis lors de la préparation prévol et durant le vol. Il faut aussi obtenir les déclarations du personnel qui a fourni les renseignements météorologiques à l'équipage, aussi bien avant le départ que pendant le vol en croisière et à destination (s'il y a lieu), et notamment déterminer si l'équipage a confirmé la réception des renseignements sur les conditions météorologiques dangereuses prévues.

5.1.23 Obtenir aussi les déclarations du personnel et les documents concernant la coordination et la diffusion des données météorologiques. Ces données, aussi bien celles qui sont utilisées à l'intérieur de l'organisation que celles qui sont échangées entre les organisations, doivent être recueillies auprès de l'organisme ATS approprié, des services météorologiques nationaux et de l'exploitant (transporteur aérien, école de pilotage). Au besoin, obtenir également les données sur les effectifs et la charge de travail du personnel pour chaque organisation.

5.1.24 Recueillir les déclarations de l'exploitant et les documents concernant la formation météorologique des membres de l'équipage de conduite, ainsi que les données sur la politique opérationnelle de l'exploitant relative aux vols en conditions météorologiques dangereuses. Il faut aussi obtenir des données sur les normes (pratiques attendues non écrites) appliquées aux types de produits météorologiques utilisés par les équipages et les agents techniques d'exploitation de l'exploitant. Par exemple, l'analyse d'imagerie satellitaire est-elle une pratique courante ? Collecter également les données sur les pratiques suivies par les membres d'équipage pour analyser des messages des centres de coordination des opérations.

Analyse des données

5.1.25 Les données recueillies doivent être analysées par une personne qualifiée (étrangère à l'accident) possédant une formation spécialisée en météorologie et, dans certains cas, par d'autres groupes (par ex., facteurs humains/performances humaines). Il y a lieu d'envisager soigneusement la possibilité que se soient produits des phénomènes dangereux difficilement décelables d'après les prévisions et les observations disponibles au moment de l'accident. Ces phénomènes peuvent être des tornades, une forte turbulence, de la pluie verglaçante ou des cendres volcaniques. L'analyse doit aussi porter sur les données relatives à l'équipement technique et aux facteurs humains pour déterminer l'incidence qu'ils auraient pu avoir.

Analyse des particularités de l'accident

5.1.26 L'analyse des particularités de l'accident doit précéder l'analyse des conditions météorologiques. Les informations relatives à l'altitude topographique, par exemple, sont nécessaires pour calculer l'altitude-pression et les détails du lieu et du terrain aideront à analyser les effets éventuels des conditions météorologiques locales. Les données sur les conditions d'éclairement naturel combinées à la date et à l'heure de l'accident pourraient permettre d'identifier les vents locaux (brise de terre/mer, vents catabatiques). En outre, la comparaison des données du plan de vol et des pistes radar peut donner des indices sur les conditions rencontrées par les membres de l'équipage de conduite. Le Groupe de la météorologie peut obtenir du Groupe des performances des données utiles sur les vitesses de l'aéronef, qui peuvent aussi donner des indications sur les conditions auxquelles faisait face l'équipage : par exemple, une faible vitesse sol (GS) malgré une composante vent arrière peut révéler que l'équipage a ralenti jusqu'à une vitesse de pénétration (V_B) en turbulence, indiquant la possibilité de conditions de vol considérablement turbulentes.

Analyse par phase de vol

5.1.27 Après l'analyse des données collectées, il convient de relier les données sur l'atmosphère à chacune des phases du vol, notamment :

- a) circulation à la surface, décollage jusqu'à la fin de la montée ;

- b) données sur la phase de croisière ;
- c) début de la descente, approche, atterrissage et circulation à la surface. Cette méthode devrait permettre à l'enquêteur de bien comprendre les conditions atmosphériques présentes durant les différentes phases du vol.

Analyse des données techniques

5.1.28 Plusieurs facteurs ont pu limiter la précision, l'exactitude et l'ampleur des données météorologiques fournies aux équipages de conduite, aux organismes météorologiques nationaux, aux organismes ATS et aux exploitants.

5.1.29 S'ils doutent de l'exactitude des renseignements météorologiques, les enquêteurs peuvent démonter et tester les instruments météorologiques. En hiver, ils doivent aussi envisager la possibilité d'une accumulation de givre sur les instruments météorologiques. Durant les périodes de précipitation verglaçante, par exemple, l'accumulation de glace peut réduire l'efficacité ou causer la défaillance totale des anémomètres, limitant ainsi la validité des données sur le vent. Les mêmes observations s'appliquent aux instruments de bord. Dans ces cas, les enquêteurs sur les conditions météorologiques auront tout avantage à travailler en collaboration avec d'autres groupes.

5.1.30 Les techniques de collecte et d'affichage des renseignements météorologiques peuvent varier d'un État à l'autre et il faut donc vérifier les capacités et les limites de ces outils (technologie radar, imagerie satellitaire haute résolution, etc.). Il ne faut pas oublier non plus que les phénomènes atmosphériques peuvent limiter la technologie, par exemple, lorsque des équipages s'engagent dans des zones d'orage ou de grêle par suite de faux échos radar dus à l'atténuation radar causée par l'absorption.

5.1.31 Les prévisions météorologiques se sont améliorées en général grâce surtout à une meilleure précision des modèles de prévision numérique du temps (NWP) et à la disponibilité mondiale des prévisions du système mondial de prévisions de zone (SMPZ), mais malgré ces améliorations, les limites des modèles peuvent restreindre la précision et l'exactitude des prévisions.

Analyse des données sur les facteurs humains

5.1.32 Une comparaison des prévisions météorologiques, des mesures prises par l'équipage de conduite et des dangers éventuels identifiés par l'enquêteur peut mettre en évidence des erreurs de jugement de la part de l'équipage. Affirmer simplement que les pilotes ont rencontré des conditions météorologiques défavorables n'explique pas pourquoi ils se sont trouvés dans cette situation. L'enquêteur doit s'efforcer, avec l'aide du Groupe des facteurs humains/performances, de comprendre pourquoi l'équipage a cru qu'il prenait les bonnes décisions au moment où il les a prises. Plusieurs facteurs humains peuvent empêcher un équipage de conduite de prendre une bonne décision dans le cas des conditions météorologiques : il peut s'agir d'un manque de connaissances dû à une formation déficiente ou d'une mauvaise communication des renseignements météorologiques et des normes d'exploitation.

5.1.33 Le processus général d'enquête sur les facteurs humains est semblable quelles que soient les méthodes employées, mais les techniques privilégiées sont différentes. Certaines mettent l'accent sur les oublis et les omissions de la direction ou de l'organisation, tandis que d'autres traitent de manière plus approfondie les problèmes de performances et d'erreurs humaines (intervenants de première ligne)⁸. Les deux niveaux doivent être examinés pour permettre une analyse complète.

8. Livingston, A.D., Jackson, G., et Priestley, K. (2001). *Root causes analysis: Literature review*. Suffolk, UK: HSE Books.

5.2 ENQUÊTE SUR LES SERVICES DE LA CIRCULATION AÉRIENNE

5.2.1 Généralités

5.2.1 Les circonstances d'un accident peuvent rendre souhaitable l'institution d'un groupe d'enquête sur les services de la circulation aérienne (ATS), comprenant un enquêteur spécialiste de ces services. Les États qui n'emploient pas d'enquêteurs spécialistes des services ATS ou qui n'ont pas accès à leurs services peuvent faire appel à un agent des services de la circulation aérienne d'expérience (étranger à l'accident) pour fournir un avis d'expert et aider l'enquêteur désigné à examiner tous les problèmes de circulation aérienne concernant l'accident. Il peut être bon d'inclure dans l'enquête confiée à ce groupe d'autres domaines connexes tels que les communications, les installations d'aérodrome et la navigation (dans la mesure où elle est liée à l'équipement au sol). Les renseignements tirés de l'enquête sur les services ATS pourront être inclus dans les sections applicables du rapport final.

5.2.2 Les services ATS sont assurés dans le but d'empêcher les collisions entre aéronefs et les collisions entre les aéronefs et les obstacles sur l'aire de manœuvre, d'accélérer et de régulariser la circulation aérienne, de fournir des renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace des vols et de signaler aux organismes appropriés les aéronefs qui requièrent l'aide des services de recherches et de sauvetage. S'il y a lieu, l'enquête doit examiner tous les services d'information aéronautique et de renseignements opérationnels assurés par des fournisseurs de services.

5.2.3 Le détail des transactions et la reconstitution détaillée de l'accident devraient fournir des indices permettant de vérifier la progression du vol depuis l'étape de l'établissement du plan de vol jusqu'au moment de l'accident en passant par les diverses fonctions assurées par les fournisseurs de services ATS concernés, par exemple, contrôle au sol, contrôle d'aérodrome, contrôle des départs, contrôle régional (ou de route aérienne) et contrôle d'approche. Dans certains cas, il peut être nécessaire de pousser l'enquête au-delà de l'accident, par exemple, jusqu'aux opérations de recherches et de sauvetage ou d'urgences en vol faisant intervenir les services ATS. L'enquête sur les services de la circulation aérienne doit, dans la mesure du possible, utiliser des simulateurs, l'infographie et des vidéos pour reconstituer l'accident.

5.2.4 Il peut être nécessaire de vérifier l'efficacité des services ATS, particulièrement dans un accident où il y a eu violation des normes de proximité des aéronefs soit en vol, soit sur l'aire de manœuvre. Dans ces cas, il y a lieu d'examiner de près les éléments suivants :

- a) l'emplacement de la tour de contrôle et la visibilité depuis la tour ;
- b) les installations des centres et des organismes ATS connexes ;
- c) le personnel ATS, son effectif, ses qualifications (licences) et la supervision du personnel ;
- d) les horaires de travail et de repos du personnel ATS ;
- e) l'adéquation des procédures et des pratiques spécifiées, notamment pour assurer les minimums de séparation selon l'homologation de l'aéronef pour l'espace aérien RVSM ;
- f) l'adéquation de l'équipement, notamment des systèmes de surveillance ATS, des voyants lumineux, des jumelles et des dispositifs anti-éblouissants.

5.2.5 Il est important de déterminer l'heure exacte de l'accident. La première indication de l'heure approximative de l'accident sera vraisemblablement fournie par les centres et organismes ATS qui sont en liaison avec l'aéronef. Dès que les transcriptions des enregistrements de communications radiotéléphoniques sont disponibles, il est généralement possible de déterminer l'heure de l'accident à environ une minute près. Il est parfois possible d'obtenir une plus grande

précision : si l'aéronef est équipé d'un enregistreur de données de vol, d'un enregistreur de conversations ou d'un équipement de surveillance dépendante automatique, il sera généralement possible de déterminer l'heure de l'accident à une ou deux secondes près. Il est important de déterminer la période sur laquelle doit porter l'enquête puisqu'elle définit les données, les enregistrements et le personnel qui doivent être examinés durant l'enquête.

5.2.6 En cas d'écrasement, les enregistrements de sismomètres situés suffisamment près du lieu de l'accident pour détecter l'impact peuvent servir à déterminer l'heure de l'accident avec une plus grande précision. Il ne faut rien négliger pour déterminer aussi exactement que possible l'heure de l'accident pour pouvoir tirer parti des informations que l'on peut obtenir de la synchronisation des enregistreurs avec la base de temps de l'enregistrement radiotéléphonique.

5.2.7 Le groupe de spécialistes ATS doit tenir compte du fait que l'évolution parallèle de l'industrie du transport aérien et des systèmes et des concepts de gestion du trafic aérien (ATM), peut représenter une difficulté pour l'enquête étant donné que la responsabilité de la prestation de certains services change en fonction du contrat de fourniture d'un service particulier (par ex., la séparation), qui sera actualisé durant les opérations en temps réel.

5.2.8 L'évolution des systèmes et des concepts ATM rend l'ensemble du système encore plus complexe. Le processus d'enquête doit examiner de très près la gestion de la prestation des services pour déterminer quelles personnes sont effectivement intervenues dans le processus qui a mené à l'accident. En fait, toute la communauté ATM pourrait être en cause étant donné que tout membre de la communauté ATM peut avoir participé de manière importante au processus, compliquant ainsi l'enquête.

5.2.9 Le système ATM devient de plus en plus complexe. Les méthodes scientifiques et analytiques classiques ne sont pas bien adaptées à la dynamique des systèmes ATM complexes. Les méthodes analytiques, la logique déductive, les procédures formelles à base de règles et les algorithmes fermés seront probablement insuffisants pour mener à bien l'enquête. Il faudra adopter une approche connexionniste parce qu'elle est intrinsèquement plus adaptée à la complexité du système ATM envisagé dans le concept opérationnel d'ATM mondiale. Les caractéristiques clés qui contribueront à la complexité du système ATM sont notamment sa distributivité, son auto-organisation et son fonctionnement à partir d'informations locales sans commande centrale.

5.2.10 Par contre, la disponibilité de la gestion de l'information à l'échelle du système facilitera la collecte des données nécessaires à l'enquête.

Antécédents du personnel

5.2.11 L'étude de tous les faits concernant les services ATS constitue une partie importante de l'enquête sur les services ATS et peut aussi s'appliquer à certains points des enquêtes sur l'exploitation et les facteurs humains. Comme ces aspects sont étroitement liés, la collecte et l'évaluation des faits qui se rapportent à l'accident doivent être étroitement coordonnées de manière à tirer pleinement parti des renseignements obtenus.

Dossier personnel

5.2.12 Il convient d'obtenir les renseignements suivants pour chaque agent ATS ayant un lien avec l'accident :

- a) nom complet ;
- b) coordonnées (adresse et numéros de téléphone) ;
- c) date de naissance ;
- d) type de licence/certificat ATS ;

- e) durée totale de service ;
- f) durée de service continu à l'emplacement concerné ;
- g) qualifications détenues et date à laquelle elles ont été obtenues ;
- h) poste de travail occupé au moment de l'accident ;
- i) dossiers des contrôles de compétence ;
- j) antécédents médicaux (maladies récentes, dernier examen médical, enquête sur le facteur de fatigue, avec une évaluation du temps de service et du temps de repos au cours des 28 jours qui ont précédé l'accident et particulièrement au cours de la semaine et des 72 heures qui ont précédé l'accident ;
- k) formation initiale et périodique (y compris les évaluations) ;
- l) utilisation de verres correcteurs et/ou anti-éblouissants.

5.2.13 Pour obtenir ces renseignements, l'enquêteur devra peut-être obtenir plusieurs déclarations (peut-être celles d'autres agents des services ATS ayant travaillé avec la personne concernée) et utiliser en particulier les données ATS enregistrées lors de vols précédents ainsi que la lecture des données de vol de l'aéronef enregistrées à bord au cours de phases précédentes du vol. L'ampleur des renseignements nécessaires dépend de la nature de l'accident.

Activités avant, durant et après l'accident

5.2.14 L'évaluation des activités du personnel ATS doit être effectuée de la même manière que l'évaluation des activités du personnel dans les enquêtes sur l'exploitation et les facteurs humains. Il faut tenir compte des éléments suivants :

- a) *Avant l'accident.* L'enquêteur doit en particulier examiner :
 - 1) les activités au cours des 72 heures qui ont précédé l'accident, en s'attachant tout spécialement aux facteurs psychologiques susceptibles d'avoir eu une incidence sur les performances du personnel ATS concerné, à leur état physique par rapport au cycle travail-repos et à l'irrégularité des repas, ainsi qu'à l'évaluation de leurs rythmes de sommeil ;
 - 2) les circonstances et distances du trajet jusqu'aux centres et organismes ATS, y compris les activités de préparation avant de commencer le service ;
 - 3) les activités et la charge de travail depuis le début de la période de service au poste de travail. On peut normalement obtenir et confirmer ces renseignements par des déclarations et/ou des données imprimées ou enregistrées électroniquement.
- b) *Activités au moment de l'accident.* D'après les renseignements indiqués ci-dessus, l'enquêteur doit s'efforcer de reconstituer le rôle, la charge de travail et le comportement de chaque membre du personnel ATS durant les phases successives de l'accident. Il peut aussi être utile d'examiner, avec le concours du Groupe des facteurs humains, la contribution de facteurs tels que la disposition du poste de travail, l'environnement opérationnel, l'affichage de la progression du vol, la présentation et les commandes des équipements, etc.

- c) *Activités après l'accident.* Il est possible que le rôle de l'enquêteur et les renseignements utiles pour la conduite de l'enquête ne se limitent pas au déroulement du vol et de l'accident. Il faut également évaluer les activités du personnel ATS immédiatement après l'accident, telles que l'organisation des opérations de recherche et de sauvetage, s'il y a lieu, et la relève du service opérationnel.

Établissement du plan de vol

5.2.15 Pour de nombreux vols, un plan de vol est établi et déposé auprès des organismes ATS. Ce plan fournit à l'enquêteur certains renseignements précis qui nécessitent un examen détaillé. De plus, dans le cas d'un vol commercial, l'équipage de conduite établit habituellement, avec l'aide des agents techniques d'exploitation, un plan de vol technique détaillé ou une feuille de navigation que l'enquêteur peut utilement examiner. L'exploitant conserve généralement le double de ces documents. Dans le cas des accidents mettant en jeu des questions de navigation ou de performances de l'aéronef, il est nécessaire de vérifier les plans de vol et les feuilles de navigation pour s'assurer que les données graphiques ou tabulées (ou le programme informatique) qui ont servi de base à l'établissement des plans convenaient aux circonstances particulières du vol prévu, par exemple, aux conditions météorologiques, au type et au modèle d'aéronef, à l'altitude de croisière, etc.

5.2.16 Même si la question ne se pose que rarement lors des vols commerciaux en service régulier, il est souvent utile, spécialement dans le cas des vols effectués à la demande par des aéronefs légers et des vols d'instruction, de s'efforcer de déterminer les intentions de l'équipage en ce qui concerne le vol et les diverses manœuvres prévues.

5.2.17 L'examen de l'efficacité des processus d'établissement des plans de vol doit tenir compte les éléments suivants :

- a) exigences de l'établissement du plan de vol ;
- b) dépôt, type et contenu du plan de vol ;
- c) opération prévue ;
- d) renseignements opérationnels obtenus/fournis.

Installations et services de voies aériennes

5.2.18 L'enquête sur les services ATS doit aussi examiner et présenter tous les faits concernant l'état opérationnel et l'état de fonctionnement des installations et des services situés le long des voies aériennes avant, pendant et après l'accident. Elle doit déterminer, enregistrer et vérifier l'exactitude de tous les renseignements pertinents à l'aide d'une liste de contrôle. Les éléments suivants peuvent s'appliquer ou non selon l'état des installations, des services et de la technologie considérés :

- a) traitement de l'information aéronautique ;
- b) affichages des renseignements météorologiques ;
- c) traitement des données de surveillance ;
- d) traitement des données de vol ;
- e) traitement des données du réseau local et étendu ;

- f) réseau du service fixe des télécommunications aéronautiques ;
- g) réseau de télécommunications aéronautiques ;
- h) liaisons de communications vocales et de données air-sol du service mobile aéronautique ;
- i) liaisons de communications vocales et de données interorganismes et intraorganismes ;
- j) surveillance locale et à distance des installations et registre d'état ;
- k) planification et traitement dynamiques des routes aériennes ;
- l) navigation et communications par satellite ;
- m) prévision et évitement de conflits/collisions ;
- n) schémas, dessins et notes de l'exploitant sur les installations et les services.

Moyens et procédures de communication et expressions conventionnelles

5.2.19 Les communications avec les services ATS (qui peuvent varier avec les caractéristiques du secteur dans lequel se trouve l'aéronef) sont soit enregistrées, soit consignées dans des livres d'écoute par les services intéressés. Toutefois, l'enquêteur ne doit pas omettre la possibilité d'obtenir des renseignements sur les communications à partir d'autres sources telles que les enregistreurs de données de vol et de conversations du poste de pilotage, les autres aéronefs au sol et/ou d'autres stations sol civiles ou militaires à l'écoute sur les mêmes fréquences. S'il y a lieu, il convient également d'examiner toutes les communications par liaison de données du réseau de communication de l'exploitant, y compris celles des fournisseurs commerciaux de communications et d'information aéronautiques.

5.2.20 La plupart des États fournissent des enregistreurs analogiques et numériques aux centres et organismes ATS. Les enregistrements peuvent couvrir non seulement les communications air-sol voix et données, mais aussi les communications vocales, radio, par satellite et par ligne terrestre entre les divers services ou stations au sol (échanges sur les mouvements aériens et la coordination du contrôle, échanges entre agents ATS et agents météorologistes, véhicules de lutte contre l'incendie, etc.). Les enregistreurs peuvent être soit « à commande audio » (moyen économique puisque le support d'enregistrement ne fonctionne que pendant la transmission de messages mais, dans certains cas, la chronologie peut être difficile à rétablir parce que les premières syllabes peuvent être brouillées), soit de type « continu » (très exigeant pour le support d'enregistrement qui fonctionne même entre la transmission de messages, mais ils permettent d'établir facilement la chronologie puisque la continuité dans le temps est normalement disponible).

5.2.21 Dans un cas comme dans l'autre, les enregistreurs multipistes simultanés permettent d'enregistrer des signaux horaires synchronisés sous plusieurs formes (connexion avec une horloge parlante fournie comme accessoire avec l'enregistreur ou à d'autres fins : signaux temporels codés ou en langage clair). Il est donc possible d'obtenir une référence chronologique exacte, car les enregistrements sur les différentes pistes sont naturellement synchronisés. Les règlements nationaux relatifs à la conservation de ces enregistrements varient quelque peu, la période minimale étant de l'ordre de 30 jours. Il est toutefois souhaitable que l'enquêteur s'assure le plus tôt possible au cours de l'enquête, de préférence au moyen de procédures d'exploitation normalisées applicables dans l'éventualité d'un accident, que tous les enregistrements susceptibles d'avoir un lien avec vol soient retirés du système quotidien normal et mis en lieu sûr en attendant ses instructions. Il est également souhaitable que la transcription des enregistrements soit effectuée sous la supervision d'un membre de l'équipe d'enquête sur les services ATS (du point de vue de la sûreté, ces observations s'appliquent aussi à tous les documents qui concernant le vol). Il peut être utile d'établir un chronogramme des communications des stations du service mobile et des stations au sol, y compris les échanges sur les systèmes d'intercommunication.

5.2.22 Lorsqu'ils existent, ces enregistrements constituent une source très importante de renseignements pour l'enquête sur les services ATS. Les lectures sont, en général, assez faciles mais nécessitent quand même quelques précautions essentielles :

- a) les enregistrements originaux doivent être manipulés et entreposés avec le plus grand soin (il ne faut jamais oublier qu'ils risquent de se détériorer ou de s'effacer) ;
- b) il est sage de faire, chaque fois que cela est possible, une ou plusieurs copies des enregistrements originaux et d'utiliser ces copies pour la plupart des écoutes lorsqu'il n'est pas absolument indispensable d'utiliser l'enregistrement original ;
- c) il faut évidemment utiliser la même référence temporelle pour reconstituer la chronologie de tous les documents ; il incombe donc à l'enquête sur les services ATS de fixer le repère horaire de référence et de déterminer les différences entre les heures indiquées ou utilisées dans les enregistrements provenant de diverses sources ;
- d) il est nécessaire de synchroniser la référence horaire des enregistrements de communications avec celle des enregistreurs de bord de l'aéronef.

5.2.23 Les transcriptions des lectures des enregistrements seront vraisemblablement utilisées par des personnes qui n'ont pas écouté les bandes et qui, en outre, peuvent provenir de différents centres ou organismes des services ATS ; il convient donc de fournir certains renseignements précis avec chaque transcription et d'adopter une présentation uniforme :

- a) une page d'introduction doit indiquer l'origine de l'enregistrement, la ou les fréquences enregistrées, la période couverte par la transcription, la raison pour laquelle la transcription a été faite, les transcrip-teurs ainsi que le lieu et la date de la transcription (et peut-être aussi le lieu où se trouvent les enregistrements originaux) ;
- b) chacune des pages suivantes doit contenir au moins les colonnes suivantes :
 - 1) indications de temps ;
 - 2) stations émettrices ;
 - 3) stations réceptrices ;
 - 4) éléments lus sans difficulté ;
 - 5) éléments incertains ou inintelligibles ;
 - 6) observations du ou des transcrip-teurs.

5.2.24 Pour faciliter la consultation, l'enquêteur sur les services ATS jugera peut-être utile de souligner dans le texte du message le ou les mots énoncés au moment de chaque signal horaire.

5.2.25 L'enquête sur les services ATS doit aussi examiner et présenter tous les faits concernant l'état opérationnel, les performances et l'état de fonctionnement des installations de communication, y compris les procédures de communication normalisées et les expressions conventionnelles pour la période s'appliquant à l'accident. En notant soigneusement la qualité des communications, l'enquêteur peut les analyser de manière plus détaillée pour déterminer si elles contiennent d'autres aspects utiles à l'enquête ou s'il convient de les envoyer au Groupe de l'exploitation. Il peut être possible, par exemple, de déterminer les sources microphoniques, les phénomènes météorologiques (pluie, éclairs,

statique, etc.), le bruit de fond, le brouillage par une analyse spectrographique et les niveaux d'anxiété des différentes personnes par les changements dans la qualité ou le ton de la voix. Le calcul de la portée optique par rapport à l'aéronef et aux émetteurs/récepteurs peut aussi donner des informations de distance utiles. Les erreurs de journalisation ou d'anticipation (collationnement/écoute de collationnement) des membres d'équipage et du personnel ATS doivent aussi être examinées pour déterminer s'ils ont joué un rôle dans l'accident. Les éléments suivants peuvent s'appliquer aux communications :

- a) liaison air-sol-air employée (VHF, UHF, HF, liaison de données, etc.) ;
- b) emplacement et altitudes topographiques des stations, réseaux, schémas de configuration de la couverture des aides air-sol-air ;
- c) intercommunications de Terre et par satellite ;
- d) étalonnage de l'équipement ATS ;
- e) fréquences et caractéristiques de propagation ;
- f) techniques téléphoniques et microphoniques ;
- g) procédures normalisées d'appel, de réponse et d'accusé de réception ;
- h) identification de l'organisme ou du service ;
- i) mots, expressions et langage normalisés clairs et non ambigus utilisés dans les communications ;
- j) erreurs ou omissions de collationnement/d'écoute de collationnement.

Navigation

5.2.26 Les aspects relatifs à la navigation peuvent, selon le cas, relever de l'enquête sur les services ATS. Les moyens et l'équipement de navigation indiqués comme étant à bord de l'aéronef doivent être vérifiés au regard des dossiers de l'aéronef. Les installations de navigation peuvent comprendre des installations au sol, telles que les NDB, VOR, DME, ILS, LORAN et l'équipement de surveillance ATS, ainsi que des systèmes spatioportés, comme le GNSS et son renforcement. L'enquête doit aussi examiner les aspects relatifs à la navigation d'un accident impliquant un aéronef utilisant comme moyen unique de navigation un système basé sur le GPS.

L'examen de chaque installation de navigation au sol doit porter sur les points suivants :

- a) emplacement (coordonnées géographiques) ;
- b) signal d'identification ;
- c) puissance de sortie et alimentation ;
- d) systèmes de surveillance et d'avertissement ;
- e) étalonnage de l'équipement et diagramme de rayonnement ;
- f) calendriers d'exploitation et de maintenance et notifications correspondantes (AIP, NOTAM) ;

- g) niveau normal de performances ;
- h) brouillages ;
- i) plaintes, interruptions et défaillances antérieures (équipage, fonctionnement, etc.) ;
- j) déclarations du personnel concerné, y compris d'autres équipages de conduite ayant utilisé ces aides.

5.2.27 Lorsque les données de navigation proviennent du GNSS, l'enquête devra enregistrer des données GNSS aussi bien pour le système de renforcement que pour la constellation GNSS de base utilisés pour l'opération. Les paramètres à enregistrer dépendent du type d'opération, du système de renforcement et des éléments de base employés. Tous les paramètres auxquels ont accès les utilisateurs dans une zone de service donnée doivent être enregistrés à des endroits représentatifs de la zone de service.

5.2.28 Dans le cas des constellations GNSS de base, il est recommandé d'enregistrer les éléments contrôlés suivants pour tous les satellites visibles :

- a) rapport porteuse/densité du bruit (C/N_0) (pour les satellites observés) ;
- b) mesures brutes de la phase du code et de la phase de la porteuse utilisées pour les mesures de pseudo-distance (pour les satellites observés) ;
- c) messages de navigation par satellite diffusés (pour tous les satellites visibles) ;
- d) données pertinentes sur l'état du récepteur d'enregistrement.

5.2.29 Dans le cas du SBAS, il est recommandé d'enregistrer les éléments contrôlés suivants pour tous les satellites géostationnaires visibles en plus des éléments contrôlés du système de base du GNSS indiqués ci-dessus :

- a) rapport porteuse/densité du bruit (C/N_0) (pour les satellites géostationnaires observés) ;
- b) mesures brutes de la phase du code et de la phase de la porteuse utilisées pour les mesures de pseudodistance (pour les satellites géostationnaires observés) ;
- c) messages de données SBAS diffusés ;
- d) données pertinentes sur l'état du récepteur.

5.2.30 Dans le cas du GBAS, il est recommandé d'enregistrer les éléments contrôlés suivants en plus des éléments contrôlés du SBAS et du système de base du GNSS indiqués ci-dessus (au besoin) :

- a) niveau de puissance de la VDB ;
- b) données sur l'état de la VDB ;
- c) messages de données GBAS diffusés.

5.2.31 S'il est soupçonné pour une raison quelconque qu'une aide de navigation peut avoir contribué à l'accident, l'enquêteur sur les services ATS doit immédiatement demander des vérifications spéciales au sol et en vol. Des vérifications normalisées doivent être prescrites par les États et les aides de navigation qui ont été utilisées, ou qui ont pu être utilisées par un aéronef impliqué dans un accident lié à la sécurité aérienne.

5.2.32 L'enquêteur doit examiner, non seulement les résultats des vérifications spéciales au sol et en vol, mais également les résultats des vérifications régulières précédentes (évaluation du site, essais de mise en service et vérifications périodiques récentes).

5.2.33 Il y a lieu de souligner la valeur de ces vérifications en raison des différences possibles entre l'état de l'équipement au moment de l'accident et son état au moment de la vérification au sol ou en vol.

Installations d'aérodrome

5.2.34 Selon les circonstances de l'accident, l'enquêteur sur les services ATS peut avoir à examiner et à vérifier l'état de nombreuses installations d'aérodrome que l'aéronef accidenté a utilisées ou aurait pu utiliser, notamment les éléments suivants :

- a) caractéristiques des pistes en service ;
- b) caractéristiques des aires de mouvement ;
- c) caractéristiques du terrain environnant, obstacles et caractéristiques météorologiques ;
- d) schémas d'aérodrome ;
- e) balisage lumineux et signalétique ;
- f) systèmes électroniques de détection des mouvements à la surface ;
- g) procédures d'exploitation normalisées, d'urgence et en situation d'urgence ;
- h) aides de navigation visuelles et électroniques ;
- i) réseaux de communication ;
- j) conditions environnementales ;
- k) registre indiquant l'état des installations.

Performances de l'aéronef

5.2.35 L'enquête sur les services ATS doit déterminer, enregistrer et vérifier l'exactitude de tous les renseignements concernant les performances réelles de l'aéronef accidenté. Il convient notamment de comparer les performances de vol prévues aux performances réellement obtenues. L'enquêteur peut obtenir des renseignements utiles des données enregistrées, des observations, des photos, des témoins oculaires ou d'autres membres des services ATS ou d'équipages de conduite se trouvant dans le voisinage.

5.2.36 Le choix des données d'observation à collecter et à analyser dépend des circonstances de l'accident. Il est très souhaitable cependant que, dans la mesure du possible, l'enquêteur examine l'original, plutôt qu'une copie, des données enregistrées. Il peut être nécessaire dans certains cas que le Groupe de l'exploitation examine les données qui ont servi de base à la définition des performances indiquées dans le manuel de vol afin d'en confirmer la validité par rapport aux circonstances particulières du vol considéré.

5.2.37 L'enquête doit déterminer, enregistrer et vérifier l'exactitude de tous les renseignements sur les activités des services ATS concernant la conformité du vol, ce qui peut inclure l'analyse des résultats attendus des instructions, de l'information et des avis du contrôle de la circulation aérienne par rapport aux résultats réellement obtenus. La reconstitution des profils horizontal et vertical du vol à l'aide de données factuelles peut être un moyen utile de déterminer les connaissances et les attentes des agents ATS en ce qui concerne les performances de l'aéronef dans le système ATS. Par exemple, l'autorisation donnée respectait-elle l'enveloppe de performances de l'aéronef ou l'aéronef a-t-il été dirigé vers des conditions météorologiques ou un terrain dangereux, etc. Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) connaissance des performances et des limites de l'aéronef ;
- b) reconstitution des profils de vol pertinents ;
- c) validité et conformité du plan de vol ;
- d) navigation horizontale et verticale ;
- e) opérations d'urgence de l'aéronef dans l'environnement opérationnel.

Procédures et pratiques d'exploitation normalisées

5.2.38 Bien que le rôle de l'enquêteur sur les services ATS ne soit pas de s'occuper des questions disciplinaires relatives au respect des règlements et des consignes, l'enquête doit nécessairement établir si les consignes et les normes d'exploitation, procédures et pratiques applicables ont été respectées. Tous les éléments pertinents doivent également être examinés en fonction de l'accident pour déterminer s'ils étaient appropriés et suffisants pour assurer la sécurité des opérations et s'ils étaient présentés sous une forme facilement compréhensible. Il faut aussi considérer les avantages pour la sécurité et la prévention de recommander un réexamen des directives, normes d'exploitation, procédures et pratiques existantes ou l'élaboration de nouveaux éléments. Lors de cet examen, il est important de distinguer entre les éléments qui ont un caractère obligatoire et ceux qui ont un caractère consultatif. Les directives, normes d'exploitation, procédures et pratiques peuvent se présenter sous de nombreuses formes. Il est important d'examiner et d'évaluer tous les aspects de l'enquête tels que l'écoulement du trafic, la dynamique hors des voies aériennes ou le suivi direct, le guidage et les manœuvres d'attente qui peuvent avoir contribué à l'accident. Il faut notamment vérifier les points suivants :

- a) législation nationale ;
- b) Annexes de l'OACI ;
- c) Procédures de l'OACI pour les services de navigation aérienne ;
- d) manuels des services de la circulation aérienne et circulaires d'instruction ;
- e) guides et/ou instructions pour les postes de travail/secteurs ;
- f) copies des lettres d'entente ;
- g) carte de la zone de responsabilité ;
- h) exigences de coordination avec les autres organismes ;
- i) publications d'information aéronautique ;

- j) normes applicables de proximité d'aéronefs ;
- k) NOTAM ;
- l) préparation, traitement et affichages de la progression des vols ;
- m) procédures de changement de niveau et procédures applicables aux niveaux de vol non standard ;
- n) procédures de communication, de navigation et de surveillance.

Entrevues avec les témoins

5.2.39 L'enquêteur sur les services ATS ne doit pas oublier qu'il doit se conformer aux législations nationales et que, dans certains États, c'est à la police qu'il incombe de recueillir les déclarations des témoins durant une enquête sur un accident. Selon les circonstances de l'accident, il peut être utile d'instituer un Groupe des témoins chargé de localiser les témoins et de les interroger. Dans ce cas, le Groupe doit normalement s'occuper de recueillir les déclarations des « témoins oculaires » qui se trouvaient au voisinage de l'accident. Les entrevues qui concernent d'autres groupes, par exemple, le groupes des structures, de l'exploitation, etc., sont habituellement menées par un enquêteur faisant partie de ce groupe. Une des principales tâches de l'enquêteur consiste à recueillir les indices auprès des témoins ; les renseignements ainsi obtenus peuvent fournir une piste permettant d'obtenir d'autres indices pour compléter ou préciser les faits déjà présentés. Toutefois, l'enquêteur ne doit pas oublier que tout le monde peut se tromper et il doit faire preuve d'une grande prudence lorsqu'il analyse des déclarations qui sont manifestement en contradiction avec les indices matériels établis ou des tentatives d'éloigner l'enquête de la prévention des accidents et du renforcement de la sécurité.

5.2.40 Les États doivent déterminer s'il convient d'obtenir des déclarations écrites de toutes les personnes ayant assuré les services ATS pour l'aéronef accidenté. L'enquêteur doit déterminer les avantages d'une reconstitution de l'accident et d'une récapitulation complète des faits entourant l'accident, notamment la participation de tout autre service ATS. Il est important de repasser les enregistrements originaux pour aider à recréer les circonstances de l'accident en temps réel. Durant ces premières étapes de l'enquête, l'enquêteur doit assimiler la connaissance que les divers membres du personnel ATS ont des circonstances et des événements liés à l'accident afin de pouvoir planifier efficacement l'enquête. Il est utile d'établir un calendrier et une liste des personnes à interroger et d'obtenir des locaux appropriés pour mener les entrevues.

Reconstitution du vol

5.2.41 Les systèmes de surveillance ATS et/ou les données numériques synthétiques sont des données essentielles pour reconstituer la progression des vols pertinents et pour présenter les profils horizontaux et verticaux qu'il convient d'analyser. Il peut être nécessaire aussi d'analyser d'autres vols qui ne sont pas directement liés à l'aéronef accidenté.

5.2.42 Les États utilisent divers systèmes d'enregistrement et de reproduction, qui vont du filmage image par image à intervalles réguliers (une image par balayage) des points représentant les aéronefs en mouvement sur des écrans, à l'enregistrement électronique numérique de paramètres définis en formats binaires. Les données sont normalement conservées pendant au moins un mois et ne sont utilisées qu'en cas d'accident.

5.2.43 La reconstitution de la dernière phase du vol, c'est-à-dire celle de l'accident, nécessite une coordination étroite entre de nombreux groupes d'enquête mais elle peut intéresser le Groupe de l'exploitation. Il faut tenter de construire une image complète des derniers événements dans l'ordre où ils se sont produits et d'évaluer les relations entre eux. La durée à couvrir dépend des circonstances ; en général, elle doit commencer au moment où l'aéronef

s'écarter des paramètres opérationnels normaux et elle peut se terminer au moment de l'accident ou plus tard, à un moment significatif pour l'enquête. S'il faut synchroniser les programmes d'affichage et audio, il est important de définir clairement le point de départ. Ces données peuvent aussi constituer un lien essentiel avec les données obtenues par les autres groupes d'enquête et elles constitueront la base de la reconstitution lorsqu'elles seront combinées aux enregistrements disponibles de toutes les activités au sol et à bord.

5.2.44 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) norme de séparation ;
- b) trajectoires relatives ;
- c) proximité horizontale et verticale ;
- d) services de surveillance disponibles/assurés ;
- e) manœuvres d'évitement ;
- f) conditions de vol ;
- g) systèmes anticollision disponibles ;
- h) évaluation de la proximité des aéronefs.

Déroulement du vol

5.2.45 La reconstitution des données du système de surveillance ATS peut mettre en lumière des points importants de l'enquête sur l'exploitation par rapport aux autres domaines de l'enquête sur l'accident. Il peut également arriver que les caractéristiques de l'accident exigent non seulement la reconstitution du vol de l'aéronef accidenté, mais celle de vols antérieurs.

5.2.46 Même si l'enquête doit surtout porter sur la phase du vol au cours de laquelle s'est produit l'accident, il est généralement souhaitable d'analyser le déroulement du vol tout entier. La reconstitution des affichages peut aider l'enquête sur des accidents tels que les quasi-collisions en vol et fournir des données pour établir la proximité des aéronefs. L'enquête doit tenir compte d'anomalies de logiciel et d'affichage telles que :

- a) l'échange de plots ;
- b) l'échange de blocs de données ;
- c) l'échange de pistes radar d'aéronefs cibles avec d'autres aéronefs et/ou fausses cibles ;
- d) de mauvais blocs de données ;
- e) des fouillis d'échos ;
- f) des blocs de données se détachant des cibles assignées ;
- g) des symboles de cibles déplacés.

5.2.47 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) dispositifs d'affichage ;
- b) symboles ;
- c) blocs de données, leaders et orientation ;
- d) réglages ;
- e) notes de l'opérateur de l'écran ;
- f) procédures d'identification des aéronefs ;
- g) entrées capteurs ;
- h) mappage d'affichage ;
- i) diagrammes de couverture ;
- j) cartes de marges de franchissement du terrain ;
- k) code SSR ;
- l) numéro de piste radar du système de visualisation ;
- m) alertes et alarmes du système ;
- n) point de rapprochement maximal.

Reconstitution du profil de vol

5.2.48 Dans des cas de violation de proximité des aéronefs, de collisions en vol et d'impacts au sol, l'enquête doit établir, enregistrer et vérifier les profils de vol réels sur le plan horizontal et vertical de l'aéronef concerné. La reconstitution n'est limitée que par les données provenant de toutes les sources de données enregistrées disponibles obtenues par les services de la circulation aérienne ou des enregistreurs de bord, lorsqu'ils sont disponibles. La reconstitution doit être vérifiée au regard des déclarations des témoins.

5.2.49 Le choix et la disponibilité des données dépendent des circonstances particulières de l'accident faisant l'objet de l'enquête. Il est très souhaitable cependant que, dans la mesure du possible, l'enquêteur examine l'original, plutôt qu'une copie, des données enregistrées. Il peut être nécessaire dans certains cas que le Groupe de l'exploitation obtienne des données de performances de l'aéronef et les examine pour reconstituer le profil de la trajectoire de vol et le comparer aux données du constructeur, et déterminer s'il s'applique aux circonstances particulières du vol considéré.

5.2.50 L'enquête doit déterminer, enregistrer et vérifier l'exactitude de tous les renseignements sur la conformité du vol sur le plan horizontal et vertical. La reconstitution peut inclure l'analyse des résultats réels et attendus des instructions, de l'information et des avis donnés par le contrôle de la circulation aérienne à l'aéronef accidenté. La reconstitution des profils de vol sur le plan horizontal et vertical, qui combine les références chronologiques et géographiques obtenues des données vérifiées, peut être un moyen très utile pour l'enquête sur les services ATS de reproduire la progression du vol dans le système des services de la circulation aérienne.

5.2.51 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à la reconstitution des profils de vol et aux différences entre le profil de vol réel et le profil prévu :

- a) trajectoire et écarts sur le plan horizontal ;
- b) trajectoire et écarts sur le plan vertical et écarts soudains d'altitude ;
- c) vitesse ascensionnelle/descensionnelle ;
- d) vitesse(s) sol ;
- e) intervalles de temps estimés/réels ;
- f) points de cheminement et canevas géographique.

Obligations et fonctions des services ATS

5.2.52 L'enquête doit obtenir, enregistrer et vérifier tous les documents concernant les dispositions et/ou instructions locales prescrivant les obligations et fonctions de tous les postes de travail ATS ayant un lien direct ou indirect avec l'accident. L'enquête doit aussi examiner l'efficacité de ces documents et de la normalisation pour s'assurer que les renseignements pertinents ont été communiqués à l'aéronef concerné et au personnel ATS pertinent sans tarder et conformément aux procédures d'exploitation normalisées prescrites.

5.2.53 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à chaque agent ou poste de travail des services de la circulation aérienne ayant un lien avec l'accident :

- a) obligations et fonctions ;
- b) zone de responsabilité ;
- c) responsabilités de gestion du trafic aérien ;
- d) responsabilités de coordination.

Pratiques de travail et effectifs

5.2.54 Selon les circonstances de l'accident, il pourrait être utile pour l'enquête sur les services ATS d'examiner les pratiques de travail et les effectifs en place durant la période entourant l'accident. Lorsqu'ils sont disponibles, les documents doivent être recueillis et vérifiés. L'examen de ces documents doit être complété par les déclarations du personnel ayant un lien avec les circonstances de l'accident.

5.2.55 Il convient d'examiner les questions relatives aux pratiques de travail et aux effectifs qui se rapportent à l'accident afin de déterminer :

- a) si les règlements et les procédures d'exploitation normalisées applicables sont satisfaisants et s'ils ont été appliqués ;
- b) si la charge de travail était excessive pour le personnel disponible ;
- c) si les renseignements pertinents ont été utilisés efficacement.

5.2.56 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) pratiques de travail prescrites ;
- b) effectifs réels et effectifs requis ;
- c) conditions/exigences en matière de licences et de personnel ;
- d) conditions/exigences en matière d'expérience récente et de qualifications ;
- e) formation initiale et périodique.

Postes de travail

5.2.57 Il est essentiel que l'enquête sur les services ATS examine, outre l'environnement opérationnel de l'aéronef, les postes de travail du service mobile et les postes connexes. Il est nécessaire d'examiner non seulement l'efficacité des transactions et de la reconstitution détaillées des événements pour confirmer la progression du vol, mais aussi les interfaces humain-machine de l'ensemble du système. Il est important dans ce cas de définir clairement où doit commencer et où doit se terminer l'enquête sur l'accident.

5.2.58 L'enquête doit déterminer la configuration d'exploitation et les caractéristiques ergonomiques du poste de travail utilisé ainsi que les affichages des informations opérationnelles et de la situation aérienne. La collecte, le collationnement et la vérification de tous les éléments pertinents tels que les affichages de la progression du vol, les cartes, le matériel, les logiciels, les commandes et la présentation sont des éléments essentiels des scénarios de reconstitution.

5.2.59 Il est important d'analyser en profondeur les systèmes et sous-systèmes des postes de travail pour déterminer s'ils étaient appropriés dans les circonstances de l'accident et leur incidence éventuelle sur des accidents futurs similaires. Il peut aussi être utile d'examiner les effets de l'éclairage, de la charge de travail et des distractions autour du poste de travail. Il faut aussi examiner la cohérence des documents (par ex., cartes aéronautiques) utilisés par le personnel ATS et les membres d'équipage, et déterminer les questions qui doivent être renvoyées au Groupe des facteurs humains.

5.2.60 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) cartes utilisées dans les affichages ;
- b) affichage de la situation aérienne et de la progression du vol ;
- c) affichage des informations opérationnelles ;
- d) ergonomie des postes de travail ;
- e) modifications, état de fonctionnement, configuration des systèmes actifs et état opérationnel des postes de travail ;
- f) configuration et état opérationnel des systèmes de communication ;
- g) casques d'écoute et microphones.

Séquence de traitement tactique et stratégique du trafic

5.2.61 L'examen de tous les faits liés à la séquence de traitement tactique et stratégique du trafic ATS doit être considéré comme un élément essentiel de la reconstitution du déroulement du vol.

5.2.62 Les renseignements obtenus, tels que les écarts horizontaux et/ou verticaux non autorisés, peuvent aussi intéresser les enquêtes sur l'exploitation et sur les facteurs humains. Étant donné que ces aspects sont souvent étroitement liés, il faut soigneusement recueillir, vérifier et évaluer les faits pertinents pour utiliser au mieux les renseignements obtenus. La séquence de traitement tactique est normalement enregistrée sur un support et vérifiée par une analyse détaillée des données et des déclarations du personnel. La séquence de traitement et la planification stratégiques peuvent être une tâche plus difficile et exiger la tenue d'entrevues plus sélectives et plus approfondies pour déterminer le traitement prévu du trafic et les résultats escomptés.

5.2.63 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à la détermination des effets et des résultats du traitement tactique (court terme/immédiat) et stratégique (long terme/plus tard) :

- a) approches et départs en espace aérien de région terminale ;
- b) espace aérien en route ;
- c) attentes et déroutements ;
- d) flux de trafic, modifications de vitesse et assignation de niveaux ;
- e) trajectoires de vol à l'intérieur et en dehors des voies aériennes ;
- f) gestion de l'information sur le trafic aérien ;
- g) séquençement et priorisation.

Position des aéronefs

5.2.64 L'enquête sur les services ATS doit tenter d'établir et de reconstituer la position réelle des aéronefs durant une certaine période avant l'accident et au moment précis de l'accident. Les données enregistrées de l'affichage de la progression des vols fournit normalement toutes les informations essentielles pour reconstituer la position horizontale et verticale des aéronefs en vue de l'analyse. Il est important aussi qu'en plus de reconstituer la position réelle des aéronefs, l'enquête donne au personnel ATS la possibilité d'exposer leurs vues et d'expliquer leur estimation de la situation. Il est possible, par exemple, qu'on ait assigné par mégarde à un aéronef un cap ou un niveau différent de celui qu'avait prévu le personnel ATS qui avait charge de l'aéronef.

5.2.65 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à la reconstitution de la position des aéronefs et des écarts possibles entre les trajectoires de vol réelles et prévues de chaque aéronef actif :

- a) compétence sur l'espace aérien ;
- b) routes et points de cheminement ATS ;
- c) distance ;

- d) azimut ;
- e) niveau ;
- f) trajectoire ;
- g) circuit d'attente ;
- h) effets des conditions météorologiques ;
- i) minimums de séparation verticale et horizontale.

Coordination des flux d'information et messages sur les mouvements des aéronefs

5.2.66 La gestion sûre, ordonnée et rapide du trafic aérien dépend totalement de l'échange d'informations précises au moment opportun, de la coordination des flux d'information et de la diffusion des messages sur les mouvements des aéronefs dans tout le système ATS. Le processus est aussi important que les informations et les instructions fournies à l'équipage de conduite et constitue un élément essentiel de toute enquête sur les services ATS. Il exige :

- a) une totale compréhension des responsabilités de chacun ;
- b) une application rigoureuse ;
- c) une formation complète ;
- d) des communications non ambiguës.

5.2.67 Pour recueillir ces informations, l'enquêteur doit obtenir des déclarations du personnel concerné et utiliser à fond les données enregistrées des services ATS. L'ampleur des renseignements nécessaires dépend de la nature de l'accident. Selon la nature de l'accident, les éléments suivants, en tout ou en partie, peuvent aider à déterminer la coordination des flux d'information et la diffusion des messages sur les mouvements des aéronefs, en provenance et à destination du personnel et des organismes ATS, situés au même endroit ou à distance :

- a) responsabilités de chaque organisme ;
- b) communications entre les organismes ;
- c) communications à l'intérieur d'un même organisme ;
- d) diffusion des messages sur le mouvement et le contrôle des aéronefs ;
- e) gestion des changements de fréquences ;
- f) expressions conventionnelles ;
- g) erreurs et omissions de collationnement/d'écoute de collationnement ;
- h) données et notes d'affichage de la progression des vols.

Conscience de la situation

5.2.68 Combinés à des communications et des installations efficaces, les affichages des aéronefs et les affichages opérationnels donnent au personnel ATS les indices nécessaires pour élaborer et communiquer des instructions et informations essentielles aux aéronefs. Les aéronefs peuvent suivre des trajectoires de vol prédéfinies sur les voies aériennes publiées ou la trajectoire de vol privilégiée par l'utilisateur (4-D). En pratique, n'importe quel organisme des services de la circulation aérienne peut avoir la responsabilité de plusieurs aéronefs suivant des trajectoires 4D. Comprendre la conscience de la situation fait partie intégrante de l'enquête sur les services ATS. Les renseignements obtenus, tels que les différences réelles ou perçues dans la conscience du personnel ATS de la position et de la distance des aéronefs, peuvent aussi intéresser les enquêtes sur l'exploitation et sur les facteurs humains. Un grand nombre de ces aspects sont souvent étroitement liés et il faut soigneusement recueillir, vérifier et analyser les informations.

5.2.69 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) position active et prévue des aéronefs ;
- b) affichage de la progression des vols ;
- c) communications ;
- d) réglages des commandes et de la présentation des dispositifs ;
- e) performances des aéronefs ;
- f) conditions météorologiques réelles et prévues ;
- g) configuration opérationnelle de l'espace aérien, instructions et limites ;
- h) terrain et autres obstacles.

Techniques d'assurance de la séparation

5.2.70 Des techniques, procédures et pratiques tactiques et stratégiques efficaces de gestion du trafic aérien sont essentielles à la mise en œuvre de techniques d'assurance de la séparation dans le système ATS. L'assurance de la séparation, plutôt que l'établissement de la séparation, devient importante dans une enquête sur les services ATS lorsque les normes de proximité des aéronefs prescrites ont été transgressées en raison de défaillances humaines ou des systèmes. Il existe de nombreuses situations où les normes de proximité des aéronefs peuvent être transgressées même si tous les aéronefs respectent les instructions ou informations reçues. Par exemple, deux aéronefs volant correctement au même niveau peuvent converger vers un même point de cheminement au même moment prévu. C'est en général une question de temps pour que les organismes des services ATS constatent des problèmes éventuels de proximité des aéronefs, y répondent et appliquent les mesures correctrices nécessaires avant qu'il y ait violation d'une norme prescrite. L'enquête sur les services ATS doit déterminer si l'assurance de la séparation requise était en place et si elle aurait pu être maintenue en cas de défaillance d'un ou de plusieurs composants du système ATS tels que les installations de communication ou de surveillance.

5.2.71 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à la détermination de la planification et de la mise en œuvre continue et efficace des techniques d'assurance de la séparation :

- a) procédure choisie pour la séparation verticale et horizontale ;

- b) traitement tactique et stratégique du trafic, notamment procédures pour la prise en charge d'aéronefs non homologués pour l'espace aérien RVSM ;
- c) voies aériennes et installations et services de communication disponibles ;
- d) systèmes d'avertissement de conflit ;
- e) exécution rapide ;
- f) suivi et surveillance du trafic ;
- g) réévaluation des résultats.

Charge de travail et distractions

5.2.72 La charge de travail désigne les tâches exécutées par le personnel ATS par rapport à un ensemble donné de conditions, d'environnement et de complexité de la circulation aérienne. Elle est plus subjective qu'objective dans le processus d'évaluation et la personne concernée est normalement la mieux placée pour évaluer la charge de travail et toute distraction qui aurait pu contribuer à un accident concernant la sécurité aérienne. Par exemple, lorsque tout le trafic est traité de manière sûre, ordonnée et rapide et qu'aucune situation anormale ou d'urgence n'est présente, une personne peut considérer sa charge de travail comme légère. Par contre, si le volume de trafic est diminué de moitié mais que la complexité ou les opérations anormales augmentent, la même personne considérera peut-être sa charge de travail comme modérée ou élevée. Dans de rares occasions, la charge de travail peut dépasser la capacité du système et la capacité de l'agent ATS de prendre en charge la situation, conduisant à un incident grave touchant à la sécurité aérienne.

5.2.73 Les distractions qui surviennent dans le voisinage immédiat du poste de travail peuvent aussi contribuer à augmenter la charge de travail sans que la personne au poste de travail ne s'en rende compte. Par exemple, un niveau de bruit élevé peut exiger de la personne au poste de travail qu'elle demande de répéter un échange de communications, ce qui a pour effet de réduire par la suite le temps de traitement de l'information. De mauvais moyens de communication peuvent aussi rendre difficile d'obtenir le compte rendu ou la réponse requis. L'évaluation objective de la charge réelle de travail et des distractions concernant l'accident fait partie intégrante de l'enquête sur les services ATS et peut aussi intéresser les enquêtes sur l'exploitation et sur les facteurs humains.

5.2.74 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident, à la détermination de la charge de travail :

- a) communications ininterrompues ;
- b) coordination en temps voulu ;
- c) dimensions et configuration de l'espace aérien ;
- d) combinaison de types d'aéronefs ;
- e) performances des aéronefs ;
- f) activités opérationnelles et non opérationnelles dans le voisinage du poste de travail ;
- g) complexité des tâches ;

- h) fatigue ;
- i) état de fonctionnement des installations ;
- j) temps de mise en file d'attente et de traitement de l'information ;
- k) reconnaissance de la saturation des tâches ;
- l) techniques de réduction des tâches ;
- m) traitement des alarmes système et de la file d'attente des messages.

Détection des conflits et filet de sauvegarde

5.2.75 Les nombreuses défenses intégrées au système ATS constituent un filet de sauvegarde qui le protège des erreurs humaines et des erreurs des systèmes. Ces défenses comprennent l'obligation de collationner certaines instructions, de signaler et d'afficher les points de cheminement, des structures de routes ATS unidirectionnelles, des niveaux normalisés, des procédures normalisées de départ et d'arrivée aux instruments et des systèmes embarqués et au sol d'avertissement de conflit. Elles visent à réduire au minimum les risques de conflits de circulation causés par des erreurs ou des omissions de l'équipage de conduite ou du personnel ATS. Dans de nombreux cas cependant, la plupart des défenses pour détecter les conflits, et l'intégrité du filet de sauvegarde, dépendent de la conscience de la situation tactique et stratégique des personnes, c'est-à-dire de la conscience de l'ensemble de la situation. Les cas de transgression des normes de proximité des aéronefs sont le résultat de la non-détection des conflits ou d'une rupture de l'intégrité du filet de sauvegarde. Dans la plupart des cas, les différentes couches des défenses du filet de sauvegarde fonctionnent de manière à protéger le système ATS et les participants. Par exemple, si une autorisation incorrecte est transmise à un aéronef, l'équipage de conduite peut se rendre compte que les instructions ne s'appliquent pas à son aéronef et l'indiquer au personnel ATS, ou le personnel ATS peut détecter une erreur ou une omission lorsqu'il examine ou actualise l'affichage de la progression des vols. La rupture des défenses du système, avec pour conséquence une violation des normes de proximité des aéronefs, ou une collision, est souvent le résultat d'une suite de facteurs. L'enquête sur les services ATS a pour tâche d'établir, d'enregistrer et de vérifier les facteurs causaux et de formuler les mesures de sécurité appropriées. L'emploi d'une liste de contrôle est utile pour obtenir les renseignements qui permettent de déterminer comment le conflit a été détecté et les caractéristiques du filet de sauvegarde. Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) conscience de la situation ;
- b) plan tactique et stratégique ;
- c) affichage de la progression des vols ;
- d) communications ;
- e) flux d'information ;
- f) systèmes d'avertissement et d'évitement des conflits.

Examen des pratiques de gestion de l'espace aérien

5.2.76 Lorsqu'il se produit une collision en vol ou au sol ou lorsque l'accident survient durant la montée initiale ou l'approche, les enquêteurs doivent évaluer la gestion de l'espace aérien où s'est produit l'accident. Dans le cas d'un vol

en régime de vol aux instruments ou en espace aérien réservé aux aéronefs volant en régime de vol aux instruments, la conformité à la configuration de l'espace aérien national et à l'autorisation de voler dans cet espace aérien est essentielle pour comprendre les circonstances de l'accident. Ces cas présentent de nombreux éléments liés aux services ATS. Les enquêteurs doivent examiner les questions suivantes tant du point de vue des services ATS que de celui de l'exploitant.

5.2.77 Dans presque tous les cas, l'enquête sur les services ATS doit obtenir et vérifier tous les documents concernant les dispositions et/ou instructions locales prescrivant les pratiques opérationnelles normalisées de gestion de l'espace aérien. L'enquête doit aussi examiner l'efficacité de ces documents et de la normalisation pour s'assurer que les pratiques de gestion de l'espace aérien applicables à l'espace aérien dans lequel volait l'aéronef concerné et à toute autre autorité ATS ont été correctement et rapidement appliquées. L'enquête doit notamment examiner le statut de l'espace aérien et les conditions, règles ou procédures spéciales en vigueur au moment de l'accident, par exemple, espace aérien contrôlé, non contrôlé, avec application de RVSM ou désactivé.

5.2.78 Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) établissement de l'espace aérien et statut juridique ;
- b) autorité administrative et de contrôle ;
- c) limites de l'espace aérien contrôlé et non contrôlé ;
- d) fourniture de services de la circulation aérienne ;
- e) espace aérien à usage spécial, interdit, réglementé et zones dangereuses ;
- f) exigences en matière de coordination ;
- g) autorisations de route, autorisations de blocs et réservations d'espace aérien ;
- h) priorités de circulation ;
- i) activités militaires ;
- j) plans nationaux d'urgence ;
- k) limites de l'espace aérien RVSM et zones de transition.

En route

5.2.79 Durant la phase de croisière, l'aéronef vole généralement à une altitude assignée, qui est communiquée par les services ATS ou qui est déterminée d'après des règles spécifiques. Les aéronefs volant en régime de vol à vue, par exemple, doivent voler à une altitude spécifique durant la phase de croisière (multiple impair ou pair de milliers de ft plus 500 ft s'ils volent au-dessous du FL290), selon la direction. En régime de vol aux instruments, les services ATS assignent une altitude conforme aux critères de franchissement d'obstacles et d'espacement entre aéronefs établis par l'État. Le passage d'un État, d'une FIR ou d'une partie de l'espace aérien à un(e) autre peut entraîner des changements de configuration de l'espace aérien qui doivent être évalués et comparés aux actions de l'équipage.

Procédures de région terminale

5.2.80 Les procédures de région terminale reposent sur deux facteurs : les performances de l'aéronef et l'équipement utilisé, tant au sol qu'à bord de l'aéronef. Lorsqu'une procédure est assignée à un équipage, le contrôleur

suppose que l'aéronef a la capacité et l'équipement requis pour exécuter la procédure assignée. Ces informations sont souvent communiquées dans le plan de vol, mais c'est à l'équipage de conduite qu'il incombe d'accepter la procédure en étant conscient de ces facteurs. Par exemple, il peut être physiquement possible pour un équipage d'exécuter, avec un seul goniomètre installé, une approche au radiophare non directionnel (NDB) exigeant deux goniomètres embarqués. Sans l'équipement désigné, cependant, l'équipage peut ne pas être capable de garantir la marge de franchissement du relief, ce qui se produira de plus en plus souvent avec l'emploi de plus en plus généralisé des systèmes GPS. Il est relativement facile pour un pilote qui utilise un GPS de suivre une route-sol représentée sur une approche pour laquelle l'aéronef n'est pas adéquatement équipé, mais il est impossible de représenter la marge de franchissement du relief et la proximité d'autres aéronefs. Les approches au GPS doivent être certifiées par l'État, comme toute autre procédure.

Montée

5.2.81 Il se peut que la phase de montée exige une marge de franchissement d'obstacles et une pente de montée spécifiques. La disponibilité des données publiées sur les procédures est essentielle pour que l'équipage comprenne les restrictions imposées. Les spécifications de conception doivent être évaluées par rapport à la trajectoire, au départ normalisé ou aux vecteurs fournis par les contrôleurs.

Approche et atterrissage

5.2.82 Les procédures d'arrivée, comme celles de montée, sont soumises à des critères de conception spécifiques. Plusieurs approches peuvent être disponibles pour une piste désignée. Une procédure d'arrivée conçue pour canaliser la circulation peut être assignée de manière à garantir la marge de franchissement du relief et la séparation des aéronefs. Un écart par rapport à la trajectoire, à la vitesse ou à l'altitude risquent d'exposer un aéronef à des dangers qui ne sont pas représentés dans la procédure publiée.

5.2.83 Si un accident survient pendant qu'un aéronef exécute une procédure publiée, les enquêteurs doivent examiner la carte d'approche effectivement utilisée par l'équipage de conduite vu que les approches publiées peuvent provenir de plusieurs sources. Les approches publiées sont normalement d'abord conçues par l'organisme national chargé de cette tâche. Les cartes d'approche disponibles sur le marché sont fondées sur ces modèles mais elles ne font généralement l'objet d'aucun autre essai en vol. Les fournisseurs commerciaux peuvent ajouter des données sur la carte d'approche ou en modifier la représentation.

Procédures non normalisées

5.2.84 a) *Atténuation du bruit.* En raison de l'augmentation des populations riveraines de nombreux aéroports, la gestion aéroportuaire a été forcée d'appliquer des procédures qui sortent de l'ordinaire pour effectuer les montées au départ ou les arrivées en imposant un minimum de bruit aux populations. La procédure de montée exige que l'équipage, une fois que l'avion a décollé en toute sécurité, monte rapidement de manière à se trouver au-dessus d'une altitude préétablie au moment de sortir des limites de l'aéroport et la procédure d'approche peut exiger une pente plus prononcée que la normale. Dans d'autres cas, les aéronefs doivent effectuer un virage, même à basse altitude, pour survoler des zones moins sensibles au bruit. Même si ces procédures s'expliquent en conditions normales d'exploitation, un aéronef en situation d'urgence risque de se rapprocher dangereusement de ses limites de sécurité. Lorsqu'un équipage utilise fréquemment un aéroport, il peut finir par considérer la procédure comme « standard » et il risque de l'exécuter en situation d'urgence sans tenir compte de l'incidence de l'urgence sur la procédure. Ce cas fait appel à la « conscience » et à « l'attention », qui sont traitées dans le cadre des facteurs humains au Chapitre 16. Par exemple, l'équipage d'un aéronef qui subit une défaillance de moteur après le décollage peut réagir à la défaillance tout en continuant à cabrer l'avion pour exécuter la procédure normale d'atténuation du bruit au décollage.

b) *Changements de trajectoire/d'autorisation.* Lors de l'exécution d'une procédure d'approche ou de départ publiée, il n'est pas rare qu'un contrôleur de la circulation aérienne assigne un vecteur hors

route à l'aéronef. Les communications doivent être analysées si l'accident s'est produit à ce moment. Il y a eu des cas d'accidents où l'aéronef a heurté le terrain ou des obstacles parce que le pilote s'était fié au contrôleur pour maintenir la séparation entre l'aéronef et le terrain, les obstacles et les autres aéronefs.

5.3 INSTALLATIONS ET SERVICES D'AÉRODROME

Généralités

5.3.1 Lorsqu'un accident se produit à l'arrivée à un aérodrome, au départ d'un aérodrome ou à l'intérieur du périmètre de l'aérodrome, l'enquêteur doit évaluer les installations et les services de l'aérodrome pour déterminer s'ils ont contribué à l'accident. Les critères spécifiés dans l'Annexe 14 de l'OACI et les législations nationales ont pour but de maximiser la sécurité de ces installations et services pour l'exploitation des aéronefs. Tout écart par rapport aux normes établies doit être analysé à la lumière de l'accident, mais les enquêteurs doivent aussi évaluer les normes elles-mêmes pour déterminer si elles présentent des risques inacceptables pour l'aéronef ou ses occupants.

5.3.2 Vu l'évolution constante des normes applicables aux aérodromes, il n'est pas toujours possible pour tous les aéroports de respecter tous les critères. Dans certains cas, l'aéroport doit s'écarter de certaines normes pour poursuivre ses opérations. Les enquêteurs doivent être conscients de ces écarts et de la situation de l'aéroport par rapport aux normes en vigueur. Lorsqu'un aéroport n'a pas corrigé certains dangers permanents ou qu'il a décidé de ne pas se conformer à une certaine norme, l'enquêteur doit évaluer les conditions qu'il présente et déterminer si elles sont appropriées.

5.3.3 Selon les circonstances, l'enquêteur devra peut-être examiner et vérifier l'état de nombreuses installations et services d'aérodrome que l'aéronef accidenté a utilisés ou aurait pu utiliser (voir l'Annexe 14).

Pistes

Piste en service

5.3.4 Lorsque le décollage ou l'atterrissage fait directement partie de l'accident, l'enquêteur doit évaluer les éléments suivants et leur contribution éventuelle au déroulement de l'accident :

- a) dimensions (longueur et largeur) de la piste, prolongements d'arrêt et prolongements dégagés, bandes de pistes, aires de sécurité d'extrémités de pistes (RESA), zones de décélération et accotements ;
- b) emplacement du seuil au moment de l'accident pour déterminer :
 - 1) l'utilisation intentionnelle d'une longueur de piste inférieure à la longueur maximale de piste disponible ;
 - 2) si la position est visible de la tour de contrôle (angles morts) ;
- c) marques de piste, notamment les marques d'axe de piste, marques latérales et marques de zone de toucher des roues. Examiner aussi les marques d'identification de piste, marques de seuil, marques de distance constante et marques de point d'attente de circulation. Prendre également note de toute marque spéciale, par exemple, marques d'atterrissage avec arrêt en retrait, lignes d'entrée de voie de

- circulation à angle aigu, marques de décalage et/ou de déplacement de la piste et toute marque spéciale utilisée durant les opérations par faible visibilité, par ex., système de guidage et de contrôle des mouvements à la surface (SMGCS) ;
- d) panneaux de signalisation, notamment les panneaux indicateurs de point d'attente, d'aire critique ILS, de longueur de piste restante et de destination, selon le cas ;
 - e) balisage lumineux :
 - 1) d'approche (type, dimensions, couleur, intensité) ;
 - 2) VASI, PAPI et PLASI (vérifier l'alignement) ;
 - 3) de bord, de seuil et d'extrémité de piste (couleur, intensité et nombre, et emplacement des feux qui ne fonctionnent pas) ;
 - 4) d'axe de piste et d'axe de voie de circulation à angle aigu (couleur, intensité et nombre, et emplacement des feux qui ne fonctionnent pas) ;
 - 5) zone de toucher des roues, éclairage et emplacement des balises de longueur de piste restante, balisage d'atterrissage avec arrêt en retrait ;
 - 6) contraste entre l'éclairage de l'environnement de la piste et l'éclairage de fond, notamment les distractions telles que les lumières laser ou les événements spéciaux ;
 - f) altitudes et pentes de la piste et/ou de l'extrémité de la piste ;
 - g) types et description du revêtement (béton, asphalte, couche de frottement poreuse, gravier, etc.). Décrire aussi les mesures, la profondeur et l'état des textures superficielles destinées à réduire les effets de l'aquaplanage telles que les rainures ou tout autre type de traitement ;
 - h) état de la surface de la piste — décrire les quantités de contaminants, leurs textures et leurs tailles :
 - 1) type de surface ;
 - 2) condition existante (sèche, mouillée, présence de glace, de neige, etc.) ;
 - 3) accumulation excessive de caoutchouc ;
 - 4) présence de débris [possibilité de dommage par corps étrangers (FOD)] ;
 - 5) évaluer la fréquence et l'adéquation des horaires de balayage de la piste ;
 - i) mesure de la texture et du coefficient de frottement ; effectuer les mesures de la texture de la chaussée et les évaluations conformément au *Manuel des services d'aéroport*, 2^e Partie, s'il y a lieu, en employant un équipement approuvé de mesure continue du frottement (CFME) ;
 - j) force portante de la piste ;
 - k) dispositif d'arrêt d'aéronefs (présence d'équipement militaire sur les aérodromes civils et effet du contact avec cet équipement) ;

- l) obstacles, dangers de construction et frangibilité. Décrire les objets saillants et/ou les ornières, fossés, trous ou dépressions à l'intérieur ou au voisinage des aires de sécurité et vérifier le degré de frangibilité des marques ou des équipements situés près de la piste. Vérifier soigneusement s'il y a présence d'érosion sur les bases de support des objets frangibles, ce qui pourrait rendre les bases plus dangereuses que l'équipement qu'elles supportent ;
- m) travaux en cours (NOTAM ou ATIS applicables) ;
- n) dangers présentés par la faune — historique et description des programmes de l'aérodrome pour réduire les incursions d'animaux sur les aires réservées aux aéronefs. Examiner les NOTAM ou ATIS applicables, le cas échéant.

Autres pistes

5.3.5 Les enquêteurs doivent évaluer toutes les pistes disponibles en fonction de l'état de l'aéronef et de la nature de l'urgence, le cas échéant. L'assignation d'une piste par un contrôleur ou le choix d'une piste par l'équipage sont parfois dictés par la nécessité, ce qui est approprié dans ces cas. Dans d'autres cas, la piste est assignée ou choisie pour des raisons de commodité sans tenir compte des besoins réels. S'il y a lieu, les facteurs indiqués ci-dessus doivent être utilisés pour évaluer les autres pistes.

Voies de circulation

5.3.6 Le parcours des voies de circulation à destination ou en provenance de la piste en service doit être évalué. Comme dans le cas des pistes, l'assignation ou le choix d'un parcours doit être compatible avec l'aéronef et les circonstances. Les éléments suivants peuvent s'appliquer en tout ou en partie, selon la nature de l'accident :

- a) force portante ;
- b) adéquation des dimensions, accotements ;
- c) marques ;
- d) éclairage :
 - 1) voie de circulation (ligne axiale, bord, guidage et contrôle des mouvements à la surface, éclairage des panneaux de signalisation de l'aérodrome, etc.) ;
 - 2) chambres techniques d'éclairage de l'aérodrome et tableaux d'éclairage de la tour de contrôle, selon le cas ;
 - 3) phare d'aérodrome ;
 - 4) obstacles ;
- e) obstacles ;
- f) conditions existantes :
 - 1) sèches, mouillées, présence de glace, de neige, de neige fondante, etc. ;
 - 2) présence de débris [possibilité de dommage par corps étrangers (FOD)] ;

- 3) évaluer la fréquence et l'adéquation des horaires de balayage des pistes ;
- g) configuration :
 - 1) séquençement logique ;
 - 2) radar au sol ;
 - 3) angles morts ;
- h) type de surface et qualités de la surface ;
- i) travaux en cours (NOTAM ou ATIS applicables).

Aire de trafic

5.3.7 L'état de l'aire de stationnement des aéronefs doit être évalué en tenant compte des besoins de l'aéronef en cause. Les éléments suivants peuvent s'appliquer :

- a) force portante ;
- b) condition ;
- c) marques :
 - 1) signalétique ;
 - 2) zones « rouges » ;
 - 3) zones FOD ;
 - 4) marques peintes par-dessus d'autres marques ;
 - 5) marques d'arrêt de la roue avant ;
- d) éclairage (bords, projecteurs) ;
- e) obstacles ;
- f) passerelles d'embarquement ;
- g) proximité des pistes en service ;
- h) utilisation des véhicules d'aérodrome ;
- i) aires de point fixe ;
- j) angles morts.

Autres questions relatives aux aérodromes

Aides de navigation (NAVAIDS)

5.3.8 La présence d'aides de navigation et leur emplacement sont souvent un facteur dans la réussite (ou l'échec) des départs et des approches et atterrissages. La compatibilité de l'équipement de l'aéronef avec les aides de navigation disponibles détermine parfois le choix de la piste ou de l'approche.

Contrôle de la circulation aérienne

5.3.9 Le § 5.2 traite spécifiquement de l'enquête sur les services ATS, mais les enquêteurs doivent aussi examiner les pratiques et les procédures des mouvements à la surface. Dans les cas où les services ATS sont limités ou n'existent pas, les mouvements à la surface ne sont pas surveillés par l'organisme de contrôle. Dans ce cas, les pilotes sont responsables des mouvements à la surface, de l'autorisation de pénétrer dans la piste en service ou d'en sortir, et de leur propre autorisation de décoller ou d'atterrir.

Communications

5.3.10 Les communications entre aéronefs ou entre aéronefs et les services ATS se font normalement par radio. Les communications ont été liées à plusieurs facteurs d'accident et doivent donc être examinées par les enquêteurs.

Fréquence commune

5.3.11 Les opérations complexes exigent parfois des communications entre plusieurs contrôleurs ou organismes. L'utilisation de fréquences différentes pour différentes parties de l'aérodrome et différents contrôleurs complique les communications. Dans certains cas, le trafic aérien a communiqué avec un seul contrôleur sur deux bandes de fréquences distinctes (VHF et UHF, par exemple). C'est parfois le cas lorsqu'il y a des aéronefs militaires sur des aérodromes civils. Dans ce cas, chaque aéronef n'entend que la moitié des communications entre le contrôleur de la circulation aérienne et un autre aéronef, ce qui peut être source de confusion.

Emploi d'une seule fréquence

5.3.12 Lorsqu'un aéronef se trouve en situation d'urgence, il est beaucoup plus utile de ne lui assigner qu'une seule fréquence. Les contrôleurs de la circulation aérienne utilisent cette fréquence d'urgence lorsque le contrôle de l'aéronef est transféré d'un contrôleur à un autre. Cette pratique est une procédure plus simple pour l'équipage de l'aéronef. Les membres d'équipage sont aux prises avec une situation d'urgence et moins capables de faire des changements de fréquence que les contrôleurs qui prennent en charge l'aéronef de la croisière jusqu'à l'atterrissage.

Compétences linguistiques

5.3.13 Les normes de l'OACI exigent des pilotes et des contrôleurs de la circulation aérienne qu'ils aient un niveau déterminé de connaissances de la langue anglaise. Cependant, il arrive très souvent que dans les États non anglophones les communications aient lieu dans la langue nationale. Il a été démontré que cette pratique a contribué à plusieurs accidents parce que les communications n'étaient pas comprises par les divers équipages et contrôleurs concernés.

Services d'urgence et de sauvetage

Normes applicables aux aérodromes civils

5.3.14 L'Annexe 14, Chapitre 9, contient les spécifications de base sur les services de sauvetage et de lutte contre l'incendie aux aérodromes civils, notamment :

- a) service de lutte contre l'incendie :
 - 1) équipement ;
 - 2) personnel ;
 - 3) formation ;
- b) service de sauvetage :
 - 1) équipement ;
 - 2) personnel ;
 - 3) formation ;
- c) service de sauvetage sur l'eau, s'il s'applique à l'emplacement de l'aérodrome.

5.3.15 Les pratiques recommandées essentielles pour réduire les accidents d'aviation portent notamment sur :

- a) la catégorie du service de sauvetage et de lutte contre l'incendie fondée sur l'aéronef le plus gros ;
- b) l'intervention du service de sauvetage et de lutte contre l'incendie dans les deux minutes qui suivent l'alarme à la piste la plus éloignée ;
- c) l'entretien des voies d'accès d'urgence ;
- d) le système de communication spécialisé du service de sauvetage et de lutte contre l'incendie. Ce système doit desservir tous les organismes d'intervention, y compris la tour de contrôle. On a constaté cependant qu'il est utile que les intervenants du service de sauvetage et de lutte contre l'incendie puissent communiquer directement avec l'aéronef et cette possibilité doit être examinée si la survie est un facteur dans l'enquête.

Ressources d'entraide

5.3.16 Les services de sauvetage et de lutte contre l'incendie des aérodromes ont été élargis par l'incorporation des services municipaux et régionaux de sauvetage et de lutte contre l'incendie. Il a été constaté que lorsque ces services sont nécessaires en raison de la nature de l'accident et qu'ils sont disponibles, l'intervention après l'accident est meilleure. Les conditions suivantes doivent être examinées pour déterminer si les ressources d'entraide ont contribué à l'ensemble de l'intervention :

- a) alerte et notification de l'organisme ;
- b) points de rassemblement et itinéraire ;
- c) compatibilité de l'équipement avec les conditions de l'accident :
 - 1) lutte contre l'incendie ;
 - 2) communications ;
- d) formation du personnel de sauvetage et de lutte contre l'incendie participant à l'entraide ;

- e) incorporation de l'entraide dans les affectations de commande et de contrôle.

Documentation

5.3.17 Les enquêteurs doivent obtenir et examiner les documents concernant les éléments indiqués ci-dessus, notamment les suivants :

- a) AIP ;
- b) NOTAM et ATIS en vigueur ;
- c) carte d'obstacles d'aérodrome (OACI Type A) ;
- d) adéquation de la diffusion des renseignements pertinents ;
- e) dossiers de l'exploitant d'aérodrome (journaux des opérations, NOTAM, dossiers d'inspection de l'aérodrome, documents de planification et procès-verbaux, etc.).

5.4 GIVRAGE

Généralités

5.4.1 Les conditions givrantes potentiellement dangereuses peuvent être présentes non seulement en vol mais aussi au sol, avant le vol. Il a été démontré que des accumulations de glace de l'ordre de quelques centièmes de millimètre (millièmes de pouce) sur les surfaces critiques de l'aéronef réduisent considérablement la portance. Il est essentiel que rien ne dégrade les caractéristiques aérodynamiques de l'avion avant le décollage. Plusieurs accidents d'aviation ont été attribués à différents aspects du givrage au cours des dernières années. Les avions de transport lourds à turboréacteurs n'ont pas connu de problèmes de sécurité graves dans des conditions givrantes en vol, mais plusieurs accidents graves sont survenus durant le décollage en présence de conditions givrantes au sol, comme la neige ou la bruine se congelant. Par contre, les avions légers d'aviation générale et de transport régional ont subi des accidents graves dus à l'accumulation de glace durant le vol et durant le décollage en conditions givrantes au sol.

5.4.2 Dès 1950, certains États ont établi des règlements de l'aviation civile interdisant le décollage des avions lorsqu'il y avait présence de givre, de neige ou de glace sur les ailes, les hélices ou les gouvernes. Les effets du givrage sont nombreux et imprévisibles et dépendent de la conception de chaque avion. L'ampleur de ces effets dépend de nombreuses variables, mais ils peuvent être à la fois considérables et dangereux.

5.4.3 Les essais en soufflerie et en vol montrent que la formation, sur le bord d'attaque ou l'extrados d'une aile, de glace, de givre ou de neige d'une épaisseur et d'une rugosité semblables à celles d'un papier de verre à grain moyen ou gros peut causer une réduction de la portance de l'aile allant jusqu'à 30 % et une augmentation de la traînée allant jusqu'à 40 %. Ces changements de portance et de traînée augmentent considérablement la vitesse de décrochage, réduisent la manœuvrabilité et dégradent les caractéristiques de vol de l'avion. Des dépôts de givre, de glace ou de neige plus épais et plus rugueux peuvent avoir des effets de plus en plus marqués sur la portance, la traînée, la vitesse de décrochage et sur la stabilité et la maîtrise de l'avion, mais l'incidence la plus importante est la rugosité de la surface par rapport aux parties critiques d'une surface aérodynamique. La glace présente sur les surfaces critiques et sur la cellule peut aussi se détacher pendant le décollage et pénétrer dans les moteurs, ce qui risque d'endommager les aubes des soufflantes ou des compresseurs. La formation de glace sur les tubes de Pitot et les prises statiques ou sur les girouettes d'angle d'attaque peut fausser les mesures d'assiette, de vitesse anémométrique, d'angle d'attaque et de

puissance moteur, et fournir de mauvaises informations aux systèmes de données aérodynamiques. Il est donc impératif de ne pas tenter un décollage tant qu'il n'a pas été confirmé que toutes les surfaces critiques de l'avion, ainsi que toutes les sondes, sont libres de dépôts de neige, de givre ou de glace. Cette exigence cruciale est le « concept de l'aéronef propre ».

5.4.4 La plupart des avions utilisés dans les vols de transport commercial, ainsi que certains autres types d'avions, sont certifiés pour l'exploitation en conditions givrantes. Les avions ainsi certifiés sont conçus pour être capables de voler dans les conditions givrantes présentes dans les nuages d'eau surfondue et ont démontré cette capacité en vol. Ils possèdent un équipement de protection contre le givrage installé sur les surfaces critiques, comme les bords d'attaque, ou il a été démontré que la glace formée sur certains composants non protégés dans les conditions givrantes des nuages d'eau surfondue ne modifie pas de manière significative les performances, la stabilité et la maîtrise de l'avion. La formation de glace, de givre ou de neige sur ces surfaces au sol peut avoir des effets totalement différents sur les caractéristiques de vol de l'avion que la formation de glace en vol. L'exposition à des conditions météorologiques au sol qui peuvent conduire à la formation de glace peut causer l'accumulation de givre, de neige ou de glace sur des surfaces de l'aéronef où la protection fournie contre le givrage est conçue pour être utilisée en vol seulement. Les avions ne sont considérés en état de navigabilité et ne sont certifiés qu'après avoir subi des analyses et des essais exhaustifs. À l'exception des analyses et des essais destinés à confirmer les caractéristiques de vol d'un avion durant un vol en conditions givrantes, toutes les analyses et les essais de certification sont effectués avec un avion propre volant dans un environnement propre. La présence de formations de glace autres que celles qui sont prises en compte dans le processus de certification peut invalider la navigabilité de l'avion et il ne faut pas tenter de le faire voler tant qu'il n'est pas débarrassé des contaminants gelés.

5.4.5 La pratique développée par l'industrie au cours de nombreuses années d'expérience opérationnelle consiste à dégivrer ou à antigivrer un avion avant le décollage. Diverses techniques de traitement au sol ont été mises au point, la plus courante étant l'emploi d'agents d'abaissement du point de congélation (FPD) afin d'accélérer les processus de dégivrage et d'antigivrage et de laisser une pellicule protectrice de manière à retarder la formation de givre, de neige ou de glace sur les surfaces des aéronefs.

5.4.6 Lorsque les conditions au moment de l'accident indiquent qu'il était nécessaire d'appliquer la procédure de dégivrage/d'antigivrage au sol, les enquêteurs doivent évaluer l'adéquation de ces procédures et le dégivrage qui a été fait.

Givrage au sol

5.4.7 La recherche montre que des particules fines de givre de la taille d'un grain de sel, réparties avec une densité aussi faible qu'un grain par centimètre carré, peuvent détruire assez de portance pour empêcher l'aéronef de décoller.

5.4.8 Le givre peut s'accumuler sur les surfaces de l'aéronef lorsque ces surfaces sont au-dessous du point de congélation et que l'humidité de l'air est suffisante pour que la vapeur d'eau se transforme en petits cristaux de glace. La glace peut se former même quand la température extérieure est bien au-dessus de 0 °C (32 °F) : la température du carburant d'un aéronef équipé de réservoirs de voilure peut être suffisamment basse pour qu'elle abaisse la température du revêtement de la voilure jusqu'au-dessous du point de congélation. C'est le phénomène d'imprégnation par le froid. Cette situation peut aussi se présenter lorsqu'un aéronef vole à haute altitude pendant un certain temps puis descend rapidement pour effectuer un atterrissage dans un milieu humide. L'eau liquide qui entre en contact avec les ailes, dont la température est sous le point de congélation, gèle et adhère à la surface des ailes.

5.4.9 L'imprégnation par le froid peut aussi être causée par l'avitaillement avec un carburant froid. En présence de pluie ou d'une forte humidité, de la glace peut se former sur l'aile imprégnée de froid et s'accumuler avec le temps. Cette glace peut être invisible à l'œil nu et est souvent appelée givre transparent. Des plaques de glace qui se détachent de l'aile ou du fuselage pendant le décollage ou la montée peuvent pénétrer dans les moteurs fixés au fuselage et causer une extinction du moteur ou des dommages. Ces plaques de glace qui se détachent peuvent aussi endommager par impact des surfaces critiques comme l'empennage horizontal.

5.4.10 Le givre peut aussi se former sélectivement sur l'avion, s'accumulant sur certaines surfaces mais non sur d'autres. La plupart des pilotes savent que si un avion reste sur l'aire de trafic pendant la nuit à des températures inférieures au point de congélation et que l'humidité de l'air est suffisante, le givre apparaît au petit matin sur les extrados. Durant la nuit, les extrados rayonnent de la chaleur vers le ciel tandis que la chaleur rayonnée par les intrados vers le sol est renvoyée vers l'avion par le sol.

Précipitation qui gèle sur les extrados de l'avion

5.4.11 La pluie verglaçante est de l'eau surfondue qui se congèle dès qu'elle entre en contact avec une surface qui est à une température égale ou inférieure au point de congélation de l'eau. Même si la couche formée sur la surface est relativement lisse, les irrégularités de la surface peuvent sérieusement dégrader les performances aérodynamiques des surfaces portantes, réduisant leur capacité de produire la portance/poussée tout en augmentant la traînée. La pluie verglaçante est dangereuse tant au sol qu'en vol. En vol, elle frappe d'abord les bords d'attaque et gèle normalement en suivant l'écoulement des filets d'air. Au sol, l'écoulement est dirigé vers le bas.

5.4.12 En plus de modifier les caractéristiques aérodynamiques des surfaces portantes, la pluie verglaçante peut augmenter le poids de l'aéronef, bloquer les commandes de vol et obstruer la visibilité du pilote. La neige sèche est emportée par le vent dès que l'aéronef prend suffisamment de vitesse, mais la neige qui fond puis regèle est un problème beaucoup plus grave. Sa forme irrégulière peut sérieusement perturber l'écoulement de l'air sur les surfaces portantes, diminuant la portance et augmentant la traînée. La température du carburant dans les ailes d'un aéronef peut aussi être un facteur dans la formation de glace au sol. Si la température du carburant est au-dessous du point de congélation, le revêtement de l'extrados et de l'intrados des ailes peut être refroidi jusqu'à des températures inférieures au point de congélation même si la température de l'air ambiant est au-dessus du point de congélation. Si de l'eau liquide entre en contact avec cette structure ainsi refroidie, une mince plaque de glace peut se former.

Conséquences du givrage sur les surfaces portantes d'un avion

5.4.13 Les effets de l'accumulation de givre sur les surfaces de portance ne sont pas aussi importants que la formation de glace, mais même une faible quantité de givre peut avoir une incidence marquée sur leur capacité de produire la portance et créer de la traînée. La surface rugueuse du givre peut fortement altérer la nature de la couche limite ; elle la ralentit et en augmente l'épaisseur. Le décollement des filets d'air se produit à des angles d'attaque inférieurs à la normale et les coefficients de portance sont réduits aux angles d'attaque élevés. Il a été constaté que la formation d'une couche de givre épaisse et dure sur les bords d'attaque et les extrados d'une aile pouvait entraîner une réduction du coefficient de portance maximal allant jusqu'à 50 %.

5.4.14 Le décrochage causé par la présence de givre se produit aussi à des angles d'attaque inférieurs à la normale. Les vitesses de décrochage augmentent et la précision des dispositifs d'avertissement de décrochage, qui dépendent de la vitesse anémométrique ou de l'angle d'attaque, est aussi dégradée.

5.4.15 Il est possible qu'une accumulation de givre cause le décrochage des ailes lorsque le pilote tente un décollage à la vitesse normale de décollage. Pire encore, elle peut entraîner un mouvement de roulis rapide de l'avion qui peut s'écraser sur le sol à une assiette qui réduit les chances de survie de l'équipage et des passagers.

Effets de la pluie verglaçante et de la neige sur les surfaces portantes d'un avion

5.4.16 La présence de pluie verglaçante ou de neige gelée sur l'extrados d'une aile peut avoir des incidences encore plus importantes (que le givre) sur la capacité de l'aile de produire la portance et la traînée. En outre, la glace peut augmenter sensiblement le poids de l'aéronef, poids qui n'a pas été pris en compte dans le calcul du roulement au décollage, de la vitesse de décollage ni de la vitesse de montée initiale. La glace peut aussi se déposer dans les interstices et les cavités des commandes de vol primaires et/ou secondaires et en restreindre le mouvement. Elle peut aussi se déposer sur les prises Pitot-statiques non chauffées, qui ne fournissent plus l'information requise par l'équipage de conduite et d'autres systèmes.

Concept de l'aéronef propre

5.4.17 Lorsque les conditions sont propices au givrage des avions pendant les opérations au sol, aucun décollage ne doit être tenté si de la glace, de la neige, de la neige fondante ou du givre sont présents ou adhèrent aux ailes, aux hélices, aux gouvernes, aux prises d'air des moteurs ou à toute autre surface critique.

5.4.18 Un grand nombre de variables peuvent provoquer la formation de glace et de givre ou l'accumulation de neige et de neige fondante causant une rugosité sur la surface d'un avion. Citons notamment :

- a) la température ambiante ;
- b) la température du revêtement de l'avion ;
- c) l'intensité des précipitations et la teneur en humidité ;
- d) la température du liquide dégivrant/antigivrant ;
- e) la concentration du liquide dégivrant/antigivrant ;
- f) l'humidité relative ;
- g) la vitesse et la direction du vent.

5.4.19 Ces facteurs peuvent également modifier les capacités de dégivrage/antigivrage des liquides. C'est pourquoi il est impossible d'établir avec précision la durée de protection d'un liquide antigivrant.

5.4.20 De nombreuses techniques ont été mises au point pour assurer la mise en œuvre du concept de l'aéronef propre. Un dégivrage adéquat suivi d'une application de liquide antigivrant approprié constitue le meilleur moyen de protéger un avion contre la contamination. Une vérification visuelle ou tactile des surfaces critiques de l'avion doit être faite pour confirmer l'efficacité du traitement et la conformité de l'avion au concept de l'aéronef propre.

Méthodes de dégivrage et d'antigivrage

5.4.21 Une méthode élémentaire d'enlever la neige et la glace au sol est de balayer ce qui n'adhère pas aux surfaces et de gratter ce qui y adhère. Une autre méthode d'éviter l'accumulation de givre, de pluie verglaçante ou de neige sur un aéronef est de le protéger des éléments jusqu'à ce qu'il soit prêt à être utilisé, par exemple, en le mettant dans un hangar. Cependant, si le hangar n'est pas chauffé ou si l'aéronef demeure à l'extérieur à des températures inférieures au point de congélation, le givre peut se former sur les surfaces portantes et la neige fondue peut regeler aussi bien sur les surfaces portantes que dans les interstices des commandes.

5.4.22 La méthode la plus courante d'enlever la glace ou la neige des gros aéronefs commerciaux est d'employer des liquides dégivrants et/ou antigivrants. Le liquide dégivrant sert à enlever la neige et la glace accumulées sur la surface de l'aéronef, et le liquide antigivrant est utilisé pour empêcher ou retarder l'accumulation de neige ou de glace sur un aéronef déjà propre. Les deux liquides contiennent un agent d'abaissement du point de congélation (FPD) à base de glycol utilisé en solution pour produire un liquide dont la température de congélation est inférieure à la température ambiante et à la température de la surface de l'aéronef.

5.4.23 L'addition de glycol abaisse le point de congélation d'une solution aqueuse qu'elle soit en phase liquide ou en phase cristalline. À mesure que la glace fond dans la solution FPD, celle-ci s'affaiblit et son point de congélation remonte lentement vers la température de congélation normale de l'eau.

5.4.24 Il convient de noter que l'écoulement relativement rapide de l'air sur les ailes, avec une pression statique relativement faible, à l'angle d'attaque élevé caractéristique du décollage et de la montée initiale s'accompagne d'une baisse considérable de la température ambiante, ce qui peut faire geler l'eau sur l'extrados des ailes, eau qui était juste au-dessus du point de congélation et qui n'a pas été chassée des ailes pendant le roulement au décollage.

5.4.25 La montée à haute altitude et l'absorption de précipitation verglaçante additionnelle risque de réduire la température de la solution FPD au-dessous du point de congélation. Le dégivrage au sol n'a pas pour but d'assurer une protection contre l'accumulation de glace une fois que l'aéronef est en vol.

5.4.26 Les liquides de dégivrage/antigivrage sont habituellement chauffés et appliqués à l'aide de gicleurs montés sur des véhicules spécialisés. On utilise également des portiques de dégivrage/antigivrage, des équipements de pulvérisation portatifs, des moyens mécaniques (balais ou cordages), le rayonnement infrarouge et l'air comprimé.

5.4.27 Les liquides dégivrants/antigivrants sont appliqués le plus près possible du revêtement de l'avion afin de minimiser les pertes de chaleur. D'autres méthodes peuvent être nécessaires pour tenir compte des différences de conception des avions.

Vérifications du givrage/antigivrage au sol

5.4.28 Le pilote commandant de bord doit s'assurer avant le décollage de la conformité au concept de l'aéronef propre. Certaines vérifications doivent être faites avant que son avion puisse être autorisé à décoller. Elles peuvent être regroupées en trois catégories :

- a) vérifications précédant l'application de liquides dégivrants/antigivrants ;
- b) vérifications suivant l'application de liquides dégivrants/antigivrants ;
- c) vérifications spéciales, par exemple après un départ retardé ou un changement des conditions météorologiques.

Liquides dégivrants et antigivrants

5.4.29 La principale fonction des liquides dégivrants/antigivrants est d'abaisser le point de congélation des précipitations au fur et à mesure qu'elles se déposent sur l'avion, pour ainsi retarder l'accumulation de glace, de neige, de neige fondante ou de givre sur les surfaces critiques. Les liquides dégivrants/antigivrants appartiennent aux types I, II, III ou IV. Les liquides de type I ont une viscosité relativement basse qui varie principalement en fonction de la température tandis que ceux des types II, III et IV, qui contiennent un agent épaississant, ont une viscosité plus élevée qui varie en fonction des forces de cisaillement, de la proportion liquide-eau et de la température. Les liquides de types II, III et IV offrent une meilleure protection antigivrage que ceux de type I.

5.4.30 Tous les liquides dégivrants/antigivrants doivent respecter les critères d'utilisation de l'exploitant aérien, du producteur des liquides et de l'avionneur, et être produits conformément aux spécifications de l'ISO.

Liquides de type I

5.4.31 Les liquides de type I sont disponibles sous forme concentrée ou diluée (prête à utiliser). Les liquides concentrés contiennent un pourcentage élevé de glycol (éthylène, diéthylène, propylène glycol ou une combinaison de ces produits), mélangés à de l'eau, des inhibiteurs de corrosion, des agents mouillants, des agents antimoussants et parfois aussi un colorant.

5.4.32 Les liquides de type I doivent être chauffés pour que leur action dégivrante soit efficace. Les liquides de type I concentrés doivent être dilués avec de l'eau pour obtenir un point de congélation conforme à la procédure

d'application appropriée. Vu qu'il faut tenir compte des performances aérodynamiques et du point de congélation, les liquides de type I doivent souvent être de nouveau dilués avant d'être utilisés.

Liquides de types II, III et IV

5.4.33 Les liquides des types II et IV sont disponibles sous forme diluée et non diluée. Les liquides de types II et IV non dilués contiennent un pourcentage élevé d'éthylène, de diéthylène ou de propylène glycol, mélangés à de l'eau, des épaississants, des inhibiteurs de corrosion, des agents mouillants et parfois aussi à un colorant. La grande viscosité de ces liquides, combinée à l'action des agents mouillants, permet la formation d'une pellicule épaisse au moment de la pulvérisation sur l'avion. Pour une protection antigivrage maximale, les liquides des types II et IV doivent être utilisés non dilués. Toutefois, ils sont également employés dilués comme liquides dégivrants/antigivrants aux températures ambiantes élevées et par faible précipitation. Utilisés comme agents dégivrants, ils doivent être chauffés.

5.4.34 Les liquides de type III peuvent être un liquide de type II ou IV dilué qui satisfait aux essais de performance aérodynamique des avions à turbopropulseurs.

5.4.35 Les liquides de types II, III et IV sont caractérisés par une forte viscosité, si bien qu'ils produisent une couche plus épaisse que celle des liquides de type I quand ils sont appliqués sur les ailes. Pendant la course au décollage, l'écoulement de l'air les expose à une force de cisaillement qui réduit leur viscosité et permet au liquide de se détacher des parties critiques des ailes avant le cabrage.

5.4.36 Les précipitations diluent de façon constante tous les types d'agents d'antigivrage jusqu'à ce que la pellicule de liquide gèle ou que des dépôts gelés commencent à s'accumuler. En augmentant la viscosité du liquide (comme dans les liquides de type II ou IV), la pellicule est plus épaisse et, par conséquent, la quantité appliquée est plus grande, ce qui permet d'absorber un volume de précipitations plus grand avant que le point de congélation ne soit atteint. La durée de protection s'en trouve donc prolongée, ce qui est important en présence de précipitations verglaçantes nécessitant normalement des temps de roulage plus longs. La protection assurée par les liquides de type IV dure généralement plus longtemps que celle des liquides de type II ou III.

5.4.37 Il ne faut en aucune circonstance appliquer une autre couche de liquide antigivrant directement sur une couche qui a été contaminée. Il faut d'abord dégivrer les surfaces de l'avion, puis appliquer la couche finale de liquide antigivrant.

Manipulation des liquides dégivrants et antigivrants

5.4.38 Tous les liquides antigivrants doivent être manipulés conformément aux recommandations de leur fabricant, aux règlements sur la santé et l'environnement et aux instructions des exploitants aériens.

5.4.39 Les propriétés protectrices des liquides des types II, III et IV se dégradent en présence de contaminants, pendant un transport ou un entreposage inadéquats, à la suite d'un chauffage excessif ou d'une exposition à des forces de cisaillement excessives pendant leur transport ou leur utilisation.

5.4.40 Les méthodes de contrôle de la qualité spécifiées dans le programme approuvé de l'exploitant aérien pour la manipulation des liquides dégivrants/antigivrants doivent toujours être rigoureusement respectées.

Durées de protection

5.4.41 La durée de protection est la période de temps estimée où le liquide antigivrant empêche la formation de glace ou de givre et l'accumulation de neige sur les surfaces protégées (traitées) d'un avion. La durée de protection est établie en mettant les liquides à l'épreuve dans une gamme de conditions de température et de précipitation simulant les diverses conditions météorologiques hivernales.

5.4.42 De nombreux facteurs susceptibles de modifier les capacités de dégivrage/antigivrage et la durée de protection des liquides ont été identifiés. En voici quelques-uns :

- a) type et intensité des précipitations ;
- b) température ambiante ;
- c) humidité relative ;
- d) direction et vitesse des vents ;
- e) température du revêtement de l'avion ;
- f) type de liquide dégivrant/antigivrant, ainsi que sa concentration et sa température.

C'est pourquoi il est impossible d'établir avec précision la durée de protection d'un liquide antigivrant.

5.4.43 L'exploitant doit publier, sous forme de tableau ou de diagramme, les durées de protection en fonction des diverses conditions possibles de givrage au sol, des différentes catégories de liquides utilisés et des différentes concentrations de ces liquides. Plusieurs durées de protection sont recommandées pour une condition particulière afin de tenir compte, dans une certaine mesure, des variations possibles des conditions météorologiques locales, et surtout de la température du revêtement de l'avion et de l'intensité des précipitations.

5.4.44 Une fois le dégivrage et l'antigivrage terminés, le pilote commandant de bord reçoit les renseignements suivants :

- a) type de liquide ;
- b) concentration (pour les types II, III et IV seulement) ;
- c) heure à laquelle le dégivrage/antigivrage final a commencé ;
- d) confirmation que l'avion est propre.

Ces renseignements de base aideront le pilote commandant de bord à estimer, dans le tableau de l'exploitant aérien, la durée de protection qu'il pourra obtenir. La durée de protection commence à courir au début de l'application de la couche finale de liquide dégivrant/antigivrant et prend fin à l'expiration de la durée appropriée que le pilote commandant de bord a choisie.

Mise à jour des indications relatives à la durée de protection et des procédures de dégivrage/antigivrage

5.4.45 Les durées de protection et les procédures de dégivrage/antigivrage sont continuellement mises à jour par un groupe d'experts internationaux sous les auspices du Committee on Aircraft Ground De-icing/Anti-icing de la SAE (Comité G-12), par le truchement d'un sous-comité des durées de protection. Ce groupe d'experts se compose de représentants de compagnies aériennes, de producteurs de liquides dégivrants/antigivrants, d'avionneurs, d'organismes de réglementation de l'aviation et de centres de recherche.

5.4.46 Des laboratoires agréés certifient que les liquides de dégivrage/antigivrage répondent aux spécifications prescrites. Les liquides sont ensuite testés conjointement par la Federal Aviation Administration (FAA) des États-Unis et par Transports Canada pour obtenir des données sur leur durée de protection, qu'un sous-comité des durées de protection utilise pour établir les indications relatives à ces durées. Les procédures de dégivrage/antigivrage sont mises au point par un sous-comité SAE des méthodes qui recommande leur approbation par le Conseil de l'aérospatiale de la SAE. Les documents approuvés sont publiés par :

- a) Transports Canada dans une circulaire consultative ;
- b) la FAA des États-Unis dans un Flight Standards Information Bulletin for Air Transportation (FSAT) ;
- c) la SAE dans la Procédure recommandée ARP 4737 ;
- d) l'ISO dans la norme ISO 11076.

5.4.47 Les publications de la FAA et de Transports Canada paraissent une fois l'an, habituellement avant le début de l'hiver de l'hémisphère Nord. Celles de la SAE et de l'ISO paraissent plus tard. La FAA et Transports Canada publient aussi une liste des liquides dégivrants et antigivrants approuvés ainsi que des indications relatives aux durées de protection de liquides de performances supérieures à celles qui figurent dans les tableaux généraux.

5.4.48 Les sites web suivants contiennent des renseignements sur le dégivrage et l'antigivrage :

- a) FAA : www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afs/afs200/
- b) Transport Canada : www.tc.gc.ca/CivilAviation/commerce/HoldoverTime/menu.htm et www.tc.gc.ca/tcd/projects/air/f/tables.htm
- c) Society of Automotive Engineers : www.sae.org
- d) Association of European Airlines : www.aea.be/press/publications
- e) OACI : www.icao.int/groundice

Le site de l'OACI offre des liens vers d'autres sites où l'on peut obtenir des renseignements à jour. On peut aussi trouver des renseignements sur Internet en cherchant « dégivrage » et « temps de protection » à l'aide d'un moteur de recherche.

Enquête sur les accidents où le givrage au sol pourrait être un facteur

5.4.49 Les incidences potentielles des contaminants givrés sur les surfaces et équipements critiques de l'avion doivent être évaluées lorsqu'une dégradation des performances, de la stabilité ou de la maîtrise de l'aéronef peu après le décollage est associée à des températures égales ou inférieures au point de congélation et à de petits écarts température/point de rosée, à de l'eau stagnante ou à de la neige fondante. L'enquête doit inclure les points indiqués ci-après.

Inspections réalisées pour déterminer la nécessité d'effectuer le dégivrage et l'antigivrage

5.4.50 Les points à examiner sont notamment :

- a) l'existence de procédures formelles ;
- b) l'adéquation des procédures de détection du givrage des surfaces critiques ;
- c) la visibilité des surfaces critiques, y compris les effets de l'éclairage, des angles de vision et de la réduction de la visibilité de l'intérieur de la cabine en raison de fenêtres mouillées ou éraflées ;
- d) la formation de l'équipe au sol et de l'équipage de conduite effectuant les inspections.

Procédures utilisées pour dégivrer et antigivrer l'aéronef

- 5.4.51 Les facteurs à examiner dans ce domaine comprennent notamment :
- a) l'existence de procédures formelles de dégivrage et d'antigivrage de l'aéronef ;
 - b) le respect des procédures de dégivrage et d'antigivrage de l'aéronef, notamment la séquence de dégivrage et d'antigivrage des différentes surfaces, l'évitement des surfaces qui ne doivent pas être exposées aux liquides antigivrants, la formation de l'équipe au sol aux procédures de dégivrage et d'antigivrage et la communication à l'équipage de conduite de renseignements essentiels concernant le dégivrage et l'antigivrage.

Type de liquide et concentrations dans la solution utilisée pour dégivrer et antigivrer l'aéronef

- 5.4.52 Les facteurs à examiner dans ce domaine comprennent notamment :
- a) les procédures employées pour assurer la qualité des liquides utilisés ;
 - b) les procédures utilisées pour assurer la précision des mélanges employés dans les solutions appliquées à l'aéronef.

Quantité de contaminants gelés supplémentaires qui auraient pu se déposer sur l'avion avant le décollage

- 5.4.53 Les facteurs à examiner dans ce domaine comprennent notamment :
- a) le type et la température de la précipitation gelée et le taux auquel elle s'est accumulée ou déposée sur les surfaces de l'aéronef ;
 - b) le temps écoulé depuis le début des procédures de dégivrage ou d'antigivrage de l'aéronef ;
 - c) d'autres facteurs qui pourraient avoir une incidence sur le dépôt d'autres contaminants gelés sur les surfaces de l'avion, c'est-à-dire la direction et la vitesse du vent, la couverture nuageuse/soleil, l'influence des gaz d'échappement sur la fonte et le gel de la neige sèche, la présence d'eau de surface qui pourrait être projetée ou soufflée dans des parties critiques, l'utilisation de la poussée inverse qui pourrait projeter des contaminants ou faire fondre de la neige sèche sur les parties critiques.

Critères employés par les équipes au sol et les équipages de conduite pour déterminer si l'aéronef est libre de contaminants gelés avant le décollage

- 5.4.54 Les facteurs à examiner dans ce domaine comprennent notamment :
- a) l'existence de critères pour déterminer s'il est nécessaire d'effectuer un dégivrage ou un antigivrage supplémentaire ;
 - b) l'adéquation des critères de détermination de la nécessité d'effectuer un dégivrage ou un antigivrage supplémentaire ;
 - c) l'adéquation de la formation dispensée aux équipes au sol et aux équipages de conduite à la nécessité d'effectuer un dégivrage ou un antigivrage supplémentaire ;
 - d) la mise en œuvre des procédures pour déterminer la nécessité d'effectuer un dégivrage ou un antigivrage supplémentaire.

Givrage en vol

5.4.55 Le givrage en vol peut être divisé en deux types : givrage cellule et givrage moteurs. Le givrage de la cellule dégrade les performances de l'avion lorsque des gouttelettes d'eau surfondues se déposent sur les surfaces de l'aéronef. Les accumulations de glace peuvent ensuite dégrader la production de portance, augmenter la traînée, réduire l'efficacité des hélices, augmenter le poids de l'avion et, si elles se détachent de la structure sur laquelle elles se forment, causer des dommages aux systèmes ou à la cellule. Le givrage du moteur peut réduire la poussée ou la production d'énergie par le groupe motopropulseur en le privant d'air.

Givrage cellule

5.4.56 Les dangers du givrage de la cellule en vol peuvent être répartis en deux domaines principaux : les facteurs aérodynamiques et le fonctionnement des systèmes. Des deux, les facteurs aérodynamiques sont probablement les plus évidents. Les aéronefs en vol dépendent de trois forces (force aérodynamique, poussée et poids) et le givrage en vol peut les perturber toutes les trois. Il peut aussi avoir une incidence considérable sur les moments de tangage produits par l'écoulement de l'air sur les surfaces de l'aéronef. Si l'équipement de dégivrage ou d'antigivrage n'est pas disponible ou n'est pas utilisé, les conditions givrantes en vol peuvent dégrader les performances des divers systèmes de l'aéronef, les plus évidents étant les moteurs et le système pitot-statique. La présence de glace peut aussi altérer les performances des systèmes de communication et de navigation qui dépendent d'antennes extérieures. Le givrage du pare-brise peut en outre réduire la visibilité de l'équipage de conduite et l'empêcher de voir l'environnement extérieur.

5.4.57 Les indices du givrage en vol sont très fugaces. Lorsque les enquêteurs arrivent sur les lieux de l'accident, la glace a très probablement disparu parce qu'elle a fondu ou s'est sublimée naturellement, parce qu'un incendie qui a suivi l'accident en a accéléré la fonte ou parce qu'elle s'est détachée de l'aéronef au moment de l'impact. En raison de la nature éphémère de ces indices, les enquêteurs doivent bien comprendre comment peut se produire le givrage en vol et son incidence sur l'aéronef et ses systèmes.

5.4.58 Deux conditions sont nécessaires pour que la glace se forme sur la structure extérieure d'un aéronef en vol. Il faut d'abord qu'il y ait présence d'humidité liquide dans l'air ; il faut ensuite que la température de l'air ambiant et celle de la surface de l'aéronef soient inférieures au point de congélation. Même si l'eau peut demeurer liquide jusqu'à -40°C , la plupart du givrage se produit entre -20°C et 0°C . Deux environnements répondent généralement à ces conditions : la pluie ou la bruine verglaçante et les gouttelettes d'eau liquide surfondues. La pluie ou la bruine verglaçante surviennent le plus souvent dans l'air clair d'une masse d'air froid située sous une masse d'air chaud plus importante. Ces conditions peuvent apparaître le long du côté froid d'un front chaud ou parfois derrière un front froid qui se déplace lentement. Les gouttelettes d'eau surfondues se trouvent dans les nuages ; en fait, elles sont les nuages. Elles mesurent de 5 à 50 microns et sont liées aux nuages cumuliformes ou aux couches denses de nimbostratus. Les plus grosses gouttelettes sont associées aux nuages cumuliformes tandis que les nimbostratus comprennent des gouttelettes plus petites. La taille et la température de la gouttelette d'eau déterminent la rapidité avec laquelle elle passe de la phase liquide à la phase cristalline ; plus elle est petite et froide, plus la transition se fait rapidement ; plus elle est grosse et chaude, plus la transition est lente. La taille et la température des gouttelettes sont aussi un facteur dans la formation du type de glace, c'est-à-dire le givre blanc, qui est rugueux et opaque, le givre transparent, qui est relativement lisse, ou un mélange des deux.

5.4.59 Le givre blanc se forme normalement à partir de petites gouttelettes très froides qui gèlent immédiatement au contact de la surface de l'aéronef. Il tend à s'accumuler d'abord sur les points d'arrêt des bords d'attaque de la cellule et est principalement confiné aux bords d'attaque de la cellule. Si on le laisse s'accumuler de manière significative, la forme rugueuse du givre tend à altérer la forme de conception des structures aérodynamiques, modifiant considérablement l'écoulement prévu de l'air autour de la structure. Ce givre est d'un blanc laiteux en raison de l'air occlus dans la glace et il est moins dense et généralement plus faible que le givre transparent.

5.4.60 Le givre transparent se forme normalement à partir de gouttelettes plus grosses dont la température est égale, ou juste de quelques degrés inférieure, au point de congélation. Vu qu'elles mettent plus de temps à geler, les gouttelettes peuvent glisser sur les bords d'attaque à mesure qu'elles gèlent et former une couche de glace qui épouse la forme originale de la surface. En raison de la taille plus grande des gouttelettes qui forment le givre transparent et de la plus grande teneur en eau liquide de l'environnement dans lequel il se forme, le givre transparent ne contient pas d'air occlus, a une densité plus élevée que le givre blanc et est aussi plus solide.

5.4.61 La rapidité avec laquelle la glace s'accumule sur l'aéronef varie avec la taille des gouttelettes d'eau liquide, la quantité d'eau par unité de volume d'air, la vitesse à laquelle les surfaces de l'aéronef se déplacent dans l'air et les dimensions du bord d'attaque de la surface qui se déplace dans l'air. Les gouttelettes plus petites tendent à suivre l'écoulement de l'air et la plupart passent au-dessus des surfaces de l'aéronef. La quantité de mouvement des gouttelettes plus grosses les empêche de se déplacer avec l'air et elles entrent en collision avec les surfaces de l'aéronef.

5.4.62 Il n'y a pas de spécifications concernant la certification d'un aéronef en conditions de pluie verglaçante. Plus le nombre de gouttelettes par pied carré est élevé, plus le nombre de gouttelettes qui entrent en collision avec les surfaces de l'aéronef est élevé. Plus l'aéronef vole rapidement, plus grand est le volume balayé par les surfaces, mais ce facteur a des limites. À mesure que la vitesse de l'aéronef augmente, la compression de l'air près des points d'arrêt réchauffe les bords d'attaque des surfaces de l'aéronef, ce qui chauffe les surfaces jusqu'à des températures où la glace ne peut plus se former. Les structures minces ont tendance à moins perturber l'air qui se trouve devant elles et il y a donc moins de possibilités que l'écoulement de l'air éloigne les gouttelettes des surfaces qu'elles rencontrent. La glace s'accumule donc plus rapidement sur les structures plus minces comme les antennes, les sondes thermiques et les tubes de Pitot ; elle se dépose plus lentement sur des objets un peu plus épais, tels que les haubans et les empennages horizontaux et verticaux, et plus lentement encore sur les surfaces les plus épaisses comme les ailes et les bords d'attaque du fuselage, les nacelles et les bords d'attaque des hélices.

5.4.63 Deux ou plusieurs facteurs peuvent se combiner et agir en synergie. Les hélices par exemple vont plus vite que l'aéronef lui-même ; elles déplacent un grand volume d'air et sont relativement minces. Elles sont en contact avec un plus grand nombre de gouttelettes d'eau et peuvent donc accumuler la glace plus rapidement que d'autres surfaces. Les pilotes qui observent le bord d'attaque facilement visible d'une aile peuvent être portés à croire que l'accumulation de glace à cet endroit est représentative des accumulations ailleurs sur l'aéronef ; il est probable cependant que beaucoup plus de glace se sera accumulée sur le bord d'attaque de l'empennage horizontal, une situation plus critique que celle de la glace sur les ailes au moment de l'atterrissage.

5.4.64 Lorsqu'un aéronef à ailes basses vole à haute incidence, le givre transparent peut s'accumuler sur l'intrados des ailes où il n'est pas visible pour le pilote.

Effets préjudiciables du givrage en vol de la structure

5.4.65 Les problèmes d'aérodynamique causés par le givrage en vol de la cellule concernent d'abord les bords d'attaque. La forme de la glace sur le bord d'attaque dépend de la température et de la taille des gouttelettes d'eau ainsi que de la température de la surface sur laquelle elles gèlent.

- a) Deux crêtes de glace déchiquetées se forment lorsque les gouttelettes d'eau gèlent sur les bords d'attaque à des températures de -1 °C à -4 °C . Du point de vue aérodynamique, cette forme est celle qui a les incidences les plus graves sur les performances des surfaces portantes.
- b) Une seule crête de glace déchiquetée se forme lorsque des gouttelettes d'eau plus petites gèlent presque immédiatement sur les bords d'attaque à des températures de -4 °C à -10 °C . Cette forme a des incidences graves sur les performances des surfaces portantes.

- c) Une crête de givre blanc se forme le long des points d'arrêt lorsque de très petites gouttelettes d'eau gèlent au contact des bords d'attaque à des températures inférieures à -10°C . Cette forme a des incidences graves sur les performances des surfaces portantes.
- d) Lorsque de grosses gouttelettes d'eau gèlent lentement, ruisselant vers l'arrière avant de geler, une surface lisse de givre transparent se forme sur la surface. Cette forme est celle qui a le moins d'incidences sur les performances aérodynamiques des surfaces portantes.

5.4.66 Le givre transparent qui se forme à la température du point de congélation ou juste au-dessous épouse la forme de la structure et n'a donc pas d'effets prononcés sur l'aérodynamique. Cependant, comme il est plus dense et qu'il s'accumule plus rapidement, il peut alourdir sensiblement l'aéronef, augmentant la traînée induite et ralentissant l'aéronef. Il peut aussi recouvrir les antennes et le radome, brouillant les émissions et les réceptions, et se détacher par plaques qui sont projetées vers l'arrière et qui peuvent causer des dommages.

5.4.67 Du point de vue aérodynamique, la forme d'une double corne est celle qui a la plus forte incidence : elle peut causer la plus grande diminution du coefficient de portance (et donc de la vitesse de décrochage) et la plus grande augmentation de la traînée parasite. Cette forme peut aussi provoquer un décrochage plus abrupt. Une faible diminution de l'angle d'attaque produit une forte augmentation du coefficient de portance. Elle peut aussi provoquer un décrochage asymétrique, c'est-à-dire le décrochage d'une aile mais non de l'autre. La corne simple, qui se forme à une température légèrement inférieure, et le givre blanc plus classique, qui se forme à des températures encore plus basses, entraîneront, à un moindre degré, une réduction du coefficient maximal de portance et une augmentation de la traînée.

5.4.68 Comme il est indiqué plus haut, la glace peut s'accumuler rapidement sur les hélices, en réduisant à la fois l'efficacité et la poussée. En plus des dangers associés à une perte de poussée, il est probable que cette glace se détachera asymétriquement des hélices. Les vibrations qui en résultent et les coups de la glace détachée qui frappe le fuselage auront à tout le moins pour effet de déconcerter l'équipage et les passagers. Au pire, les vibrations peuvent endommager le moteur et ses supports.

5.4.69 La formation de givre sur les surfaces portantes peut avoir des incidences négatives sur la stabilité de l'aéronef, la plus grave étant le décrochage de l'empennage horizontal. La portance produite par l'empennage horizontal (qui s'exerce vers le bas) équilibre le poids de l'aéronef dont le centre de gravité est situé en avant du centre de portance des ailes. Si l'angle d'attaque de l'empennage horizontal dépasse son angle d'attaque de décrochage, l'empennage décroche, l'équilibre est rompu et l'avion pique du nez. Si le piqué n'est pas interrompu, l'assiette de l'avion peut rapidement atteindre la verticale. Si le décrochage de l'empennage survient lorsque l'avion exécute l'approche à l'atterrissage, il est probable qu'il y aura collision avec le sol en fort piqué et à une vitesse bien supérieure à la vitesse de décrochage.

5.4.70 Une manœuvre qui peut augmenter la probabilité d'un décrochage de l'empennage horizontal à cause de la glace est l'abaissement des volets. Lorsque les volets sont abaissés, l'angle de déflexion des filets d'air derrière l'aile augmente généralement, ce qui augmente l'angle d'attaque de l'empennage horizontal. Les aéronefs n'ont pas tous la même susceptibilité aux décrochages d'empennage. L'effet de la déflexion des filets d'air vers le bas sur l'empennage est fonction de l'emplacement des ailes et de l'empennage horizontal. Les configurations aile haute et empennage bas ont plus de probabilités de placer l'empennage horizontal dans la déflexion des ailes. Dans la configuration aile basse et empennage haut (empennage en T), il y a moins de probabilités que l'empennage horizontal se trouve dans la déflexion des ailes.

5.4.71 Il y a d'autres moyens d'augmenter l'angle d'attaque de l'empennage horizontal au-delà de son angle d'attaque de décrochage. Si l'angle d'attaque de l'aile augmente jusqu'à des coefficients de portance élevés, l'angle de déflexion des filets d'air vers le bas diminue et l'angle d'attaque de l'empennage horizontal augmente. Le vol à des hautes vitesses augmente l'angle d'attaque de l'empennage horizontal quand l'avion vole à des assiettes en tangage plus faibles. Étant donné qu'une aile à cambrure positive produit un moment de tangage à piquer qui augmente en fonction de la pression dynamique, la déportance produite par l'empennage doit augmenter régulièrement à mesure qu'augmente la vitesse.

5.4.72 Un autre facteur ayant une incidence sur le décrochage de l'empennage horizontal est le changement de répartition de la pression sur l'empennage horizontal au moment du décrochage. Le changement est tel que la pression aérodynamique sur l'empennage amène naturellement la gouverne de profondeur à s'abaisser sur le bord de fuite. Cette caractéristique ne pose aucun problème supplémentaire dans le cas des systèmes de commandes de vol hydrauliques qui ne permettent pas aux forces exercées sur les gouvernes de provoquer le mouvement de la gouverne. La gouverne de profondeur est verrouillée par l'actionneur hydraulique. Dans le cas des systèmes non assistés, cependant, les pressions sur la gouverne de profondeur peuvent être assez fortes pour neutraliser les efforts du pilote et pousser le manche au tableau. À moins que l'équipage ne soit capable de ramener la position du manche à cabrer, il est peu probable qu'il puisse redresser l'appareil en toute sécurité.

5.4.73 Parmi les questions auxquelles il faut trouver une réponse à la suite d'un accident causé par un décrochage dû au givrage du bord d'attaque de l'empennage horizontal, il y a la raison qui a empêché l'équipage de détecter et d'éliminer le givre de l'empennage et la connaissance qu'avait l'équipage des dangers liés au givrage de l'empennage.

5.4.74 Le dépôt de givre et de glace sur les extrados des aéronefs à ailes en flèche augmente l'épaisseur de l'air dans la couche limite et en réduit l'énergie étant donné qu'il a naturellement tendance à se déplacer vers l'extérieur. La limite plus épaisse et de faible énergie près des extrémités des ailes les fera décrocher plus tôt que la normale. Si les extrémités des ailes décrochent avant le reste de l'aile, le centre de portance tend à se déplacer vers l'avant entraînant un moment de tangage à cabrer juste au moment où il ne faut pas, c'est-à-dire pendant le décrochage.

5.4.75 Le givrage cellule peut aussi nuire à la sollicitation des commandes de vol par l'équipage. Les contaminants de surface peuvent geler à des endroits qui peuvent empêcher le mouvement des surfaces. La cause peut en être la glace qui s'est formée au sol, l'eau liquide captée au sol mais ayant gelé en vol ou de la glace qui a fondu sur le bord d'attaque mais qui a ruisselé vers l'arrière et regelé. L'eau qui gèle à l'intérieur des commandes de vol peut aussi perturber l'équilibrage massique nécessaire pour empêcher les vibrations aéroélastiques. L'eau piégée à l'intérieur, dans les espaces non chauffés où se trouvent des câbles ou des actionneurs, peut geler en vol et provoquer le dysfonctionnement des commandes de vol. Les freins de roues peuvent aussi accumuler de l'eau ou de la neige fondante, qui peut geler aux hautes altitudes, ce qui peut bloquer les roues et même les faire éclater au moment où elles touchent le sol.

Givrage moteur

5.4.76 En plus du givrage cellule, qui peut dégrader la poussée sustentatrice des hélices, le givrage peut perturber le système d'admission d'un moteur alternatif ou endommager des composants critiques d'un turboréacteur. Le givrage des moteurs d'aviation se divise en deux catégories : le givrage du système d'admission et le givrage d'entrée d'air. Le givrage du système d'admission désigne le givre qui se forme dans le carburateur d'un moteur alternatif lorsque le refroidissement associé aux effets Venturi et à l'évaporation du carburant produit une condensation qui gèle ou se dépose. Ce type de givrage se produit le plus souvent en air clair et à des températures ambiantes bien supérieures au point de congélation. Il n'a besoin ni d'eau liquide dans l'atmosphère ni de températures ambiantes de congélation.

5.4.77 Le givrage de l'entrée d'air est un type particulier de givrage de la cellule ; il se forme à l'entrée d'air des moteurs alternatifs ou des réacteurs. Les deux types de givrage moteur peuvent bloquer l'alimentation en air des moteurs, réduisant la puissance ou la poussée disponible. En outre, la glace d'entrée d'air des réacteurs peut se détacher et endommager les aubes du compresseur.

5.4.78 Le givre qui se forme dans le système d'admission d'un moteur alternatif, obstruant la source d'air du moteur, peut provoquer une perte de puissance. Cette obstruction peut se produire dans des conditions atmosphériques semblables à celles qui permettent le givrage cellule, mais le givrage du système d'admission peut aussi se produire en air clair et lorsque les températures sont bien au-dessus des conditions givrantes. Un givrage important peut se produire lorsque l'eau surfondue entre en contact avec les composants du système d'admission d'air du moteur qui sont à des

températures inférieures au point de congélation. Il exige les mêmes conditions que celles qui favorisent la formation de givre sur la cellule. En fait c'est ce givre qui se forme aux endroits qui bloquent le passage de l'air du carburateur vers le moteur. Il peut se former sur les entrées d'air, les filtres à air et les composants structuraux à l'intérieur du système d'admission ou là où l'augmentation de la vitesse locale entraîne une baisse de la pression statique ambiante locale et donc une baisse de température. Si la baisse de température est supérieure à l'écart température/point de rosée, l'humidité présente dans l'air se condense. Si la température de la surface est inférieure au point de congélation, l'humidité peut soit geler au contact avec la surface, soit givrer directement dans l'air. Ce phénomène se produit dans le venturi du carburateur ou autour du papillon partiellement fermé. Plus le papillon est fermé, plus grande est la vitesse nécessaire pour maintenir un débit d'air constant. Un papillon complètement ouvert n'abaisse que peu la température. Les baisses maximales de température dues aux effets Venturi sont généralement faibles (de l'ordre de 5 °C), mais elles peuvent permettre la formation de givre lorsque les températures à l'entrée sont légèrement supérieures au point de congélation. Une baisse beaucoup plus importante de la température est liée à l'évaporation du carburant à son entrée dans le carburateur. L'énergie nécessaire pour transformer le carburant liquide en gaz est absorbée de l'air, le refroidissant de 20 à 40 °C. Là encore si l'écart température/point de rosée est suffisamment petit, la vapeur d'eau dans l'air se condense. Si la température est au-dessous du point de congélation, le givre se forme sur les structures à l'intérieur du système d'admission. À mesure que le passage du mélange carburant-air vers le moteur se rétrécit, la puissance de sortie du moteur diminue. La pression d'admission et, dans les aéronefs munis d'hélices à pas fixe, le nombre de tours/minute diminuent.

5.4.79 Le moteur peut aussi se mettre à fonctionner de façon irrégulière. À mesure que la glace continue à s'accumuler, l'ouverture du passage du mélange carburant-air peut changer suffisamment pour empêcher le moteur de fonctionner et le moteur s'arrête. Les preuves de la présence de givrage moteur sont indirectes. Les prévisions et les observations météorologiques, particulièrement celles des pilotes volant dans des avions équipés de moteurs semblables, peuvent donner des indices sur la possibilité d'un givrage du moteur. L'emplacement du système d'admission sur le moteur peut aussi avoir une incidence sur la température de l'air d'admission, et les différences entre les types et les conditions de fonctionnement des moteurs peuvent faire la différence entre la présence ou l'absence de givre. Dans une enquête sur un accident qui a peut-être été causé par le givrage du système d'admission, il faut examiner la disponibilité et l'utilisation de dispositifs antigivrants comme le réchauffage du carburateur (pour le givre dû à l'effet Venturi, au givre d'évaporation ou au givrage à l'impact dans le système d'admission) et d'autres sources d'air (pour le givre à l'impact sur les entrées d'air et les filtres à air). La position des commandes dans le poste de pilotage et des dispositifs mécaniques qu'elles commandent doit être déterminée et documentée. Il convient aussi d'effectuer des vérifications de fonctionnement, lorsque c'est possible. L'aide d'un technicien de moteurs d'aéronefs d'expérience, spécialisé dans le type de moteur et l'installation en cause, est essentielle. Il existe aussi plusieurs systèmes de détection de givrage carburateur (effet Venturi et évaporation) sur le marché. Si un de ces systèmes a été installé, il faut en vérifier l'état opérationnel et toute indication post-impact de la présence de givre.

5.4.80 Le givrage en vol n'a pas les mêmes incidences sur les réacteurs que sur les moteurs alternatifs. Dans la plupart des cas, les problèmes concernent les dommages causés aux composants rotatifs ou la perturbation de l'écoulement de l'air dans le moteur et les décrochages réacteur et stagnations qui s'ensuivent. Le givre qui se forme à l'avant ou à l'intérieur des entrées d'air peut se détacher en plaques qui, si elles pénètrent dans le moteur, peuvent l'endommager et causer une perte de poussée. De plus, la perturbation de l'écoulement de l'air à l'avant du compresseur par les plaques peut provoquer un décrochage compresseur qui conduit à l'extinction ou à la stagnation du moteur. La formation de givre sur les aubes directrices d'admission, les stators et les aubes du compresseur peut réduire l'espace disponible et causer des dommages par frottement. Les indices post-impact peuvent comprendre des dommages de type FOD. La stagnation du moteur peut conduire à des températures excessives dans la section turbine et aux dommages causés par la chaleur. Enfin, les réacteurs modernes dépendent des données de pression Pitot et statique provenant de l'entrée d'air du réacteur. Le givrage des sources de ces données de pression peut perturber le fonctionnement du moteur et la poussée. L'analyse des données FDR et CVR peut fournir des indices sur le régime moteur, la poussée produite et le fonctionnement des systèmes de dégivrage et d'antigivrage.

5.4.81 Comparées aux surfaces d'autres bords d'attaque de l'aéronef, celles des bords d'attaque des conduits d'entrée d'air et des aubes directrices d'admission sont relativement minces et donc des capteurs de givre relativement

bons. En outre, les faibles pressions statiques dans les entrées d'air sont accompagnées de températures inférieures aux températures ambiantes. S'il y a de petits écarts de température ambiante/point de rosée, le givre peut se former sur les surfaces des conduits dont la température de surface est inférieure au point de congélation.

Effets du givrage en vol sur d'autres systèmes

5.4.82 Les effets du givrage en vol vont au-delà de l'aérodynamique et de la poussée. L'obstruction de la prise de pression statique d'un aéronef peut causer une multitude de problèmes. Si la pression pitot est utilisée par l'anémomètre, une augmentation d'altitude entraînera aussi une augmentation de la vitesse indiquée. Si le pilote essaie de contrôler la vitesse indiquée en cabrant l'appareil, la vitesse indiquée augmentera encore plus tandis que la vitesse anémométrique réelle diminuera. Le décrochage et la vrille d'un avion de ligne commercial, malgré l'expérience de son équipage de conduite, ont été attribués à cette série d'événements. Par ailleurs, une perte d'altitude fait que l'anémomètre indique des vitesses inférieures aux vitesses réelles si la source de données pitot est obstruée par le givre. Si le pilote tente de corriger la vitesse indiquée en piquant l'appareil, la vitesse indiquée diminuera encore plus tandis que la vitesse réelle de l'aéronef augmentera. Les vitesses anémométriques excessivement élevées qui en résultent peuvent entraîner une rupture structurelle causée par de fortes pressions dynamiques, des défaillances aéroélastiques (vibrations aéroélastiques, divergence en torsion des ailes, inversion des commandes) ou un dépassement du facteur de charge en raison des charges de manœuvre à des vitesses anémométriques très élevées. Si la source de données pitot est utilisée par le système d'augmentation de la stabilité, des commandes erronées peuvent conduire aux oscillations provoquées par le pilote et au dépassement du facteur de charge, à la perte de contrôle et à l'écrasement au sol. L'accumulation de givre sur les antennes de communication et de navigation peut dégrader l'efficacité des antennes en émission et en réception. L'antenne peut aussi se rompre lorsque la traînée créée par le givre dépasse la résistance statique de l'antenne ou lorsque le givre crée des formes aérodynamiquement instables et que les charges dynamiques entraînent une rupture structurelle. L'accumulation de givre sur le bord d'attaque de la voilure peut aussi passer inaperçue si le pilote automatique est enclenché vu qu'il commande les ailerons de manière à apporter les petites corrections nécessaires au maintien des ailes à l'horizontale. Si le pilote automatique a été désactivé par le pilote ou s'il s'est désactivé lui-même parce que son autorité était dépassée par les forces aérodynamiques, l'aéronef peut soudainement faire une abattée dans la direction de l'aile la plus contaminée. Une forte sollicitation des ailerons pourrait causer le décrochage de l'extrémité de l'aile.

Enquête sur les accidents auxquels le givrage en vol aurait pu contribuer

5.4.83 Lorsque son enquête porte sur des accidents auxquels aurait pu contribuer le givrage, l'enquêteur doit examiner non seulement ce qui s'est produit, mais déterminer aussi pourquoi cela s'est produit. Voici quelques-unes des questions auxquelles il faut répondre :

- a) Pourquoi le pilote a-t-il volé dans des conditions givrantes dans lesquelles son aéronef ne pouvait pas voler en toute sécurité ?
- b) Le pilote s'est-il informé des conditions météorologiques avant le vol ?
- c) Dans ce cas, les renseignements qu'il a obtenus étaient-ils exacts ?
- d) Le pilote a-t-il demandé des mises à jour du temps significatif ? Le contrôle de la circulation aérienne les a-t-il fournies ?
- e) Le pilote savait-il que le givre s'accumulait sur les surfaces critiques de l'aéronef ?

5.4.84 Les questions suivantes portent sur les systèmes de bord et leur capacité de détecter, d'empêcher ou d'éliminer l'accumulation de givre :

- a) Est-ce que les systèmes d'antigivrage et de dégivrage fonctionnaient et étaient-ils efficaces ?

- b) L'équipage savait-il comment et quand faire fonctionner les systèmes d'antigivrage et de dégivrage tels que les dégivreurs pneumatiques des bords d'attaque, les systèmes de réchauffement électriques ou par air de prélèvement et les systèmes à base de glycol ?
- c) Les systèmes d'antigivrage ou de dégivrage installés étaient-ils capables de fonctionner dans les conditions givrantes rencontrées par l'aéronef ?
- d) L'aéronef volait-il à un angle d'attaque supérieur ou inférieur à la normale, permettant au givre de s'accumuler sur les surfaces portantes non protégées situées en arrière du bord d'attaque des dispositifs de dégivrage ?

5.4.85 Une autre question concernant la capacité des aéronefs de voler dans des conditions givrantes est leur certification selon les dispositions spécifiées. Même si certains aviateurs pensent le contraire, aucun aéronef n'est certifié pour voler continuellement dans des conditions de fort givrage.

5.5 HYDRAVIONS

5.5.1 Les paragraphes qui suivent complètent ou soulignent les techniques d'enquête habituelles et décrivent les facteurs de risque courants des hydravions en fonction des diverses phases de vol.

Généralités

5.5.2 Les hydravions ne diffèrent généralement que très peu des autres avions et lorsqu'un accident d'hydravion se produit sur terre l'enquête se fait de la même manière que pour les accidents d'aéronefs à voilure fixe. Il faut tenir compte du rôle qu'ont pu jouer les flotteurs, par exemple l'absorption d'énergie et la traînée. Par contre, si l'accident se produit sur l'eau, il faut tenir compte des aspects opérationnels et techniques spécifiques des hydravions.

5.5.3 Les différences les plus évidentes sont l'absence de marques de surface permettant d'établir la direction du vol au moment de l'impact et le fait que la surface de l'eau aura probablement changé (vagues ou absence de vagues) lorsque l'enquêteur arrivera sur les lieux de l'accident.

5.5.4 Les dommages causés à l'avion par l'impact sur l'eau peuvent souvent permettre de déterminer l'assiette de l'aéronef au moment de l'impact, mais il n'y aura que très peu ou pas de dommages d'impact dans les accidents à basse vitesse et à faible énergie (voir la Figure III-5-1).

Survivabilité

5.5.5 Les pertes de vie dans les accidents d'hydravion sont souvent causées par noyade parce que les occupants sont incapables de sortir de l'épave. Les autopsies détermineront la cause du décès.

5.5.6 Prendre note des ceintures et des baudriers de sécurité, c'est-à-dire s'ils sont attachés ou non, avant de retirer les corps. Noter aussi l'emplacement des gilets de sauvetage et si les sorties sont bloquées. Voir le Chapitre 17 pour un exposé plus complet sur l'évacuation et la survivabilité.



Figure III-5-1. Dommages causés par l'impact sur l'eau

Questions environnementales

5.5.7 Les conditions météorologiques et hydrologiques peuvent avoir contribué de manière considérable à la cause de l'accident. Les lieux d'amerrissage peuvent être éloignés et les ressources météorologiques normales peuvent ne pas être disponibles. Les informations sur l'état de la surface de l'eau et sur le vent pouvant avoir une incidence directe sur le décollage, l'amerrissage, la circulation à la surface de l'eau et l'amarrage, sont importantes pour l'enquête. Les sources de renseignements environnementaux comprennent notamment :

- a) les gardiens de phare ;
- b) les bulletins maritimes ;
- c) les plaisanciers dans la région ;
- d) les exploitants d'hydravions commerciaux ;
- e) les résidents de longue date dans la région ;
- f) les photographies et séquences vidéo.

Accidents pendant la circulation à la surface de l'eau

5.5.8 Les hydravions qui ont chaviré pendant la circulation à la surface l'ont fait en raison d'une combinaison de facteurs défavorables, notamment :

- a) le poids excessif de l'hydravion et/ou un chargement incorrect (centre de gravité) ;

- b) une surface de manœuvre inégale causée par les vagues et la houle (les vagues créées par des navires de surface peuvent aussi créer des problèmes) ;
- c) une mauvaise technique de virage du pilote pour faire face au vent ou pour s'écarter de l'axe du vent. Une trop grande vitesse de virage risque de submerger le flotteur sous le vent et de faire chavirer l'appareil.

Accidents au décollage

5.5.9 *Décollages en zones exigües.* Une des causes les plus fréquentes d'accidents au décollage sur un plan d'eau est la tentative du pilote de décoller à partir d'une zone exigüe avec un aéronef lourd ou surchargé. Les opérations en zone exigüe peuvent aussi être compromises par les conditions de vent.

5.5.10 *Collisions avec des billes de bois ou des embarcations.* Rechercher la présence d'objets submergés sur le trajet de la course au décollage ou à l'amerrissage : les billes de bois, par exemple, peuvent couler après une collision ou flotter et s'éloigner, mais les flotteurs devraient porter des marques d'impact avec un objet.

5.5.11 *Poids excessif et déplacements du centre de gravité.* Vérifier l'étanchéité des couvercles d'accès des flotteurs et la présence de déchirures ou de rivets desserrés sur la surface inférieure des flotteurs. L'eau qui s'infiltre à l'intérieur d'un flotteur perforé ou qui fuit peut sensiblement augmenter le poids de l'aéronef, notamment sur des flotteurs à fort déplacement. Tout problème de charge élevée peut être aggravé par un changement rapide et radical du centre de gravité causé par le mouvement des flotteurs durant la course au décollage.

5.5.12 Demander aux témoins de décrire la *ligne de flottaison des flotteurs*. L'emplacement de cette ligne peut donner une bonne idée du poids et de l'emplacement du centre de gravité. Une longue course sur l'eau peut aggraver un problème de flotteur qui fuit et la houle peut faire pénétrer l'eau dans les flotteurs, vu que les bouchons de flotteurs sont souvent absents.

5.5.13 *Mauvaise installation des flotteurs.* Évaluer le type de flotteurs utilisé sur l'aéronef. Les gros flotteurs peuvent sérieusement nuire à la stabilité et au contrôle directionnels aux faibles vitesses. Les flotteurs sont normalement installés conformément à un certificat de type supplémentaire (STC).

5.5.14 *Installation des flotteurs* (Figures III-5-2 et III-5-3). Des flotteurs mal installés peuvent considérablement augmenter la distance de décollage. Si l'installation est intacte, déterminer si l'alignement en carré des flotteurs et l'angle entre les flotteurs et l'angle d'incidence de l'aile (environ 2° généralement) étaient corrects. Si les flotteurs ne sont pas intacts, essayer de reconstituer l'installation qui existait avant l'accident.

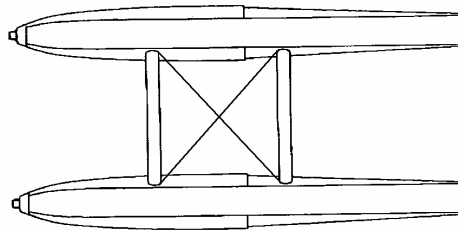


Figure III-5-2. Alignement en carré des flotteurs. De nombreux hydravions à flotteurs sont munis de câbles de renforcement horizontaux attachés en « X » entre les barres d'écartement.

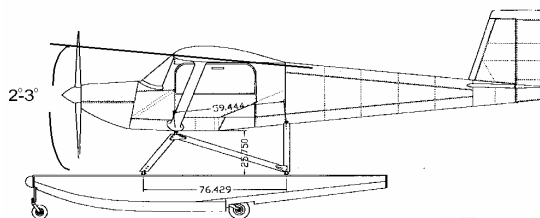


Figure III-5-3. L'angle « d'ouverture » est la différence entre l'angle de la partie supérieure du flotteur et l'angle d'incidence de l'aile.

5.5.15 Problèmes de performance des aéronefs.

- a) *Mauvaise utilisation des commandes auxiliaires.* Des roues partiellement ou complètement abaissées ou une mauvaise utilisation des volets auront des incidences négatives sur les performances de décollage.
- b) *Commutateurs de magnéto.* Une méthode employée par les pilotes pour réduire la vitesse de circulation sur l'eau est de couper une des magnétos pour ralentir le moteur au-dessous de sa vitesse normale de ralenti. Une autre méthode consiste à démarrer et à couper le moteur à l'aide du commutateur de magnéto. Si le pilote ne remet pas les commutateurs à la position « both » avant le décollage, il peut s'ensuivre une réduction sensible de puissance au moment où les performances des moteurs et de l'aéronef doivent être maximales.
- c) *Problèmes liés au carburant.* La contamination du carburant est une cause fréquente de perte de puissance au moment du décollage d'un hydravion. Dans la mesure du possible, prendre un échantillon de carburant de l'hydravion et de la source de carburant. Déterminer si la procédure d'échantillonnage du carburant était appropriée.
- d) *Effets d'un plan d'eau miroitant* (Figure III-5-4). L'absence de vent normalement associée à un plan d'eau miroitant augmente la distance de décollage. En outre, l'aéronef aura plus de difficulté à quitter la surface de l'eau en raison du frottement et de la tension de surface, qui contribuent encore à allonger la distance de décollage.

L'effet de miroir du plan d'eau perturbe la perception de la profondeur pendant le décollage et la montée initiale et, dans certains cas, un pilote peut par inadvertance descendre après le décollage et heurter la surface de l'eau en piqué.

- e) *Conditions de vent.* Les changements de portance aérodynamique causés par les variations de la direction du vent par rapport aux surfaces des ailes est une situation fréquente sur les plans d'eau situés à une confluence de plusieurs vallées fluviales.

L'envol à une vitesse trop faible par vent traversier peut faire dériver l'avion et lui faire prendre contact avec la surface avec un mouvement latéral sur le flotteur sous le vent ; ce mouvement peut déséquilibrer l'aéronef.

- f) *Charges extérieures.* Si l'aéronef transportait des charges extérieures, examiner l'effet qu'elles ont pu avoir sur les performances de l'aéronef. L'aéronef peut exiger des tests spéciaux ou un certificat de type supplémentaire pour transporter des charges extérieures.



Figure III-5-4. Plan d'eau miroitant

Accidents d'amerrissage

- 5.5.16
- a) *Mauvaise configuration d'amerrissage.* Une cause fréquente des accidents d'amerrissage des hydravions amphibies est la tentative du pilote d'amerrir avec les roues sorties. Ces accidents se produisent souvent après le départ de l'aéronef sur une piste en dur et lorsque le pilote ne rentre pas les roues après le décollage ou sort le train par habitude.
 - b) *Traînée hydrodynamique.* La traînée hydrodynamique augmente proportionnellement au carré de la vitesse de l'aéronef à la prise de contact. L'amerrissage à contre-courant sur une rivière à une vitesse trop élevée augmente la traînée sur les flotteurs et tend à déséquilibrer l'avion au moment de la prise de contact.
 - c) Un autre type d'accident à l'amerrissage qui se produit généralement au moment de la prise de contact ou peu après est la submersion d'un flotteur. Ce problème peut se produire lorsque le pilote ne tire pas suffisamment sur le manche pour maintenir le cabré lorsque les flotteurs touchent la surface de l'eau. Il peut aussi se produire lorsque l'aéronef est légèrement en piqué au moment de toucher la surface.
 - d) *Plan d'eau miroitant.* L'eau calme et lisse présente plusieurs difficultés pour les pilotes d'hydravion. Les amerrissages sur un plan d'eau miroitant sont plus difficiles parce que le pilote dispose de peu d'indices lui permettant de percevoir la profondeur (il ne voit pas la surface de l'eau mais seulement le reflet sur l'eau). Toute tentative par le pilote d'estimer une hauteur d'arrondi échouera probablement dans ces conditions. L'aéronef risque de heurter la surface de l'eau avec une force suffisante pour cintrer fortement les flotteurs à la barre d'écartement avant. La partie avant des flotteurs peut se

rompre complètement ou l'aéronef peut subir des dommages importants aux points de fixation des flotteurs. Des procédures d'approche spécifiques (et une surface d'amerrissage plus grande) sont nécessaires en eau calme et lisse. Les pilotes essaient d'amerrir près de la rive et parallèlement à la rive de manière à utiliser la rive pour estimer leur hauteur. Une autre technique consiste à essayer de faire l'arrondi au-dessus de la rive, d'herbes, etc., et de laisser l'aéronef se poser sur l'eau à une vitesse descensionnelle inférieure à 30 m/min (100 ft/min) après la perte de la référence de hauteur visuelle. Cette manœuvre peut facilement ajouter plusieurs milliers de pieds avant la prise de contact. Un pilote d'hydravion à flotteurs inexpérimenté peut perdre patience et abaisser le nez de l'appareil pour se rapprocher de la surface de l'eau, qu'il ne peut pas voir, et submerger les flotteurs.

5.5.17 *Givrage des câbles de commande.* À l'automne et au début du printemps, la température de l'eau est souvent celle du point de congélation ou s'en rapproche et toute eau pulvérisée sur les flotteurs ou l'empennage peut geler. Outre le fait qu'il peut alourdir l'aéronef, le givre perturbe l'écoulement de l'air sur les surfaces portantes et peut s'accumuler sur les câbles des gouvernails marins ou les commandes de vol et les bloquer.

5.5.18 *Corrosion.* Les hydravions exploités en environnement salin sont plus sensibles à la corrosion que ceux qui sont exploités dans des milieux non salins. À moins qu'ils ne soient lavés régulièrement à l'eau douce et méticuleusement inspectés, ces aéronefs peuvent très rapidement subir des défaillances liées à la corrosion.

5.5.19 *Fissuration par corrosion sous contrainte.* Les fixations et le revêtement des flotteurs sont soumis à de rudes conditions et peuvent parfois se fissurer et se rompre. Vérifier si les bons matériaux et les bonnes dimensions ont été employés.

5.6 OISEAUX/FAUNE

5.6.1 Lorsqu'un accident ou un incident d'aviation est dû à un impact d'oiseau ou d'un autre animal, l'enquêteur doit analyser l'accident en tenant compte des efforts de prévention déployés pour réduire la probabilité de ces impacts. Même si les paragraphes qui suivent portent surtout sur les impacts d'oiseaux, la même méthodologie doit être employée pour tous les autres animaux. Tout examen pour rechercher des indices d'impacts d'oiseaux doit être très minutieux car les preuves qui restent peuvent être minimes. Les petits oiseaux peuvent causer de graves dommages aux aéronefs.

5.6.2 Même s'il est facile de repérer le point d'impact qui a causé la plupart des dommages, les enquêteurs doivent vérifier toutes les autres parties de l'aéronef pour déterminer s'il y a eu d'autres impacts. Le nombre total d'impacts d'oiseaux est important pour évaluer les caractéristiques des volées.

5.6.3 En cas d'incendie au sol, la meilleure façon de détecter la présence de restes d'oiseaux est l'odeur. Il est possible de repérer l'odeur des plumes et de la chair qui brûlent bien avant de trouver les preuves matérielles.

Preuves de la présence d'oiseaux ou d'autres animaux

5.6.4 Dans la mesure du possible, il faut prélever les indices des impacts d'oiseaux ou d'autres animaux et les envoyer à des experts pour qu'ils les identifient. Autant que possible, ne pas nettoyer les indices. Les meilleures informations, tant du point de vue de l'analyse que de l'expédition, viennent des restes non charnus. Les enquêteurs doivent essayer de collecter les éléments suivants :

- a) toutes les plumes trouvées sur l'aéronef ;
- b) toutes les plumes trouvées au sol ;

c) les restes non charnus :

- 1) becs ;
- 2) serres ;
- 3) plumes ;
- 4) fourrure ;
- 5) dents.

5.6.5 Même avec très peu d'indices, il est possible de récupérer de précieux restes. Les Figures III-5-5 et III-5-6 illustrent une bonne technique pour prélever des indices qui semblent quasi inexistantes.

Conservation des indices des impacts d'oiseaux

5.6.6 Pour éviter qu'ils ne soient contaminés, les indices d'impact d'oiseaux doivent être placés dans des sacs de plastique ou de vinyle propres, de préférence dans un sac à fermeture par pression et glissière (Ziploc®). Le sac doit avoir les dimensions appropriées pour contenir l'échantillon ; celui-ci ne doit être ni comprimé ni plié pour s'ajuster aux dimensions du sac. Si les indices recueillis sont de petits fragments comme ceux qui sont illustrés dans les figures, ils peuvent être placés dans une enveloppe avant de les mettre dans le sac. Les plumes ne doivent jamais être coupées avant l'analyse. Il faut aussi prendre soin d'éviter tout contact avec une surface adhésive, car elle pourrait détruire ou enlever les sicots qui, selon l'espèce, peuvent être les plus utiles pour l'identification. Pour la même raison, ne jamais utiliser de ruban adhésif pour fixer les plumes. Éviter les papillons adhésifs Post-It® ou d'un type similaire. Chaque sac doit porter les renseignements suivants :

a) date de l'impact ;



Figure III-5-5. Un enquêteur pulvérise de l'eau propre sur ce qu'il soupçonne être un impact d'oiseau, puis l'essuie avec un linge propre.



Figure III-5-6. Plumes d'oiseau prélevées sur l'aéronef

- b) emplacement de l'impact ;
- c) heure du jour (heure locale) ;
- d) altitude, si l'aéronef est en vol ;
- e) étendue des dommages ;
- f) oiseaux observés dans la région.

Identification des oiseaux

5.6.7 Il est essentiel d'identifier les oiseaux pour déterminer les mesures de prévention qui doivent être prises à la suite des résultats de l'enquête sur la sécurité. Les mesures destinées à éviter ou à éliminer les oiseaux ne sont pas efficaces pour toutes les espèces. La plupart des États ont des naturalistes spécialistes de l'identification des oiseaux. Les bureaux nationaux d'enquête doivent mettre ces renseignements, par région au besoin, à la disposition des enquêteurs. La plupart des États ont des accords de coopération en vue d'éliminer le péril aviaire et une partie de ce travail consiste à identifier les oiseaux. Aux États-Unis, par exemple, l'identification des oiseaux est faite par la Smithsonian Institution, à Washington (D.C). La division aviaire (Smithsonian Division of Birds) est membre de l'équipe consultative sur le péril aviaire (Avian Hazard Advisory team), de sorte que toutes les données collectées sont mises à disposition pour les activités de prévention des impacts d'oiseaux partout dans le monde.

Chapitre 6

ENQUÊTE SUR LES PERFORMANCES DE L'AÉRONEF

6.1 INTRODUCTION

6.1.1 Le Groupe des performances de l'aéronef est normalement responsable de recueillir les renseignements sur les performances et la manœuvrabilité de l'aéronef et de réaliser les analyses correspondantes.

6.1.2 Dans le cadre du présent chapitre, l'enquête sur les *performances* consiste à établir et à analyser la trajectoire et l'assiette de l'aéronef en vol ou à la surface avant l'impact. Le Groupe des performances peut aussi être chargé d'évaluer le mouvement de l'aéronef après l'impact jusqu'à son arrêt complet. L'enquête sur la *manœuvrabilité* consiste à déterminer, et à analyser objectivement et subjectivement, la réaction de l'aéronef aux conditions atmosphériques et aux commandes des pilotes, ainsi qu'aux interactions avec les commandes automatiques de vol.

6.1.3 Dans certains cas, la principale tâche du groupe sera simplement d'établir et de documenter la trajectoire et l'assiette de l'aéronef, mais ses tâches seront plus nombreuses et particulièrement importantes dans le cas d'accidents comportant les éléments suivants :

- a) dépassements de piste et atterrissages trop courts ;
- b) perte ou dégradation de la maîtrise de l'aéronef en vol ou au sol ;
- c) impact sans perte de contrôle (CFIT) ;
- d) incursions sur piste, collisions aériennes, manœuvres d'évitement, etc. ;
- e) décrochages, survitesse ou assiettes inhabituelles ;
- f) cisaillement du vent et turbulence de sillage ;
- g) givrage, microrafales ou autres conditions météorologiques ;
- h) dysfonctionnements ou mauvaise application des commandes automatiques de vol ;
- i) défaillances moteur.

6.1.4 Dans ces cas, le Groupe doit aussi déterminer et documenter les performances et la manœuvrabilité réelles de l'aéronef par rapport à celles qui étaient prévues, ou ce qu'elles auraient pu être avec des techniques de pilotage, des interactions automatisation-systèmes et des conditions atmosphériques différentes.

6.1.5 Le présent chapitre décrit d'abord les tâches que le Groupe des performances peut normalement être appelé à accomplir, puis les sources de données et les outils qui peuvent l'aider à réaliser ces tâches.

6.2 ACTIVITÉS DU GROUPE DES PERFORMANCES

Généralités

6.2.1 Le Groupe des performances peut participer à une vaste gamme d'activités selon le type d'accident. Dans la plupart des cas, la première tâche du Groupe est d'obtenir les données nécessaires pour déterminer et documenter la trajectoire et l'assiette de l'aéronef durant la période qui a précédé l'accident ; il peut s'agir de la trajectoire en vol, de la trajectoire au sol ou d'une combinaison des deux. Selon le type particulier d'accident, il peut aussi être nécessaire d'établir la trajectoire de l'aéronef après l'impact pour aider l'enquête sur les facteurs de survie.

6.2.2 Certaines activités préliminaires d'établissement des faits peuvent être réalisées par le chef du Groupe des performances avant de convoquer tout le groupe, par exemple, une coordination avec les chefs d'autres groupes pour obtenir les données de l'enregistreur des données de vol, les données radar enregistrées, les données météorologiques, etc. Le chef peut aussi travailler avec les enquêteurs sur les lieux de l'accident pour documenter les marques au sol, les collisions avec des obstacles et l'emplacement des principaux composants de l'aéronef.

6.2.3 Les circonstances de l'accident détermineront les tâches que devra accomplir le Groupe, qui doit participer à ces tâches et quand elles doivent être réalisées. Les tâches normalement réalisées par le Groupe des performances sont décrites en détail ci-dessous.

Détermination de la trajectoire de l'aéronef en vol ou au sol

6.2.4 Une des fonctions de base du Groupe des performances est de documenter et d'analyser le mouvement de l'aéronef en vol ou à la surface. Il s'agit non seulement de la trajectoire de vol de l'aéronef, mais aussi de son assiette en tangage, en roulis et en lacet. Si l'aéronef était en vol, ces renseignements aident à déterminer si l'aéronef était maîtrisé au moment de l'impact. Pour les accidents au sol, tels que les dépassements de piste ou les incursions hors piste, ces renseignements seront utiles pour déterminer les performances de freinage réelles par rapport aux performances prévues ou pour évaluer la maniabilité.

6.2.5 Le Groupe des performances doit essayer de corrélérer chaque donnée disponible pour la reconstitution du mouvement de l'aéronef. La qualité générale de l'enquête sur les performances est meilleure lorsque les sources éventuelles de données sont évaluées et corrélées. Certaines données peuvent ne pas être fiables ou être contradictoires. Dans ce cas, le Groupe des performances doit faire preuve d'un bon jugement technique pour choisir les meilleures sources de données. Il est également prudent de noter les sources qui n'ont pas été employées et les raisons pour lesquelles elles n'étaient pas disponibles ou elles n'ont pas été utilisées.

Évaluation de la manœuvrabilité

6.2.6 Lorsqu'un accident présente des indices évidents ou probables d'une certaine perte de contrôle, le Groupe des performances doit évaluer la manœuvrabilité, ou la stabilité et la maîtrise, de l'aéronef. (Les termes « manœuvrabilité » et « stabilité et maîtrise » seront employés comme synonymes dans le reste du présent chapitre.)

6.2.7 La stabilité est la capacité inhérente de l'aéronef de retrouver son état d'équilibre initial, ou de s'en éloigner, après une perturbation. (Si l'aéronef a une stabilité neutre, il n'aura pas tendance à retrouver son état d'équilibre initial, ni à s'en éloigner, après une perturbation.) La maîtrise désigne la réponse d'un aéronef en mouvement qui n'est pas dans son état d'équilibre initial. La stabilité se divise en outre en stabilité statique et en stabilité dynamique. La stabilité statique désigne la tendance *initiale* du mouvement tandis que la stabilité dynamique désigne la *variation* du mouvement *en fonction du temps*. Comme la plupart des aéronefs sont symétriques par rapport à leur axe longitudinal, les caractéristiques de stabilité (et les analyses des scénarios d'accident) peuvent souvent être évaluées indépendamment

en examinant seulement le mouvement longitudinal ou seulement le mouvement latéral/directionnel. Les caractéristiques de stabilité dynamique longitudinale des avions sont généralement décrites selon les modes courte période ou phygoïde¹. Le mode courte période se rapporte à l'oscillation en tangage rapide et fortement amortie qui suit une perturbation survenant à une vitesse et à une altitude presque constantes. Le mode phygoïde se rapporte à un échange d'altitude et de vitesse, de période longue et légèrement amorti (parfois divergent) qui se produit à un angle d'attaque presque constant. Certains éléments qui peuvent compromettre la stabilité longitudinale sont le poids et le centrage, la vitesse anémométrique et les sollicitations brusques des commandes de l'aéronef.

6.2.8 La stabilité latérale/directionnelle de l'avion se caractérise par le mode *roulis hollandais*, un mode *spirale* faible, et un mode *roulis* fortement amorti. Le mode *roulis hollandais* est une oscillation latérale/directionnelle de l'angle d'inclinaison latérale, de cap et d'accélération latérale, qui est le résultat d'une glissade et d'un couplage réciproque des axes latéral et directionnel. La plupart des gros avions de transport (particulièrement les avions à réaction à ailes en flèche) présentent un mode *roulis hollandais* marqué, qui peut perdre l'amortissement aux hautes altitudes. D'autres éléments qui peuvent compromettre la stabilité latérale/directionnelle sont les dysfonctionnements des moteurs, le givrage, les dysfonctionnements de la commande de lacet, le centre de gravité et la vitesse anémométrique.

6.2.9 Le mode *spirale* désigne la tendance de l'avion à retourner à la position ailes horizontales (ou à s'en écarter) après une perte de contrôle. Le mode *spirale* peut être stable ou instable selon la configuration de l'avion et les conditions de vol. Le mode *spirale* est généralement moins important pour le pilote parce que, même s'il est instable, il est normalement facile à maîtriser avec une attention minimale de la part du pilote.

6.2.10 Le mode *roulis* est une résistance fortement amortie au taux de roulis. Son importance n'est généralement liée qu'à la réponse en roulis à des commandes latérales. Le mode *roulis* peut normalement être amorcé en augmentant la portance sur une aile et/ou en diminuant la portance sur l'autre aile. D'autres options de commande sont liées aux dispositifs de traînée asymétrique (déporteurs ou flaperons) avec le couplage réciproque de stabilité latérale provenant des commandes de lacet.

6.2.11 Les caractéristiques de stabilité et de maîtrise en régime de vol normal sans défaillances des systèmes sont généralement bien comprises par l'avionneur en raison des essais requis pour la conception et la certification. L'avionneur possède aussi des données d'essais en vol pour des conditions dépassant légèrement les limites d'utilisation, étant donné qu'elles sont requises pour la certification. Le Groupe des performances doit obtenir ces données et les analyser indépendamment si la manœuvrabilité de l'aéronef est un facteur dont il faut tenir compte dans l'accident. Un simulateur de formation approuvé ou le simulateur technique de l'avionneur peuvent être utiles dans ce cas. (L'utilisation de simulations dans les enquêtes est traitée plus bas.)

6.2.12 Une analyse détaillée de la manœuvrabilité exige un niveau de compétence élevé et beaucoup de travail et elle est généralement effectuée conjointement avec le Groupe de l'exploitation et peut-être avec le Groupe des performances humaines (ou des facteurs humains).

Analyse de la trajectoire de l'épave

6.2.13 L'analyse de trajectoire (déterminer la trajectoire d'un objet qui se détache de l'aéronef) est une tâche qu'exécute fréquemment le Groupe des performances. Même si elle s'appelle *analyse* de trajectoire, cette activité s'inscrit dans la partie de l'enquête qui porte sur la collecte des faits, car elle exige d'effectuer des calculs mathématiques reproductibles plutôt que d'interpréter les faits et les circonstances de l'accident.

6.2.14 L'analyse de trajectoire peut être utilisée de différentes manières. Le Groupe des performances peut être appelé à déterminer à quel endroit il convient de chercher un objet qui s'est séparé de l'aéronef à un certain moment, en

1. Différents types d'aéronefs ont des modes de mouvement caractéristiques différents. Seuls les modes caractéristiques des avions de transport de gros tonnage sont pris en compte dans le présent chapitre.

supposant que la trajectoire de l'aéronef à ce moment soit connue. L'analyse de trajectoire peut aussi être employée pour déterminer la trajectoire de l'avion et la séquence de rupture en vol en analysant l'emplacement des divers éléments de l'épave sur le sol. Une troisième application de l'analyse de trajectoire pourrait être de prédire la trajectoire d'un objet qui aurait heurté l'aéronef après s'être séparé de l'aéronef, par exemple, pour déterminer si un panneau ou un morceau de glace qui se détache de la cellule pourrait pénétrer dans un moteur.

6.2.15 Tous ces exemples exigent de connaître la trajectoire initiale, la traînée et le poids de l'objet, le vent (ou courant, s'il s'agit de l'eau) et/ou la direction de l'écoulement de l'air local. Il est probable qu'il sera nécessaire d'utiliser un programme informatique pour effectuer efficacement l'analyse, mais certaines analyses simples peuvent être faites manuellement.

Analyse des collisions (et des quasi-collisions)

6.2.16 Vu qu'il est chargé de déterminer la trajectoire de l'aéronef, le Groupe des performances joue un rôle majeur dans l'enquête sur les collisions et quasi-collisions en vol et au sol. Dans le cas des collisions, il faut aussi examiner minutieusement les rayures, les transferts de peinture et autres indices d'impact sur l'aéronef et tout autre objet heurté pour déterminer la position et les angles d'impact. Les techniques d'enquête sur les collisions sont expliquées plus loin dans le présent manuel.

6.2.17 Le Groupe des performances peut aussi être appelé à travailler seul ou avec le Groupe des facteurs humains pour effectuer des études de visibilité, c'est-à-dire pour déterminer si les pilotes de deux avions qui sont entrés en collision pouvaient se voir et à quel moment ils ont pu se voir, ou si le pilote de l'aéronef pouvait voir l'objet avec lequel il est entré en collision. Une autre tâche qui pourrait être confiée au Groupe serait de déterminer quelle manœuvre d'évitement aurait pu permettre d'éviter la collision et à quel moment elle aurait dû être exécutée.

Détermination des charges aérodynamiques

6.2.18 Dans le cas d'une défaillance du système de commandes de vol, d'une rupture structurelle ou d'une désintégration de l'aéronef en vol, le Groupe des performances peut être appelé à travailler avec le Groupe des structures pour calculer les charges aérodynamiques qui s'exerçaient sur les différentes parties de l'avion. Les charges aérodynamiques peuvent parfois être estimées avec une précision suffisante à l'aide de méthodes simples « d'étude préliminaire », mais il faut très souvent procéder à une analyse plus détaillée. L'avionneur peut normalement être d'un précieux secours dans ce cas puisqu'il a probablement acquis une quantité considérable de données sur les charges vérifiées en vol durant la conception et la certification.

6.2.19 Le Groupe des performances peut aussi être appelé à calculer les charges aérodynamiques pour aider à déterminer ce qui *n'est pas* arrivé ; par exemple, il peut être établi qu'il n'y a pas eu dépassement d'un certain angle d'attaque ou d'une certaine glissade, car autrement il y aurait eu rupture de structure.

Évaluation de l'aéroélasticité ou des vibrations d'aéroélasticité

6.2.20 L'aéroélasticité est l'interaction des déformations de la structure et des forces et moments aérodynamiques. Ces interactions peuvent se produire statiquement ou dynamiquement. Il peut être nécessaire pour le Groupe des performances de comprendre les caractéristiques aéroélastiques des accidents qui se produisent à des hautes vitesses.

6.2.21 Dans les gros avions à voilure en flèche, les déflexions de la structure résultant des charges aérodynamiques et inertielles peuvent avoir des incidences importantes sur la manœuvrabilité. À mesure que l'aile se courbe vers le haut sous charge, elle se tord normalement de plus en plus en piqué à partir de son emplanture jusqu'à son extrémité, ce qui modifie la répartition des charges sur l'envergure et réduit la portance totale par rapport à une aile

rigide. De même, l'empennage horizontal se tord, diminuant ainsi la stabilité longitudinale. La charge sur l'empennage horizontal déforme le fuselage arrière de l'avion modifiant l'angle d'attaque à l'empennage. La répartition du poids (carburant des ailes et charge payante du fuselage) déforme la structure proportionnellement aux accélérations de l'aéronef qui, à leur tour, changent les caractéristiques aérodynamiques.

6.2.22 La déflexion d'une gouverne tend aussi à tordre la structure à laquelle elle est fixée, réduisant l'efficacité des gouvernes par rapport à une structure rigide. Pour un aileron extérieur sur une aile à fort allongement, la diminution d'efficacité de l'aileron peut être très importante et peut même conduire à une inversion de l'efficacité de la gouverne².

6.2.23 Les effets des déformations indiquées ci-dessus peuvent être évalués en régime permanent ou quasi-permanent. Cependant, si une fonction de forçage est présente, comme le mouvement d'une gouverne, et qu'elle se produit près de la fréquence naturelle de la structure, ou à cette fréquence, il peut se produire des vibrations aéroélastiques ou un bourdonnement de gouverne. Normalement, la rigidité, la répartition de la masse et la compensation des gouvernes empêchent les vibrations aéroélastiques et le bourdonnement de se produire à moins d'un dépassement considérable du domaine de vol normal. Cependant, des dommages structurels ou du jeu dans les articulations ou les actionneurs des gouvernes peuvent produire des vibrations aéroélastiques ou des bourdonnements à l'intérieur du domaine de vol normal. Ces conditions peuvent aussi être le résultat d'un mauvais réglage des gouvernes après la maintenance ou de ruptures de fatigue et d'une dégradation structurelle due à l'âge ou à un mauvais entretien.

6.2.24 Les effets et les vibrations aéroélastiques sont des sujets complexes dont l'évaluation nécessite des compétences particulières. Le Groupe des performances devra probablement travailler étroitement avec le Groupe des structures et l'avionneur pour effectuer des analyses détaillées s'il est estimé que ces éléments ont joué un rôle dans l'accident.

Élaboration et exécution de simulations

6.2.25 Il est souvent impossible d'évaluer les accidents qui présentent des problèmes de maniabilité à l'aide de simples analyses. Des simulations aérodynamiques ou des essais en vol réels doivent être réalisés pour bien comprendre le problème. C'est au Groupe des performances qu'il incombe notamment de planifier et de réaliser les études comportant des simulations aérodynamiques et des essais en vol.

6.2.26 Il y a deux types fondamentaux de simulateurs de vol : le simulateur de formation et le simulateur technique ou de développement. Le meilleur simulateur à utiliser dépend du problème à résoudre. Si le problème concerne un avion en état de navigabilité avec une défaillance de système mineure ou très simple, utilisé dans le domaine de vol normal, et s'il n'est nécessaire d'obtenir qu'un nombre limité de données, un simulateur de formation peut être la meilleure solution. En cas de défaillance de système plus complexe, d'un régime de vol près de la limite du domaine de vol ou le dépassant (grande vitesse, angle d'attaque, glissade, taux de rotation, etc.) ou, s'il est nécessaire d'obtenir beaucoup de données, un simulateur technique ou de développement devrait être employé.

6.2.27 Dans le cas du simulateur de formation spécialement, il est impératif de consulter le constructeur du simulateur, et peut-être l'avionneur, pour bien comprendre la précision et l'exactitude du modèle de simulation. Les simulateurs de formation ne doivent être semblables à l'aéronef réel que pour certaines manœuvres et certaines défaillances et peuvent ne pas représenter l'aéronef réel pour d'autres défaillances ou d'autres conditions. Il convient aussi de noter que les simulateurs à restitution du mouvement ne fournissent pas d'indices d'accélération ni d'indices visuels identiques à ceux de l'aéronef réel. Le Groupe des performances ne doit pas seulement être conscient de ces limites, mais informer les autres membres de l'enquête de l'exactitude et des limites des simulations.

2. La structure de l'aile est normalement conçue pour être assez rigide pour que l'efficacité de l'aileron ne s'inverse pas aux vitesses et facteurs de charge normaux de l'enveloppe opérationnelle.

6.2.28 Dans certains cas, le Groupe des performances estimera qu'il faut collecter des données supplémentaires et les programmer dans le simulateur. Il peut être nécessaire d'obtenir des données en soufflerie ou des données de dynamique computationnelle des fluides (CFD). Ces deux sources ont leurs limites et exigent des investissements importants en temps et en argent et, comme pour le reste de l'enquête, le Groupe des performances doit déterminer avec soin si les questions auxquelles il tente de répondre justifient les dépenses. Cette préoccupation doit être constante, car les progrès de l'enquête peuvent éliminer la nécessité de collecter des données ou en limiter la quantité.

Essais de l'avion (en vol et au sol)

6.2.29 Dans certains cas, il sera nécessaire d'effectuer des essais en vol ou au sol pour obtenir des renseignements qui ne peuvent pas être obtenus à partir d'une analyse, d'essais en soufflerie, de simulations, etc. Les essais en vol sont généralement une mesure de dernier ressort en raison des coûts et des préavis nécessaires. Les essais au sol (circulation à la surface, décollage et essais stationnaires) sont moins coûteux, mais peuvent aussi exiger une planification et des préavis considérables.

6.2.30 La meilleure façon d'utiliser les essais de l'avion est d'obtenir des données à l'intérieur du domaine de vol qui peuvent être utilisées directement ou extrapolées pour le simulateur ou d'autres analyses de l'accident, plutôt que d'essayer de reproduire la manœuvre qui a causé l'accident. Il y a évidemment un risque à essayer de reproduire trop fidèlement les conditions de l'accident. Proposer de faire des essais à l'extérieur du domaine de vol certifié de l'avion ajoute un degré de complexité et de risque qui est rarement, ou même jamais, justifié³. Les essais ne devraient être réalisés que par l'avionneur ou par un organisme ayant amplement les compétences et l'expérience nécessaires pour réaliser le test exigé.

Animations par ordinateur

6.2.31 Le Groupe des performances doit souvent présenter des animations informatiques de l'accident. Une des principales responsabilités du Groupe est de veiller à ce que l'animation reproduise *fidèlement* le mouvement de l'avion. Il y a des cas où les limites des données disponibles (manque de données, erreurs des capteurs, décalage, échantillonnage insuffisant, etc.) obligent le Groupe des performances à manipuler les données dont il dispose pour pouvoir les utiliser dans l'animation. Il est essentiel que le Groupe fasse preuve non seulement de rigueur mathématique et d'un solide jugement technique dans toute manipulation nécessaire des données, mais qu'il indique clairement dans l'animation que les données ont été manipulées.

Évaluation des performances au décollage et à l'atterrissage

6.2.32 Vu qu'un nombre important d'accidents se produisent durant le décollage et l'atterrissage, le Groupe des performances doit souvent effectuer des analyses de distance d'atterrissage et de décollage. Ces calculs sont complexes parce qu'ils exigent d'analyser des forces aérodynamiques, de propulsion et de frottement de roulement changeantes.

6.2.33 Même si les données de performance dans le manuel du pilote ou le manuel d'exploitation peuvent donner des informations utiles, les conditions réelles de l'accident seront rarement les mêmes que celles qui figurent dans les tableaux de performances des manuels. Une différence de quelques nœuds dans la vitesse présumée de décollage interrompu ou de toucher des roues, ou quelques secondes de plus dans la sortie des aérofreins, peuvent avoir une incidence considérable sur la distance d'arrêt. Là encore, le Groupe des performances doit demander l'aide de l'avionneur pour obtenir des analyses plus précises.

3. Les conditions que l'avionneur a déjà testées en toute sécurité pour ajouter une marge de sécurité aux limites d'utilisation certifiées peuvent constituer une exception à cette règle.

6.3 SOURCES DE DONNÉES

Généralités

6.3.1 Il existe de nombreuses sources de données que le Groupe sur les performances peut utiliser dans son enquête. La plupart des données sont recueillies par d'autres groupes d'enquête. Le responsable du Groupe des performances doit déterminer quelles données doit collecter le groupe et veiller à ce que les autres groupes d'enquête collectent les autres données requises.

6.3.2 Le Groupe des performances doit s'attendre à ce que les données provenant de différentes sources présentent certaines contradictions. Cela est particulièrement vrai des déclarations des témoins oculaires, qui peuvent être une source de renseignements peu fiable. Toutes les données disponibles doivent être collectées et examinées avec soin pour déterminer celles qui sont les plus précises et les plus utiles pour l'analyse. Il peut être nécessaire d'obtenir des données supplémentaires d'essais en vol ou au sol, de simulations, etc., comme il est indiqué plus bas. Il est aussi utile d'indiquer quelles données n'ont pas été utilisées dans l'analyse finale et pourquoi.

Enregistreur de données de vol

6.3.3 Les données de l'enregistreur de données de vol (FDR) peuvent, bien entendu, être extrêmement utiles pour le Groupe des performances. Cependant, la lecture, la fiabilité et l'exactitude de chaque paramètre FDR utilisé doivent être évaluées. Par exemple, les vérifications des commandes de vol avant le vol peuvent être utiles pour confirmer les mesures de braquage des gouvernes.

6.3.4 Il faut vérifier les paramètres (zéros et biais) ainsi que l'échelle. Dans la mesure du possible, vérifier les paramètres en les comparant à d'autres paramètres. Par exemple, on peut intégrer des accélérations et les vérifier par rapport à la vitesse ou à l'altitude barométrique. Il faut aussi s'assurer que le paramètre est « raisonnable » ; par exemple, l'enquêteur doit se poser des questions si la lecture des données indique une accélération verticale de 4 g alors que l'avion n'est capable de produire que 2 g dans la condition de vol concernée.

6.3.5 Il est important aussi que l'enquêteur sur les performances connaisse la source de chaque paramètre et sa fréquence d'échantillonnage, la résolution des mesures et s'il y a eu filtrage. Certaines mesures peuvent être filtrées de façon inhérente ou décalées par rapport à l'élément réel à mesurer. Certaines mesures peuvent enregistrer la position d'un actionneur mais non celle de la gouverne actionnée.

6.3.6 L'enquêteur sur les performances doit aussi reconnaître les limites inhérentes de la fréquence d'échantillonnage et de la résolution des mesures pour interpréter les données FDR. Chaque point de données est en fait plutôt une plage de données, dont l'ampleur dépend de la fréquence d'échantillonnage et de la précision et la résolution de la mesure. Cette caractéristique est particulièrement utile pour déterminer le taux de variation d'un paramètre.

Enregistreur à accès rapide

6.3.7 Les données des enregistreurs à accès rapide (QAR) peuvent survivre à l'impact et compléter les données des FDR. Dans certains cas, le QAR enregistre beaucoup plus de paramètres que le FDR. Même si on obtient un bon ensemble de données du FDR, il faut examiner le QAR pour aider à vérifier ou à compléter les données du FDR. Les attributs (précision, fiabilité, fréquence d'échantillonnage, résolution etc.) qui s'appliquent aux données du FDR s'appliquent aussi aux données du QAR.

Données enregistrées des systèmes de bord

6.3.8 Ces données sont de plus en plus disponibles sur mémoire non volatile (NVM). Même si ces mémoires ne sont pas généralement renforcées pour résister aux chocs, elles survivent souvent aux impacts et à un certain degré d'exposition à la chaleur. Le Groupe des performances doit travailler avec le Groupe des systèmes pour établir le type de données qui peut être disponible. Ces groupes peuvent obtenir des données très utiles du système de maintenance central, du système de gestion de vol, du TCAS et de beaucoup d'autres systèmes.

ACARS⁴

6.3.9 De nombreux aéronefs transmettent automatiquement à des stations satellitaires ou au sol des données de performance et de maintenance qui sont utilisées pour la maintenance. Ces données sont généralement enregistrées durant certaines phases de vol prédéterminées (par ex., décollage, montée initiale, croisière, etc.) et durant certains dépassements ou défaillances des moteurs ou des systèmes. La valeur de ces données peut être limitée vu qu'il s'agit en général d'instantanés plutôt que de variations en fonction du temps comme dans le cas du FDR ou du QAR.

Données radar enregistrées

6.3.10 Les données radar enregistrées peuvent être une précieuse source d'informations pour le Groupe de performances. Il est important de bien comprendre le traitement et la précision de données avant de les utiliser. La précision des données dépend du type de radar et de la distance entre l'avion et l'antenne radar. Les données radar affichées sur l'écran radar du contrôleur ont généralement fait l'objet de plusieurs traitements. Même si les données traitées peuvent être utiles pour comprendre ce que le contrôleur a « vu » sur l'écran radar, l'enquêteur sur les performances doit commencer par prendre les données brutes et comprendre toutes les conversions, tous les filtrages, tous les calculs, etc. qui ont été appliqués aux données. Il ne faut pas oublier que la source des données d'altitude est normalement le transpondeur de l'avion et non le radar sol⁵.

6.3.11 Il existe souvent plusieurs ensembles de données radar provenant de sources radar indépendantes (services de contrôle d'approche voisins, contrôle en route, radar d'aéroport militaire, etc.). Des données des radars de bord peuvent aussi être obtenues des aéronefs de surveillance militaires. En général, toutes les sources radar doivent être utilisées pour obtenir les données radar les plus précises.

Marques d'impact

6.3.12 Les marques d'impact, tant au sol que sur l'épave, peuvent fournir de précieux renseignements pour comprendre l'assiette et la trajectoire de l'avion au moment de l'impact. Les marques d'impact (aussi appelées marques témoins ou traces au sol) doivent être complètement mesurées et documentées dès que possible, car elles sont souvent brouillées durant l'enquête. Les traces de dérapage et les traces de pneus sont bien sûr particulièrement utiles pour les dépassements de piste ou les sorties de piste.

6.3.13 Les marques témoins sur les indications d'instruments analogiques au moment de l'impact sont généralement une source de renseignements utiles. De nombreux instruments numériques ont des circuits mémoire ou des éléments lumineux qui peuvent enregistrer les conditions de l'impact et leurs circuits doivent être manipulés avec soin jusqu'à ce qu'ils puissent être analysés en laboratoire.

4. Système embarqué de communications, d'adressage et de compte rendu (ACARS).

5. Certains systèmes radar militaires donnent l'altitude radar.

Enregistrements vidéo et de caméras de surveillance

6.3.14 Les enregistrements vidéo, les téléphones portables et les caméras de surveillance, qui sont utilisés de plus en plus couramment, fournissent des images vidéo ou des images fixes qui sont très utiles pour l'enquêteur sur les performances. Les bandes vidéo provenant de caméras de l'épave doivent aussi être examinées si elles sont trouvées. Le Groupe des performances doit activement chercher ces sources potentielles d'information.

Récits des témoins oculaires

6.3.15 Les récits des témoins oculaires peuvent être la source la moins fiable de renseignements pour le Groupe des performances, mais bien évalués, ils peuvent donner des informations utiles. L'enquêteur sur les performances peut parfois obtenir des renseignements sur la trajectoire de l'avion à partir de l'endroit où se trouvait le témoin et des repères ou obstacles obstruant la vue de l'avion. Les déclarations des témoins doivent être employées comme informations secondaires ou de confirmation si les données enregistrées, décrites plus haut, sont disponibles⁶. L'interrogation des témoins et les techniques d'analyse des entrevues sont traitées ailleurs dans le présent manuel.

Enregistreur de conversations de poste de pilotage

6.3.16 Le Groupe des performances peut souvent tirer de précieuses informations de l'enregistreur de conversations de poste de pilotage (CVR). Le bruit de l'atterrisseur avant sur les joints de la chaussée de la piste peut parfois aider à déterminer la vitesse de l'aéronef. Les sons des moteurs peuvent être utilisés pour déterminer le régime moteur. Il est souvent possible d'obtenir le moment du toucher des roues et de l'envol ainsi que de la sortie des aéofreins, d'un avertissement de décrochage, d'un avertissement d'altitude, d'un avertissement de proximité du sol, d'annonces d'altitude radar, etc.

Enregistreurs d'images embarqués

6.3.17 Le Groupe peut aussi obtenir des renseignements utiles des enregistreurs d'images embarqués (AIR). Des événements qui n'ont pas été enregistrés par les autres enregistreurs de bord (FDR, CVR, etc.) ont pu l'être par l'AIR. Au moment de la rédaction du présent manuel, les AIR n'étaient pas couramment employés et il est donc impossible de déterminer toute l'étendue des renseignements qu'ils peuvent permettre d'obtenir.

Données météorologiques

6.3.18 Les données météorologiques peuvent être d'une grande importance pour le Groupe des performances. Les données sur les vents sont particulièrement utiles puisqu'il est nécessaire de comparer le mouvement de l'avion par rapport à la masse d'air et le mouvement de l'avion par rapport au sol. Certains systèmes de gestion de vol calculent la vitesse et la direction du vent à partir de données inertielles et des données de vitesse anémométrique et de cap. Dans la mesure du possible, l'enquêteur sur les performances doit vérifier ces données en les comparant aux données sur le vent provenant de sources au sol. Même si les données sur le vent calculées par le système de gestion de vol peuvent parfois être plus précises, l'enquêteur sur les performances doit bien comprendre comment elles sont obtenues avant de les utiliser dans une analyse.

6. Dans certains cas, le Groupe des performances devra évaluer des données enregistrées fiables pour aider à expliquer les observations des témoins plutôt que l'inverse.

6.3.19 L'enquête sur les performances de l'aéronef peut détecter de nouveaux modes de défaillance non prévus dans les nouveaux aéronefs ou de nouveaux modes apparus depuis peu et dus à la fatigue dans des avions plus anciens. Ces modes peuvent ou non être liés à l'accident sous enquête, mais ils doivent être signalés aux divers organismes afin qu'ils prennent les mesures nécessaires pour éviter des accidents. Ces observations peuvent au moins orienter les recherches et les inspections de maintenance jusqu'à ce que ces indices puissent être confirmés ou éliminés.

Chapitre 7

ENREGISTREURS DE BORD

7.1 GÉNÉRALITÉS

7.1.1 Le terme « enregistreurs de bord » désigne plusieurs types d'enregistreurs qui peuvent être installés à bord d'un aéronef dans le but de faciliter les enquêtes sur les accidents (voir la Figure III-7-1.). L'OACI exige, pour les fins des enquêtes sur les accidents, l'utilisation d'enregistreurs résistants aux impacts, qui comprennent les fonctions normalement associées aux enregistreurs de données de vol (FDR) et aux enregistreurs de conversations de poste de pilotage (CVR). Cependant, de nombreux aéronefs ont aussi à bord d'autres enregistreurs qui sont couramment employés pour les opérations aériennes quotidiennes mais qui ne sont pas résistants aux impacts. Ces enregistreurs peuvent être très utiles pour les enquêteurs et ils survivent souvent aux impacts même s'ils ne sont pas protégés contre les impacts. Les enregistreurs combinés, c'est-à-dire ceux qui enregistrent plusieurs fonctions sur le même appareil, sont aussi de plus en plus courants. Les enregistreurs résistants aux impacts sont conçus pour résister aux grandes forces d'impact, aux incendies de court et de longue durée, à la pénétration et à d'autres conditions environnementales afin de maximiser les possibilités de survivre à un accident. La cause la plus courante de non-survivabilité d'un support d'enregistrement est l'incendie. Ces différents types d'enregistreurs, les surviables comme les non surviables, sont souvent appelés « enregistreurs de bord » en général, mais il s'agit plus spécifiquement des enregistreurs suivants :

- a) Le FDR est un système surviable d'enregistrement des paramètres de données des systèmes de données de l'aéronef. Ces paramètres peuvent être exclusifs au FDR, mais le plus souvent sur les nouveaux aéronefs, les paramètres sont nécessaires et utilisés pour le fonctionnement des aéronefs et dans ces cas les données peuvent être directement enregistrées par le FDR. La plupart des États exigent l'enregistrement d'un nombre minimal de paramètres considérés comme obligatoires, mais dans la plupart des aéronefs de construction récente les FDR enregistrent un très grand nombre de paramètres qui dépasse fréquemment le nombre minimal de paramètres obligatoires.
- b) Le CVR est un système surviable d'enregistrement de l'environnement acoustique, des conversations de l'équipage de conduite dans le poste de pilotage et des communications radio entre aéronefs, à partir du microphone d'ambiance de poste de pilotage (CAM), des microphones montés sur tige et du système d'annonces publiques (PA) et des communications radiotéléphoniques.
- c) L'enregistreur d'images embarqué (AIR) est un système surviable utilisé pour capter et enregistrer les images du poste de pilotage. Au moment de la rédaction du présent manuel, l'enregistrement d'images n'était exigé par aucun État, mais plusieurs accidents majeurs ont mis en évidence les avantages de ce système pour l'avenir. Le terme « enregistrement vidéo » a été intentionnellement remplacé par « enregistrement d'images » pour insister sur le fait que l'enregistrement de la voix est une fonction distincte et que la fréquence d'image requise pour les enquêtes sur les accidents est très inférieure aux 30 images/seconde d'un enregistrement vidéo standard. Cinq images/seconde sont considérées comme suffisantes pour capter le mouvement et il est estimé qu'une durée d'enregistrement plus longue est préférable à une fréquence d'image plus élevée.
- d) L'enregistreur de liaison de données (DLR) est un système surviable qui enregistre les messages échangés entre l'aéronef et le sol. Cette méthode de communication remplace un grand nombre des échanges vocaux classiques entre l'aéronef et le contrôle de la circulation aérienne. Les enregistrements des DLR ont normalement la même durée que ceux des CVR.

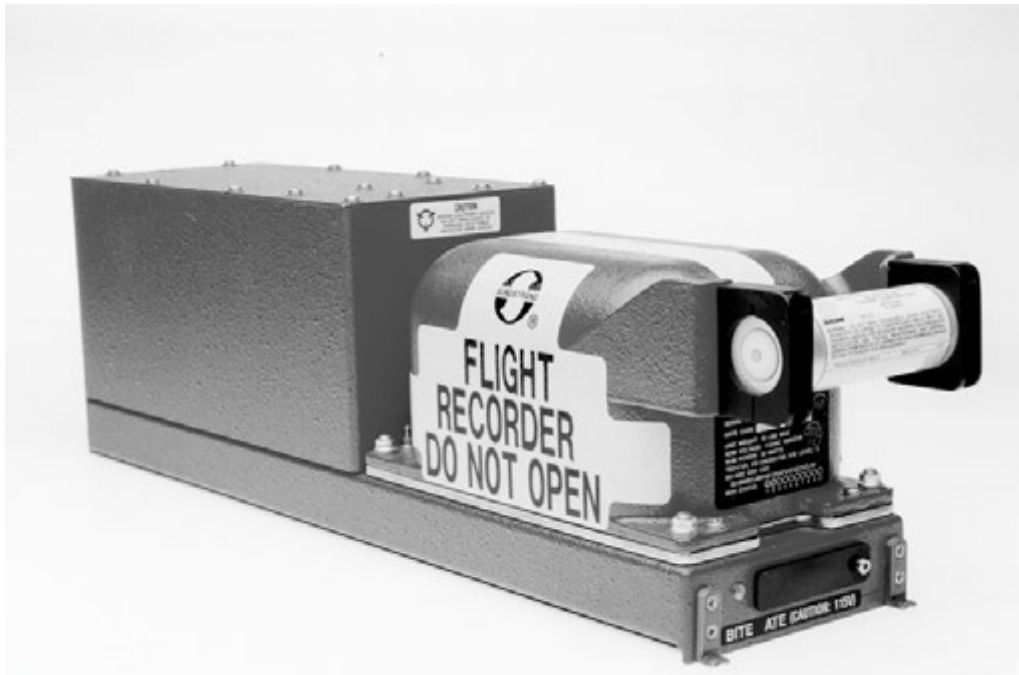


Figure III-7-1. Enregistreur de bord

- e) L'enregistreur combiné désigne un système survivable qui enregistre plus d'une fonction dans la même unité ou « boîte ». Cet enregistreur combine normalement les fonctions FDR et CVR mais peut aussi prendre en charge l'enregistrement d'images et de liaison de données, selon le cas. Afin d'assurer la redondance, la plupart des États exigent l'installation d'au moins deux enregistreurs combinés sur les gros avions commerciaux : un peut être installé à l'avant et l'autre à l'arrière de l'appareil.
- f) L'enregistreur à accès rapide/enregistreur à accès direct (QAR/DAR) est un système non survivable qui enregistre les paramètres de données ; il contient généralement des données pour une durée plus longue que le FDR et comprend une mémoire amovible, qui facilite l'accès aux données de vol, ou une option de téléchargement sans fil. Les QAR et les DAR peuvent enregistrer le même train/flux de données que le FDR ou, dans certains cas, recevoir des trains de données différents qui captent d'autres paramètres (Figure III-7-2).

7.1.2 Il est souhaitable que les services d'enquête sur les accidents de chaque État tiennent une liste du type et de l'emplacement des enregistreurs de données de vol et des enregistreurs de conversations pour chaque exploitant et type d'aéronef immatriculé dans cet État.

7.1.3 Les FDR, QAR et DAR enregistrent souvent de gros volumes de données qui, combinées au CVR, peuvent dans de nombreux cas fournir tous les renseignements nécessaires pour effectuer une analyse complète de l'accident. Ces dispositifs doivent être retirés de l'épave en priorité et la lecture des données doit se faire le plus tôt possible. Si l'État qui mène l'enquête ne possède pas lui-même les moyens suffisants pour lire et analyser les enregistrements, les enregistreurs doivent être remis à un service compétent d'un autre État. L'Annexe 13, Supplément D, contient des lignes directrices pour la lecture et l'analyse des enregistrements.

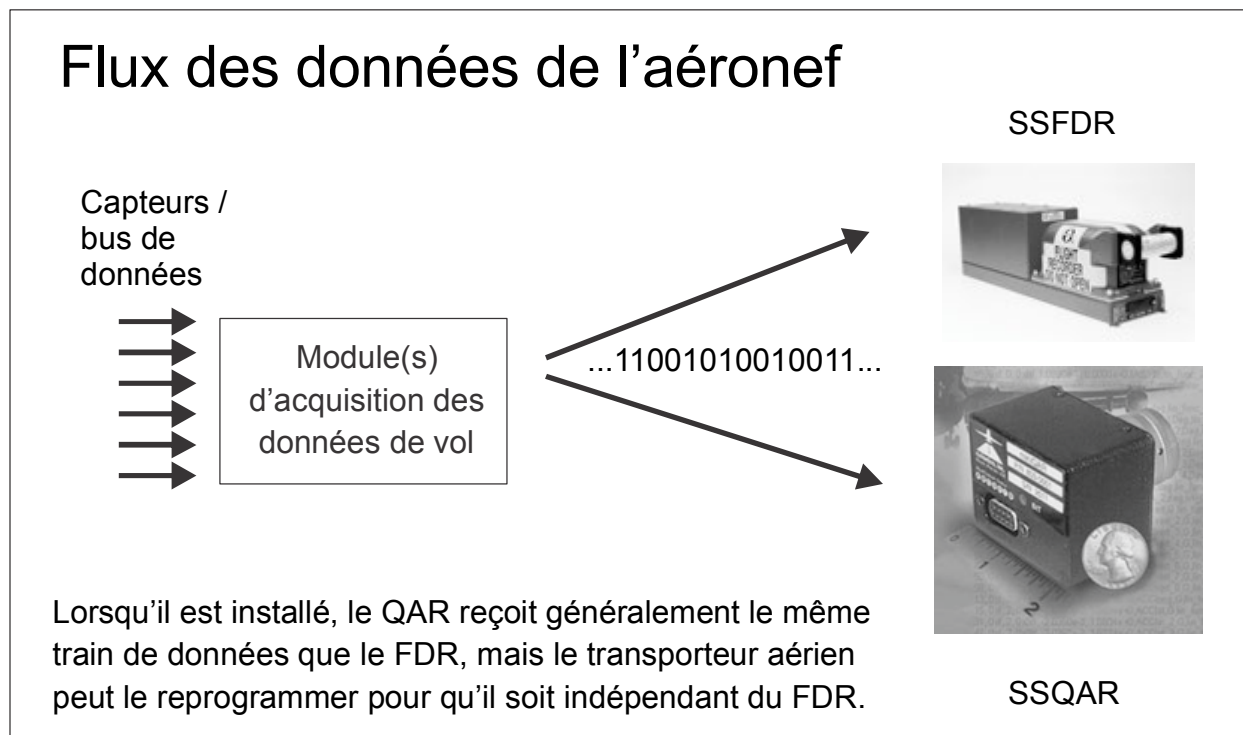


Figure III-7-2. Flux de données à bord

7.1.4 Les spécifications d'emport des enregistreurs de bord sur certains types d'aéronefs figurent à l'Annexe 6 ; dans plusieurs États l'installation des enregistreurs de bord sur les aéronefs de la catégorie transport public est prescrite par la loi tandis que dans d'autres leur utilisation fait l'objet d'arrangements administratifs.

Installation et protection

7.1.5 Les enregistreurs de bord prévus pour résister aux impacts sont généralement installés dans la queue de l'aéronef (dans la section pressurisée ou non pressurisée) où ils ont moins de probabilités d'être physiquement endommagés dans l'environnement de l'accident. Dans le cas d'enregistreurs combinés (où deux sont installés), il est recommandé qu'ils soient séparés et qu'un soit installé dans la queue de l'aéronef et l'autre dans le nez de l'aéronef. Même si le nez de l'aéronef présente des conditions de survie moins favorables lors d'un accident, la plus courte distance entre l'enregistreur et les microphones du poste de pilotage augmente la possibilité de capter les dernières millisecondes d'information sonore qui peuvent être cruciales pour l'enquête.

7.1.6 Le coffret qui protège les enregistreurs des impacts doit être conçu conformément aux normes internationales publiées à cet effet. Les normes d'Eurocae relatives à la protection contre les impacts sont des normes internationales acceptées.

7.1.7 L'alimentation électrique des enregistreurs de bord doit provenir de la barre omnibus, qui assure la plus grande fiabilité de fonctionnement des enregistreurs, sans compromettre l'alimentation de circuits essentiels ou de circuits de secours.

Localisation et récupération des enregistreurs de bord

7.1.8 Après un accident catastrophique, la récupération des enregistreurs de bord peut être une tâche difficile ; les conseils qui suivent sur ce qu'il faut chercher peuvent être utiles pour les localiser. Durant un incendie ou après un impact, l'apparence habituelle des enregistreurs peut être altérée et il peut être difficile de les reconnaître immédiatement. Même si les enregistreurs sont testés en fonction de normes de surviabilité rigoureuses, ils ne sont pas indestructibles. Les circonstances d'un accident dépassent parfois les limites de calcul et le boîtier de l'enregistreur est abîmé. Dans ce cas, les enregistreurs peuvent être plus difficiles à repérer. Par exemple, si l'écrasement est suivi d'un incendie intense, les enregistreurs peuvent être noircis et ne sont plus d'un orange vif. En outre, le boîtier résistant aux impacts qui protège le support d'enregistrement, normalement la pièce la plus lourde de l'appareil, peut être éjecté du coffret lors d'un violent impact. Il est important de récupérer ce module qui contient la mémoire de l'enregistreur et non la partie de l'enregistreur qui traite le signal. La Figure III-7-3 donne un exemple de l'apparence d'un enregistreur après un accident.

7.1.9 Dans certains cas, le boîtier résistant aux impacts peut être abîmé, exposant la bande ou le support d'enregistrement à semi-conducteurs. Il faut prendre soin d'éviter d'endommager encore plus ces composants délicats. Tous les morceaux de bande, les cartes électroniques et les puces qui se trouvent autour de l'enregistreur doivent être récupérés, dans la limite du raisonnable. Les puces exposées doivent être placées dans un sac électrostatique, s'il est disponible.

7.1.10 Il est important de noter l'emplacement des enregistreurs de bord et de documenter les conditions auxquelles ils ont été soumis sur les lieux de l'accident. En cas d'incendie, par exemple, l'intensité et la durée de l'incendie doivent être notées afin d'aider à déterminer la meilleure procédure à suivre pour récupérer les données sur l'accident.



Figure III-7-3. Support d'enregistrement endommagé

Récupération sous-marine

7.1.11 Si l'épave se trouve sous l'eau et l'emplacement des enregistreurs n'est pas évident, il peut être nécessaire d'utiliser un équipement spécial pour retrouver et récupérer les dispositifs. Le FDR et le CVR sont équipés de balises de localisation subaquatiques (ULB). Lorsqu'il entre en contact avec l'eau, ce dispositif active et envoie un signal acoustique pendant environ 30 jours. La pile de l'ULB doit être remplacée tous les 2 à 6 ans (selon le modèle) pour que la balise demeure efficace. Elle n'est pas conçue pour fonctionner après un impact sur le sol, mais seulement lorsqu'elle est immergée. Il est nécessaire d'utiliser un équipement spécial et souvent de faire appel aux organisations maritimes pour capter les signaux des balises et, selon les circonstances, pour les récupérer. Plusieurs laboratoires d'enquête ont de l'expérience dans ce domaine et les États peuvent recourir à leurs services s'ils ont besoin d'aide.

7.1.12 Si le FDR et le CVR sont sous l'eau, il est nécessaire de les récupérer et de les transporter de la bonne manière pour éviter tout dommage supplémentaire. Deux récipients étanches, comme une glacière ordinaire, légèrement plus grands que les enregistreurs doivent être apportés à l'endroit où se trouve l'enregistreur. Une fois localisés, les enregistreurs doivent être rincés à l'eau douce (distillée ou désionisée) et placés dans les récipients étanches. Ils doivent être transportés complètement immergés dans l'eau douce (ou dans l'eau du site s'il n'y a pas d'eau propre). Les deux enregistreurs doivent être constamment conservés dans l'eau car l'oxydation se produira rapidement, ce qui risque d'endommager les données enregistrées.

7.1.13 Les récipients peuvent être scellés à l'aide de silicone durant le transport, ce qui réduit au minimum l'exposition à l'air, et il est essentiel qu'ils soient immédiatement remis à un laboratoire qualifié. Les laboratoires expérimentés démontent normalement l'enregistreur dans l'eau afin de réduire au minimum l'exposition à l'air jusqu'au moment de la lecture.

Préparation des enregistreurs pour la lecture

7.1.14 Quel que soit le type d'enregistreur, il ne faut jamais essayer d'en faire la lecture sur les lieux de l'accident, que ce soit dans l'aéronef ou à l'aide de lecteurs. Même si l'enregistreur semble en bon état, il pourrait y avoir des dommages internes dus à la chaleur ou à l'impact. Des données critiques pour la sécurité ont déjà été perdues à cause d'une tentative prématurée de lire les données. Les risques d'endommagement sont nombreux : la bande peut se rompre, s'étirer, fondre ou s'entremêler avec des débris ; les circuits des enregistreurs peuvent être endommagés par des courts-circuits, les cartes mémoire internes peuvent se fêler et les puces mémoire peuvent fondre. La lecture des FDR et des CVR sans les précautions appropriées peut détruire les données de façon permanente.

7.1.15 Les enregistreurs de bord doivent être remis en mains propres à un service de lecture et d'analyse où ils peuvent être traités par un personnel qualifié. Ils doivent être adéquatement emballés pour l'expédition ou le transport afin d'éviter tout dommage supplémentaire. Aucune tentative ne doit être faite de nettoyer un enregistreur sur les lieux de l'accident, sauf le rincer à l'eau douce s'il est déjà mouillé. Dans la mesure du possible, il faut éviter toute exposition aux rayons X et à d'autres ondes radioélectriques, par exemple dans les portes automatiques.

7.1.16 Si l'État qui mène l'enquête ne possède pas lui-même de moyens suffisants pour lire et analyser les enregistrements, les enregistreurs doivent être remis à un service compétent d'un autre État. L'Annexe 13, Supplément D, contient des lignes directrices pour la lecture et l'analyse des enregistrements. Il existe plusieurs laboratoires dans le monde qui possèdent des moyens de lecture et ils sont en général prêts à aider les États et à leur fournir gratuitement des services de lecture des enregistreurs de bord. Dans la mesure du possible, tous les enregistreurs de bord concernant un même événement doivent être confiés au même laboratoire. Les informations contenues dans les enregistreurs sont souvent complémentaires, ce qui simplifie la corrélation croisée et la validation des données. Les données du FDR et du CVR peuvent aussi être immédiatement combinées pour obtenir une reconstitution complète du vol avec une transcription intégrée des sons et de la voix.

7.1.17 Avant de remettre un enregistreur à un organisme d'enquête pour en faire la lecture, il est utile de lui envoyer au préalable le plus d'informations possible sur l'enregistreur, comme les renseignements inscrits sur la plaque du fabricant (nom du fabricant, numéro de pièce et numéro de série), l'historique des modifications, une description de son état général et des photos numériques de l'enregistreur. Des renseignements supplémentaires sur l'accident (type et numéro de série de l'aéronef, lieu et description de l'accident) aideront aussi à préparer la lecture.

7.2 ENREGISTREURS DE DONNÉES DE VOL

7.2.1 Les données de vol, les conversations, les images et les messages de liaison de données peuvent être enregistrés sur trois types de supports d'enregistrement : bandes, disques optiques ou puces mémoire à semi-conducteurs. Tous les FDR en service enregistrent des données numériques mais ces données peuvent être enregistrées sur bande ou sur un support à semi-conducteurs. Les disques optiques ne sont utilisés que dans les QAR et les DAR parce qu'ils ne peuvent pas être efficacement protégés contre les impacts. La plupart des QAR et des DAR actuels sont à semi-conducteurs, comme les FDR. Les enregistreurs analogiques (comme les anciens enregistreurs à feuille métallique) ne sont plus utilisés. Les magnétophones ne sont plus fabriqués et sont remplacés par des mémoires à semi-conducteurs plus faciles d'entretien et plus fiables.

7.2.2 Il convient de noter que le présent chapitre se rapporte principalement à la fonction première des FDR, soit l'enquête sur les accidents ; un nombre croissant de transporteurs aériens utilisent cependant le FDR ou un QAR comparable pour la surveillance régulière et la prévention des accidents.

Objectif de l'enregistreur de données de vol

7.2.3 L'objectif premier d'un système FDR moderne est d'enregistrer toutes les données importantes sur la conduite et les performances de l'aéronef à partir des nombreuses données disponibles sur les bus de données de l'aéronef. Il y a souvent assez d'information pour reconstituer la trajectoire de vol en trois dimensions et déterminer l'assiette de l'aéronef, les forces qui s'exerçaient sur l'aéronef et la manière précise dont l'aéronef était piloté. Le FDR enregistre souvent aussi l'état de nombreux systèmes ainsi que les avertissements qui ont été déclenchés. Les QAR et les DAR enregistrent essentiellement les mêmes informations que le FDR mais ils sont plus faciles d'accès pour les opérations courantes et/ou pour l'enquête sur les incidents. À noter que les QAR optiques ne doivent pas être employés seuls pour les enquêtes sur les incidents (il faut toujours obtenir le FDR) car les disques optiques perdent souvent des données parce qu'ils ne peuvent pas enregistrer durant les turbulences ou les mouvements violents.

Supports d'enregistrement

7.2.4 Il y a quatre types sur supports de base : le disque optique (anciens QAR et DAR), les cartes PCMCIA (QAR et DAR), les bandes (anciens enregistreurs) et les semi-conducteurs.

Retrait et manipulation des supports d'enregistrement

7.2.5 Les précautions suivantes doivent être observées lors du retrait et de la manipulation des supports d'enregistrement. Quel que soit le type d'enregistreur, il ne faut jamais essayer d'en faire la lecture sur les lieux de l'accident ; les enregistreurs de bord doivent être remis en mains propres à un service de lecture et d'analyse où ils peuvent être traités par un personnel qualifié. Dans la mesure du possible, tous les enregistreurs doivent être confiés au même service vu que les informations qu'ils contiennent sont souvent complémentaires ; la corrélation croisée et la validation des données sont plus faciles et les informations peuvent être combinées pour obtenir une reconstitution complète du vol avec une transcription intégrée des sons et de la voix.

Lecture et analyse

7.2.6 Deux processus clairement définis sont appliqués aux FDR et aux CVR ainsi qu'aux autres enregistrements utilisés dans les enquêtes. Le premier consiste à extraire les données brutes enregistrées sur le support. Le deuxième consiste à convertir ces données en information significative, par exemple, des unités techniques dans le cas des données de vol et des sons utilisables dans le cas du CVR.

Processus d'extraction des données

7.2.7 Ce processus consiste à lire le contenu du support d'enregistrement. Dans le cas des enregistreurs à bande, les laboratoires d'enquête expérimentés possèdent les techniques nécessaires pour numériser le signal de la bande et ils emploient des logiciels spécialisés pour décoder l'information. Dans le cas des supports à semi-conducteurs, un logiciel d'interface approprié est utilisé pour communiquer avec la mémoire. Les installations de lecture des transporteurs aériens, qui sont principalement conçues pour l'entretien des enregistreurs, ne doivent pas être employées pour l'enquête. Les services d'enquête emploient un logiciel spécialement mis au point pour examiner les données au niveau du bit et ils possèdent des techniques spéciales pour extraire l'information des supports endommagés (Figure III-7-4).

Conversion en unités techniques

7.2.8 Une fois que les données ont été extraites de l'enregistreur, le processus d'analyse peut commencer. La conversion de toutes les données de vol enregistrées en unités techniques n'est plus pratique en raison du très grand volume de données enregistrées. Il existe maintenant des outils logiciels perfectionnés qui permettent de convertir interactivement les données binaires en unités techniques selon les besoins pour faciliter le processus d'analyse. Il est

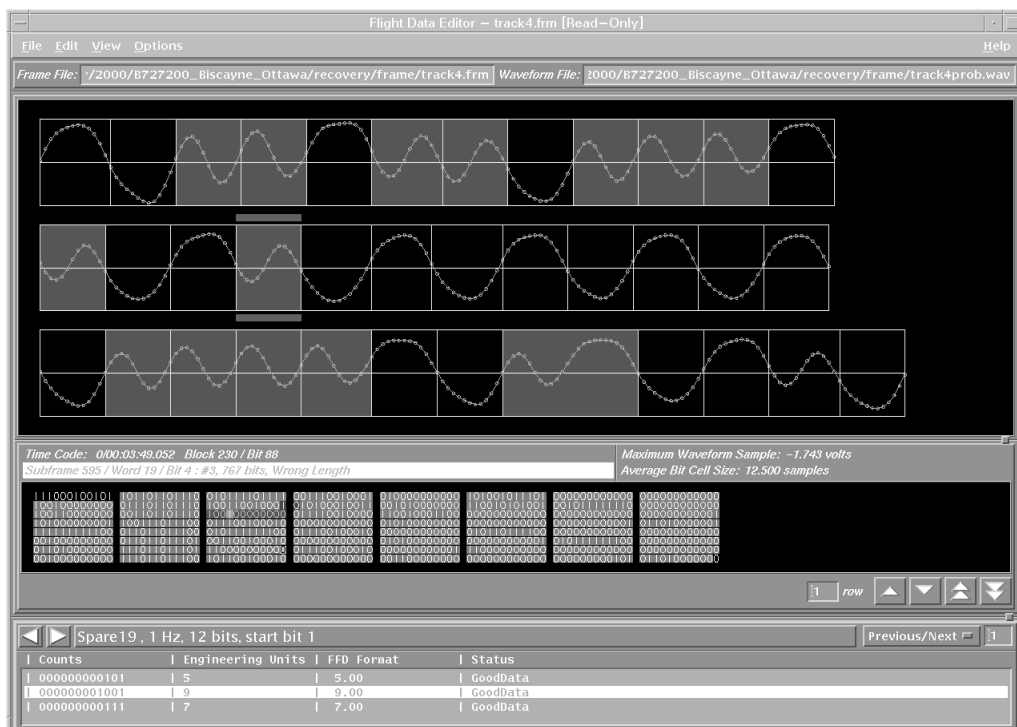


Figure III-7-4. Édition au niveau du bit — Correction pour rétablir les bits manquants

important pour les enquêteurs de comprendre ce processus et de travailler étroitement avec les spécialistes de ces outils logiciels. Des outils d'analyse appropriés, notamment les outils d'animation du vol, devraient permettre de travailler de manière interactive avec les données binaires et de ne convertir que les données requises pour l'application, éliminant ainsi un prétraitement inutile et inefficace des données. Si l'avionneur a besoin des données pour aider les enquêteurs, il exigera normalement les données binaires brutes, non les données prétraitées déjà converties en unités techniques.

7.2.9 Il n'est possible d'obtenir une lecture des données brutes du FDR que des organismes qui possèdent l'équipement de lecture approprié, ce qui signifie que l'enregistrement devra peut-être être confié à un organisme qui ne relève pas de l'État menant l'enquête. Il incombe au représentant accrédité de l'État dans lequel est effectuée la lecture des données de veiller à ce qu'un niveau de priorité et de sécurité approprié soit accordé à cette tâche pour obtenir une lecture précise et en temps utile.

Choix des paramètres

7.2.10 Dans les avions modernes actuels équipés d'instruments numériques produisant un volume important de données, les avionneurs enregistrent un volume de données qui dépasse largement les obligations prescrites et essaient de capter pratiquement toute l'information pertinente présente sur les bus de données. La génération la plus récente d'avions peut enregistrer des milliers de paramètres. Il est important que les enquêteurs aient des outils d'analyse appropriés pour valider la conversion des données brutes en unités techniques et pour explorer efficacement les données afin d'en extraire les paramètres pertinents pour l'enquête. Il est recommandé d'employer un système d'analyse professionnel capable de travailler interactivement avec les données de vol plutôt que des imprimés ou des tableurs ; ces supports étaient acceptables lorsque le nombre de paramètres était limité, mais avec l'énorme volume de paramètres disponible actuellement, les enquêteurs doivent utiliser des outils qui facilitent l'étude des données.

7.2.11 Le format des données est un point important lorsque les données de vol sont utilisées par plusieurs intervenants durant une enquête sur un accident. L'emploi de tableurs (tels que Microsoft Excel) pour communiquer les données de vol devient de plus en plus populaire, mais la plupart des services d'enquête et des avionneurs préfèrent de loin les données en format original. Il est difficile, lors du passage des fichiers tableurs d'un processus ou d'un système à un autre, de passer tous les paramètres enregistrés. Un aéronef moderne peut avoir plus d'un millier de paramètres et applications et Microsoft Excel ne peut pas traiter le volume de données en raison de la taille limitée des fichiers. Ce qui se fait normalement c'est de n'envoyer que les paramètres requis, mais cette méthode peut compromettre le processus vu que l'enquêteur ne possède pas toutes les informations et doit préjuger de ce qui est important.

7.2.12 Un autre problème, plus grave, que présente l'emploi de fichiers tableurs pour l'analyse est l'élément temps. Deux paramètres enregistrés à un échantillon par seconde ne sont en fait pas échantillonnés au même moment à l'intérieur de la seconde. Il y a un décalage relatif, souvent basé sur l'emplacement du mot. Par exemple, même si la position de l'aileron et le volant sont tous deux échantillonnés à une fréquence d'un échantillon/seconde, il y aura entre les deux un décalage de tout juste moins d'une seconde. Pour conserver la résolution temporelle des données d'origine, le fichier des unités techniques doit être incrémenté à des intervalles qui coïncident avec le débit des trames de données. Par exemple, un débit de 64 mots/seconde exige d'imprimer les données à des intervalles de temps de 1/64 pour conserver la même résolution temporelle pour chaque paramètre ; pour examiner 25 heures de données à l'aide des fichiers d'unités techniques, il faudra donc 64 lignes de données pour chaque seconde.

7.2.13 Les avionneurs sont aussi de plus en plus conscients du problème croissant de l'emploi de tableurs pour l'analyse et la communication des données de vol. Si un tableur est envoyé à quelqu'un (par exemple, l'avionneur) pour qu'il aide à analyser les données, le destinataire ne reçoit pas tous les paramètres, n'a pas la bonne résolution temporelle et ne peut pas vérifier le processus de conversion des unités techniques s'il soupçonne qu'il y a un problème. Le processus de conversion en unités techniques comporte plusieurs risques d'erreur, particulièrement dans le cas des paramètres qui ne sont pas fréquemment analysés. Les données des unités techniques ne doivent jamais être acceptées comme des faits sans qu'elles soient validées chaque fois.

Analyse

7.2.14 Le processus d'analyse est généralement effectué par une équipe multidisciplinaire comprenant des analystes de données de vol expérimentés qui travaillent en consultation avec des ingénieurs en performances, des ingénieurs en aéronautique, des spécialistes de l'exploitation technique et des spécialistes des systèmes. Durant l'analyse des données de vol et/ou des conversations enregistrées, les tracés graphiques, les transcriptions et les animations du vol sont des techniques efficaces pour commencer à concrétiser les éléments pertinents des enregistrements, qui commencent à donner une idée du déroulement de l'événement. La dérivation mathématique de paramètres supplémentaires, l'interpolation, l'extrapolation et d'autres techniques sont employées pour comprendre les données (Figure III-7-5).

7.2.15 *Performances de l'aéronef.* Une partie fondamentale de l'enregistrement des données de vol est de vérifier si l'aéronef se comporte conformément aux données ou si les données sont incorrectes. Cette vérification pouvait être effectuée par le passé sur des simulateurs de vol coûteux mais, grâce aux ordinateurs actuels, il est facile d'exécuter certaines tâches de validation sur un ordinateur personnel à l'aide des logiciels et des connaissances appropriées. L'avionneur possède aussi des simulateurs techniques qui peuvent être employés pour valider les données de vol ; dans les cas complexes, il devrait participer de près à ce processus en raison du grand nombre de paramètres aérodynamiques nécessaires et du niveau élevé de connaissances requis. Un simulateur à système de mouvement complet est utile lorsque l'enquête soulève des questions de mouvement et/ou d'ergonomie auxquelles il est préférable d'essayer de répondre en utilisant une réplique du poste de pilotage et les sensations de mouvement.



**Figure III-7-5. Laboratoire FDR/CVR
(photo publiée avec l'autorisation du Bureau de
la sécurité des transports du Canada)**

7.3 ENREGISTREURS DE CONVERSATIONS DE POSTE DE PILOTAGE

Généralités

7.3.1 La nécessité d'installer des CVR sur les avions de transport vient du fait que dans de nombreux accidents et incidents graves, il est essentiel de connaître les actions ou l'inaction des membres de l'équipage pour comprendre ce qui s'est passé. Outre les communications entre les membres d'équipage, l'enquête peut tirer des indices importants de l'environnement sonore du poste de pilotage.

Objectif du CVR

7.3.2 L'objectif premier du CVR est de fournir à l'enquête un enregistrement des communications dans le poste de pilotage, des communications radio avec les contrôleurs au sol ainsi que de l'environnement sonore général à bord de l'aéronef.

7.3.3 L'expérience montre que des sons importants sont souvent enregistrés, par exemple l'activation d'un commutateur, l'actionnement de la commande des volets et du train d'atterrissage, le déclenchement d'une alarme sonore, le bruit des moteurs, le bruit associé aux changements de vitesse perceptible dans le poste de pilotage, etc. Ce type d'information aide considérablement les enquêteurs, particulièrement lorsque le moment précis de chaque son peut être établi à partir de l'enregistrement.

Choix des paramètres

7.3.4 Les CVR enregistrent normalement les paramètres suivants :

- a) communications vocales et/ou numériques émises ou reçues par radio à bord de l'avion ;
- b) communications vocales des membres de l'équipage de conduite dans le poste de pilotage ;
- c) communications vocales échangées par l'interphone de bord entre les membres de l'équipage de conduite, dans le poste de pilotage ;
- d) signaux vocaux ou acoustiques identifiant une aide de navigation ou une aide d'approche et entendus dans l'écouteur de casque ou le haut-parleur ;
- e) communications vocales des membres de l'équipage de conduite sur le système de sonorisation de bord, si l'avion en est équipé et que le quatrième canal d'enregistrement n'est pas utilisé.

7.3.5 Pour enregistrer efficacement les voix des membres de l'équipage de conduite dans le poste de pilotage, un microphone d'ambiance est installé au meilleur endroit du poste de pilotage pour enregistrer les communications vocales provenant des premier et deuxième postes de pilote ainsi que les communications vocales des autres membres de l'équipage de conduite dans le poste de pilotage lorsqu'elles s'adressent à ces postes. Il faut prendre soin de bien positionner le microphone et d'ajuster ou d'augmenter les préamplificateurs et les filtres de l'enregistreur pour obtenir une très bonne intelligibilité des communications enregistrées dans les conditions de bruit qui règnent dans le poste de pilotage pendant le vol.

7.3.6 Les CVR doivent être installés de manière que chaque source d'information décrite plus haut soit enregistrée sur un canal distinct, les canaux étant attribués comme suit :

- a) canal 1 : chaque microphone, casque ou haut-parleur utilisé au premier poste de pilote ;
- b) canal 2 : chaque microphone, casque ou haut-parleur utilisé au deuxième poste de pilote ;
- c) canal 3 : microphone d'ambiance du poste de pilotage ;
- d) canal 4 : chaque microphone, casque ou haut-parleur utilisé au poste du troisième ou quatrième membre de l'équipage de conduite ou, lorsqu'il n'est pas utilisé à cet effet, microphones du système de sonorisation de bord.

Installation et protection

7.3.7 Le CVR doit être installé de manière à réduire au minimum la probabilité d'activer et de faire fonctionner accidentellement le dispositif d'effacement en bloc durant un impact.

Lecture et analyse

7.3.8 Le processus de lecture et d'analyse des CVR comprend en fait le processus d'extraction des données (même que celui employé pour les FDR) et le processus de transcription et d'analyse.

7.3.9 L'extraction des données consiste à obtenir un enregistrement qui puisse être utilisé pour la transcription et l'analyse du son. Il faut pour cela utiliser un équipement spécialisé de lecture de bande conçu pour reproduire la bande d'un type particulier de CVR. Les laboratoires expérimentés ont des platines de défilement ajustables utilisées à cet effet. Dans le cas des CVR à semi-conducteurs, les données sont extraites de la mémoire d'une manière semblable à celle qui est employée pour les FDR à semi-conducteurs, en employant les protocoles d'interface appropriés pour communiquer avec le dispositif de mémoire.

7.3.10 Dans le cas des magnétophones, il est nécessaire d'apporter des corrections de temps étant donné que la vitesse de lecture n'est pas exactement la même que la vitesse d'enregistrement. De petites erreurs de vitesse peuvent donner lieu à de grandes erreurs de synchronisation avec le temps. Les laboratoires expérimentés ont plusieurs techniques pour remédier à ce problème, comme l'utilisation de la fréquence de 400 Hz de l'aéronef pour corriger l'heure et, ce qui est encore mieux, la corrélation des manipulations VHF et des données de vol enregistrées en employant une régression linéaire sur toute la durée de l'enregistrement du CVR.

7.3.11 Les CVR à semi-conducteurs peuvent aussi présenter des problèmes de synchronisation. Certains systèmes modernes enregistrent l'heure GPS sur tous les enregistrements, ce qui rend la synchronisation relativement facile.

7.3.12 Que le CVR soit à bande ou à semi-conducteurs, une technique de compression numérique sans perte normalisée dans l'industrie, comme le format WAVE (fichiers portant l'extension .wav), est normalement utilisée à une fréquence d'échantillonnage de 22 kHz ou plus. Les laboratoires d'enquête expérimentés possèdent des techniques pour ralentir la parole tout en conservant le ton approprié, filtrer le bruit et effectuer une analyse spectrale pour identifier les sons et le comportement des moteurs. Toutes ces applications peuvent être employées pour améliorer considérablement la qualité des transcriptions des enregistrements CVR.

7.3.13 La transcription d'un enregistrement CVR est généralement effectuée par un groupe de spécialistes multidisciplinaires comprenant des spécialistes de l'analyse acoustique, des spécialistes de l'exploitation technique et des spécialistes de systèmes. L'objectif du groupe est de produire une transcription fidèle des conversations pertinentes. Les États doivent appliquer des privilèges et des protections considérables aux enregistrements des CVR. Le groupe ne devrait transcrire que les renseignements pertinents, car il n'est habituellement pas nécessaire de transcrire les renseignements personnels qui n'ont pas d'incidence sur l'enquête. Si la durée des conversations personnelles pendant

le vol est inappropriée, une observation de transcription peut être utilisée pour indiquer qu'une conversation personnelle s'est produite durant une période spécifique. Il peut parfois être nécessaire de transcrire les conversations personnelles et il faut faire attention à la transcription des mots réellement employés dans ces conversations. Dans la transcription des mots réellement employés, il convient de trouver un équilibre entre la protection de la vie privée des membres de l'équipage de conduite et les besoins de l'enquête. Il est aussi couramment accepté d'utiliser des symboles (#) pour remplacer les jurons. Les parenthèses () sont aussi employées pour indiquer que les mots qui y sont inclus ont été traduits d'une autre langue.

7.3.14 Les États ne doivent pas communiquer les enregistrements des CVR ni les transcriptions au public. Les enregistrements et les transcriptions doivent être adéquatement protégés contre toute possibilité de publication par inadvertance. Il peut cependant être essentiel pour l'analyse et la compréhension de l'accident d'inclure les extraits applicables de la transcription d'un enregistrement CVR dans le rapport final ou ses appendices. Dans ce cas, il faut prendre soin de s'assurer que le rapport final explique seulement ce qui a été dit et qu'il ne cite pas les mots réels utilisés dans une conversation personnelle. Les parties de la transcription qui ne sont pas essentielles à l'analyse ne doivent pas être divulguées. Le Chapitre 5 de l'Annexe 13 contient des dispositions sur les transcriptions des enregistrements des conversations dans le poste de pilotage dont il faut tenir compte s'il est jugé nécessaire d'inclure certaines parties des transcriptions dans le rapport final ou ses appendices.

Analyse exploitation/facteurs humains

7.3.15 L'objectif premier du CVR est d'enregistrer les communications des membres de l'équipage de conduite. Les enquêteurs d'expérience ayant la formation requise dans les domaines nécessaires analysent les enregistrements CVR pour les parties de l'enquête portant sur les facteurs humains et l'exploitation. L'analyse du contenu du CVR comprend généralement un examen des procédures d'exploitation, des interactions entre les membres de l'équipage et leurs performances. L'analyse peut être large pour englober les événements généraux ou elle peut être très spécifique pour analyser le mode d'expression d'un membre d'équipage ou la prononciation de certaines syllabes. Elle peut aussi donner des indices précieux sur les actions posées par les membres d'équipage par l'évaluation des grognements ou des tensions pendant qu'ils parlent. L'analyse des enregistrements CVR combinée aux résultats des autres parties de l'enquête peut faciliter l'identification des actions de l'équipage et de son état et de tout autre facteur susceptible d'avoir une incidence sur les performances humaines (comme un affaiblissement dû à des conditions médicales).

Analyse acoustique

7.3.16 Le but premier du CVR est d'enregistrer les communications vocales. La plupart des systèmes CVR sont conçus pour enregistrer la voix et ont une largeur de bande et/ou des filtres qui optimisent l'enregistrement de la voix humaine. Le CVR n'est pas un enregistreur acoustique, c'est-à-dire que même si le CVR enregistre tous les sons reçus par les microphones, ceux-ci ne captent pas nécessairement tous les sons de l'aéronef. En outre, vu que chaque aéronef et son poste de pilotage peuvent évoluer dans des conditions environnementales différentes, la fidélité des microphones peut grandement varier d'un aéronef à l'autre. L'intégrité de l'installation et l'âge du système CVR jouent aussi un rôle dans la qualité de l'enregistrement.

7.3.17 Cependant, même avec ces limites, il est possible d'obtenir des données acoustiques utiles pour l'analyse de plusieurs éléments de l'aéronef, notamment le régime moteur, la vitesse de rotation des hélices, la vitesse du rotor, le fonctionnement de la transmission, le fonctionnement de la pompe hydraulique et la vitesse sol. Ces informations peuvent être enregistrées sur le canal du microphone d'ambiance. Même s'il est possible d'analyser les sons et de faire des calculs précis, il est généralement impossible de localiser avec précision une source acoustique à l'aide d'un enregistrement provenant d'un microphone d'ambiance parce qu'il est fait à partir d'une seule source. Il est également impossible de déterminer, par exemple, quel moteur est en cause dans une défaillance moteur ; l'enregistrement indique simplement une diminution de la fréquence d'un signal, mais il est impossible de déterminer à partir de l'enregistrement s'il s'agit du moteur gauche, droit ou central.

7.3.18 L'analyse acoustique à l'aide d'un enregistrement CVR d'un accident doit être effectuée avec prudence. L'analyse peut orienter l'enquête, mais l'interprétation acoustique peut varier et doit être confirmée par des indices matériels ou par d'autres sources de données.

7.4 ANIMATION DU VOL

7.4.1 La popularité de l'animation des vols a considérablement augmenté, particulièrement avec l'apparition des programmes d'analyse de données de vol utilisés par les transporteurs aériens pour surveiller régulièrement leurs données de vol afin d'améliorer l'efficacité et la sécurité. Il existe de nombreux systèmes d'animation des vols disponibles actuellement et les enquêteurs doivent faire preuve de prudence lorsqu'ils les utilisent parce qu'ils peuvent être incapables de représenter un accident/incident complexe avec précision, ce qui peut conduire à de mauvaises interprétations. Les systèmes employés par les transporteurs aériens sont généralement des systèmes automatiques qui peuvent produire une séquence animée en quelques minutes. Ils sont utilisés pour reproduire rapidement des événements bénins qui se sont produits pendant le service, principalement à l'intention des membres de l'équipage de conduite (Figure III-7-6).

7.4.2 Les avantages de l'animation sont qu'elle permet d'assimiler des informations complexes et qu'elle facilite l'analyse. Dans certains cas, lorsque les scénarios analysés sont complexes, l'animation du vol peut crédibiliser les résultats et les recommandations qui s'ensuivent. Ses désavantages sont la puissance de l'image (voir c'est croire),



Figure III-7-6. Animation de vol courante

l'invention d'éléments qui n'existent pas vraiment, l'information subjective et le fait de tirer des conclusions sans réellement comprendre les principes sous-jacents. Les limites actuelles des fréquences d'échantillonnage, de la résolution et de l'architecture des aéronefs (d'où sont tirés les paramètres), les problèmes d'interpolation et des facteurs difficiles à mesurer comme les conditions météorologiques ont tous une incidence sur l'objectivité et la qualité de l'animation.

7.4.3 Dans une enquête sur un accident, lorsque la réputation de l'équipage de conduite est souvent en cause et les enjeux sont élevés, l'utilisation d'un outil automatisé comporte un risque considérable. Il est extrêmement important que l'équipe d'enquête soit pleinement consciente de chaque étape du processus d'animation pour que toutes les conclusions tirées soient bien étayées. Le service d'enquête devrait penser à utiliser une mise en garde indiquant par exemple que toute conclusion fondée sur telle ou telle animation doit être complètement examinée compte tenu de la manière dont elle a été produite. Vu la subjectivité des animations de vols et le fait qu'elles sont puissantes et fascinantes, les services d'enquête doivent prendre grand soin de s'assurer que l'animation représente fidèlement ce qui est vraiment arrivé. Compte tenu de la popularité de l'animation dans les programmes d'analyse de données de vol des transporteurs aériens, les enquêteurs doivent résister à la tentation d'employer un outil conçu pour des séquences de vol « normales » pour illustrer des données sur un accident qui contiennent généralement des scénarios de vol anormaux qui sont à l'extérieur du domaine de vol de l'aéronef. Il est aussi recommandé de ne pas présenter une animation du vol à un trop grand nombre de personnes avant que les experts responsables de son développement soient convaincus qu'elle représente fidèlement la situation réelle et que toutes les hypothèses utilisées pour la produire soient bien comprises et bien documentées. La plupart des grands laboratoires spécialisés dans les enregistreurs de bord du monde entier ont de grandes compétences et une expérience importante en animation des vols. Les compétences normalement requises sont une solide expérience dans le domaine des performances des aéronefs ou une formation d'ingénieur professionnel combinée à une expérience des vols opérationnels.

7.5 AUTRES DISPOSITIFS D'ENREGISTREMENT

Dispositifs de collecte de données de vol

7.5.1 De nombreux aéronefs sont équipés de dispositifs autres que des FDR et des CVR, qui sont utilisés régulièrement pour les vols quotidiens des transporteurs aériens. Même si ces dispositifs ne sont pas résistants aux impacts, ils peuvent contenir des données utiles pour l'enquête sur l'accident. Les progrès dans le domaine de l'aéronautique ont permis aux aviateurs, aux fabricants de composants et aux exploitants de collecter et d'utiliser régulièrement des données pour suivre les procédures de maintenance, diagnostiquer les problèmes, établir les tendances des données et identifier les préoccupations en matière de sécurité. Les transporteurs aériens qui utilisent les données régulièrement ont pu améliorer leur efficacité opérationnelle et réduire ainsi leurs coûts.

7.5.2 Ces programmes de collecte et d'analyse des données tels que l'assurance de la qualité des opérations aériennes (FOQA) ou le programme d'analyse de données de vol (FDAP) pour les avions et le système de contrôle d'état et d'utilisation (HUMS) pour les giravions ne sont pas obligatoires dans de nombreux États, mais leur application est fortement encouragée. L'analyse fréquente des données de vol est utile parce qu'elle permet une vérification informelle des systèmes de bord, ce qui peut contribuer à assurer l'intégrité du FDR et mettre en évidence toute anomalie qui pourrait conduire à des problèmes à l'avenir. Même si le FDR obligatoire est employé comme dispositif d'enregistrement, les données de vol sont le plus souvent tirées d'un enregistreur QAR ou DAR supplémentaire qui n'est pas résistant aux impacts. Les QAR et les DAR peuvent enregistrer les mêmes données que le FDR obligatoire ou, dans certains cas, un peu plus ou un peu moins de données que le FDR. Ces dispositifs sont généralement installés près du poste de pilotage, ce qui en facilite l'accès pour l'extraction quotidienne. Les dispositifs QAR ou DAR plus anciens peuvent utiliser des disques optiques ou des bandes comme support d'enregistrement. La plupart des QAR et des DAR actuels sont des dispositifs à semi-conducteurs, comme les FDR, ou utilisent une carte mémoire (carte PC ou PCMCIA) pour stocker les données. La technologie la plus récente permet la transmission sans fil des données de

l'aéronef à la station sol sans intervention humaine. Les transporteurs aériens utilisent un logiciel automatisé pour passer au crible des centaines d'heures de données de vol et repérer certains dépassements prédéterminés.

7.5.3 Il convient de noter que les dispositifs facultatifs de collecte des données tels que les QAR et les DAR ne doivent pas être utilisés seuls pour les enquêtes sur les accidents (il faut toujours utiliser les FDR et les CVR). Ces dispositifs ne sont pas protégés contre les impacts et ne sont pas conçus pour avoir la même surviabilité ni pour satisfaire aux mêmes prescriptions opérationnelles que les enregistreurs obligatoires et ne sont donc pas aussi fiables. Par exemple, les disques optiques perdent souvent des données parce qu'ils ne peuvent pas enregistrer durant les turbulences ou les mouvements violents. Même si l'utilisation proactive des données est un effort louable qui contribue considérablement à la prise de mesures de sécurité préventives, ces données ne peuvent pas remplacer les données des enregistreurs obligatoires durant une enquête sur un accident. Les données des QAR et des DAR peuvent renforcer le processus, mais elles doivent toujours être obtenues dans le format le plus brut disponible étant donné qu'il n'y a de certification des outils logiciels utilisés et que les données de sortie peuvent être lissées ou calculées. Ces dispositifs supplémentaires de collecte des données sont un outil de plus qui peut aider à mener l'enquête.

Autres sources de données de vol

7.5.4 Un grand nombre des instruments et de l'avionique des aéronefs modernes équipés de la technologie numérique contiennent des mémoires non volatiles (NVM), qui peuvent fournir des données cruciales non captées par aucun autre instrument. Ces mémoires sont particulièrement utiles lorsqu'il n'y a pas de FDR ni de CVR à bord de l'aéronef. Beaucoup d'États n'exigent pas que les avions cargo, les avions à réaction d'affaires, les hélicoptères, les avions militaires ou les appareils de l'aviation générale soient équipés de FDR ou de CVR. Dans ces cas, les NVM sont la seule source d'information. Bien que ces dispositifs ne soient pas protégés contre les impacts, il est souvent possible d'en tirer des données utiles, même en cas d'accident catastrophique.

7.5.5 Les avionneurs devraient avoir des renseignements sur tout système de bord utilisant une NVM. Les systèmes suivants sont généralement dotés de NVM : ordinateur de gestion de vol (FMC), commande électronique numérique de moteur pleine autorité (FADEC), EEC, panneaux radio, jauges carburant, système mondial de localisation (GPS), système d'affichage des paramètres moteurs et d'alerte de l'équipage (EICAS), enregistreur d'analyseur de puissance (PAR) et système d'avertissement de proximité du sol améliorés (EGPWS).

7.5.6 Certains FADEC peuvent enregistrer jusqu'à quatre heures de vol, diagnostiquer les domaines problématiques et indiquer l'état récent de fonctions essentielles des moteurs telles que les pressions, la position de la manette des gaz, les températures, le débit carburant, le régime moteur et le réglage de l'allumage. Les données de maintenance stockées peuvent même inclure l'altitude-pression, la vitesse anémométrique, le réglage moteur et les codes de défaillance moteur. Les systèmes EGPWS enregistrent une grande quantité de données paramétriques sur une période de 10 secondes avant et de 20 secondes après tout événement qui déclenche un avertissement EGPWS. Ces données comprennent notamment les suivantes :

- a) altitude AGL calculée et corrigée sur la base de toutes les sources ;
- b) taux de variation d'altitude ;
- c) angles de tangage et de roulis de l'aéronef ;
- d) angle d'attaque du fuselage ;
- e) accélération longitudinale ;
- f) accélération normale ;

- g) accélération inertielle (axe terrestre) ;
- h) écart de pente de descente ;
- i) température en °C ;
- j) réglages de portée pour l'écran de navigation 1, 2 ;
- k) indicateur d'aéronef en vol ;
- l) indicateur de mode approche.

7.5.7 Certains dispositifs du tableau de bord, comme les dispositifs de surveillance du fonctionnement des moteurs peuvent stocker et télécharger des données sur les moteurs, notamment les suivantes :

- a) régime ;
- b) température de la culasse ;
- c) température des gaz d'échappement ;
- d) température de l'huile ;
- e) pression d'admission ;
- f) débit carburant ;
- g) carburant total utilisé ;
- h) tension de batterie.

7.5.8 L'emploi de dispositifs de navigation GPS devient de plus en plus courant, même sur les avions monomoteurs à pistons de l'aviation générale. Les dispositifs plus anciens (avant 1990) utilisaient des mémoires vives statiques (SRAM). Les dispositifs plus récents emploient généralement des mémoires NVM et, selon la marque et le modèle, ils peuvent contenir des données sur le plan de vol, la position, l'altitude, la route, les fréquences radio et les codes transpondeur. En général, pour des raisons de conception, les dispositifs portatifs contiennent plus de données historiques qu'un dispositif sur tableau de bord. Les aéronefs sans moteur, comme les planeurs, sont généralement équipés de dispositifs d'enregistrement chronologique des données spécialement conçus pour ces appareils, qui enregistrent des données paramètres utilisées pour la formation après vol, dans les compétitions pour marquer des points ou dans les tentatives de battre des records internationaux. Certains de ces enregistreurs de données utilisent des moyens mécaniques pour effacer les données au cas où le dispositif serait démonté et code les données stockées dans un format propriétaire protégé, une précaution visant à décourager la falsification des données.

7.5.9 Les dispositifs à mémoire NVM se divisent en plusieurs catégories selon l'objectif premier du dispositif et sa conception. Certains dispositifs, comme les GPS portatifs et les enregistreurs de données, sont conçus avec des interfaces qui permettent de télécharger et de présenter l'information enregistrée sur un ordinateur personnel équipé du logiciel approprié disponible sur le marché. Le téléchargement des données de ces dispositifs, lorsqu'ils ne sont pas endommagés, exige peu de connaissances spécialisées, les outils logiciels sont faciles à obtenir et les données peuvent être présentées dans un format facile à comprendre. D'autres dispositifs, comme certains écrans multifonctions utilisent des cartes mémoire flash, comme celles qui sont employées dans les appareils photo numériques, pour permettre de télécharger les données enregistrées. Ces dispositifs peuvent exiger un peu plus de connaissances pour effectuer le téléchargement et l'analyse, mais les ressources sont faciles à obtenir. De nombreux autres dispositifs, comme certains

écrans de pilotage principaux et les systèmes EGPWS contiennent des interfaces internes permettant de télécharger les données dans certaines circonstances, telles que le dépannage ou la maintenance en usine. Ces dispositifs exigent généralement l'aide du fabricant, du moins au début, étant donné que les outils employés pour télécharger et analyser les données sont en général des logiciels et matériels maison de catégorie laboratoire, et les données extraites exigeront de bonnes connaissances de leur conception pour pouvoir les interpréter. De nombreux dispositifs, comme certains affichages de paramètres moteurs, dispositifs de référence d'altitude et de cap, dispositifs de commande des volets, etc., peuvent contenir différentes quantités d'information sur les dépassements et les erreurs internes. Ces informations peuvent être conservées sur la mémoire NVM à l'intérieur du dispositif, mais l'extraction et l'interprétation des données exigent des connaissances spécialisées étant donné qu'il n'existe aucune interface pour le téléchargement ordinaire des données.

7.5.10 Les avionneurs devraient avoir des renseignements sur tout autre dispositif de bord utilisant une NVM. Étant donné la variété des instruments, il convient de contacter un grand laboratoire d'enquête pour savoir comment manipuler un dispositif. Dans les composants à mémoire SRAM, comme les premiers modèles de GPS portatifs, on peut utiliser une pile de secours pour préserver les données lorsque le dispositif n'est pas alimenté en électricité. Le déchargement d'une pile à la suite d'un dommage mécanique ou de la corrosion par l'eau peut détruire ces données et les rendre irrécupérables. Le temps est primordial dans la manipulation de ces dispositifs. Il faut maintenir l'alimentation de tout dispositif qui utilise une mémoire volatile. Si le dispositif a été exposé à l'eau, particulièrement à l'eau salée, il est impératif qu'il soit rincé à l'eau pure déionisée le plus tôt possible et séché rapidement, idéalement dans un environnement légèrement sous vide. Si cela est impossible, il doit être transporté submergé dans l'eau pure déionisée jusqu'à un laboratoire capable de manipuler ces dispositifs. Dans le cas des mémoires NVM, la pile doit en général être retirée étant donné que l'alimentation électrique n'est pas nécessaire pour préserver les données et qu'elle peut en fait contribuer à la perte de données s'il y a corrosion ou si le dispositif est mis en marche et qu'il commence à écraser d'anciennes données. Tous les dispositifs, même les NVM, contiennent des piles de secours internes destinées à préserver la mémoire volatile pour l'horloge système et d'autres données du système d'exploitation. L'humidité qui contient des sels ou d'autres impuretés minérales favorise immédiatement la corrosion, qui peut rapidement — en quelques heures — éroder suffisamment les tracés de circuit et d'autres parties métalliques pour couper l'alimentation de la pile de secours des dispositifs à mémoire volatile, et peut-être même endommager un dispositif NVM au point de ne plus pouvoir récupérer les données normalement. Comme presque toute l'eau contient des traces de sels et une certaine quantité d'oxygène libre dissous, ce processus peut se produire, et se produira (quoique plus lentement), même si le dispositif demeure complètement immergé. Le processus de corrosion est fortement accéléré si le dispositif est conservé dans un endroit chaud. L'eau déionisée ne contient que peu ou pas d'oxygène dissous et, conservée au frais, elle constitue un meilleur environnement de conservation que l'eau naturelle.

7.5.11 Comme la plupart de ces dispositifs ne sont pas protégés contre les impacts, il sera impossible d'extraire les données des mémoires NVM qui ont été endommagées mécaniquement ou par la corrosion en utilisant des moyens normaux. Cependant, vu leur faible taille et leur faible masse les mémoires flash de ces dispositifs survivent, mais il faudra faire appel aux compétences du fabricant pour reconstituer les données stockées directement sur ces mémoires. En fait, compte tenu des méthodes de fabrication et des outils de conception utilisés pour construire les composants électroniques modernes, il se peut que même le fabricant ne possède pas le savoir-faire nécessaire. La méthode la plus prometteuse d'extraction des données consiste à récupérer la ou les mémoires flash contenant les données paramétriques intéressantes et de les installer dans un dispositif de même marque et de même modèle et en bon état de fonctionnement. Il peut être nécessaire d'avoir recours aux compétences du fabricant pour déterminer quelles puces contiennent les données enregistrées et/ou tout autre code de système d'exploitation nécessaire pour extraire correctement l'information avec un dispositif de remplacement.

Enregistrements visuels

7.5.12 Les données des appareils photo et des caméras vidéo numériques contribuent de plus en plus aux enquêtes. Les passagers à bord de l'avion ou des témoins au sol ont parfois des appareils photo numériques ou des caméras vidéo et l'aéronef peut être équipé d'enregistreurs destinés à filmer un vol panoramique. Les caméras de

sécurité des aéroports peuvent donner des informations sur le chargement ; celles qui sont situées sur des ponts, des péages ou des immeubles situés dans le voisinage de l'accident ou de l'aéroport peuvent aussi fournir des informations. Un grand nombre de ces appareils enregistrent les données dans des formats comprimés ou propriétaires qui rend la récupération des données plus difficile (Figure III-7-7).

7.5.13 Les vidéos et les images enregistrées sont de plus en plus une source de renseignements utiles pour les enquêteurs. Les appareils qui enregistrent les données d'images comprennent notamment les enregistreurs d'images, les caméscopes, les enregistreurs/caméras vidéo, les appareils photo numériques, les enregistreurs vidéo numériques et l'équipement des essais en vol. Ces images peuvent provenir de vidéos de témoins ou de voyageurs, de séquences filmées par des agences de presse ou de caméras de surveillance. En plus des images de l'accident ou de l'incident lui-même, les images prises quelques moments avant peuvent aussi être utiles pour l'enquête.

7.5.14 Lorsqu'elle utilise des images ou des vidéos, l'enquête ne doit rien négliger pour obtenir le support d'enregistrement d'origine. Durant la lecture, l'original de l'image peut être sous-échantillonné pour en faciliter l'exportation. Ce sous-échantillonnage peut détruire des informations utiles qui sont présentes dans l'original. En général, il est toujours préférable d'obtenir une copie numérique du support d'enregistrement d'origine. S'il est impossible de copier l'original, l'appareil ou l'unité de stockage au complet doivent être conservés pour pouvoir en faire une copie numérique plus tard.



Figure III-7-7. Photo d'un DC-10 présentant une inclinaison latérale impossible à redresser, prise par un témoin juste quelques moments avant l'écrasement

7.5.15 Il est également important d'obtenir les spécifications techniques de l'appareil ou du système d'enregistrement, des appareils photo et des caméras ainsi que les informations sur le réglage et la configuration du système d'enregistrement. Il ne faut rien négliger pour déterminer l'endroit où était située la caméra avec le plus de précision possible. Dans le cas des caméras fixes, telles que celles des systèmes de surveillance, l'idéal est d'obtenir un dessin technique montrant l'emplacement des caméras par rapport aux repères locaux tels que les immeubles, les routes, les voies de circulation et les pistes, etc. (particulièrement les repères qui sont dans le champ de vision de la caméra). Ces dessins sont souvent disponibles auprès des autorités aéroportuaires ou des services de planification municipaux ou locaux. Dans le cas de vidéos provenant de caméras à l'épaule, il est important de connaître l'endroit où se tenait le caméraman lorsqu'il a filmé la scène. Dans la mesure du possible, indiquer l'emplacement sur une carte ou la déterminer à l'aide d'un GPS. Des renseignements supplémentaires sur plusieurs caractéristiques prédominantes visibles sur la scène sont nécessaires pour étalonner l'image de l'accident enregistré.

7.5.16 La lecture et l'analyse des données de vidéos et d'images exigent un matériel et un logiciel particuliers. Le personnel doit aussi avoir une formation spécialisée en interprétation d'images enregistrées. Vu qu'il s'agit d'un nouveau domaine dans les enquêtes, les laboratoires expérimentés peuvent être en mesure de fournir conseils et assistance pour lire et analyser ces données.

Données radar et transcription ATC

7.5.17 La plupart des États utilisent des enregistreurs analogiques et numériques dans les centres et les organismes ATS. Les enregistrements portent non seulement sur les communications vocales air-sol et les communications par liaison de données, mais aussi sur les communications vocales, radio, par satellite et sur les lignes terrestres entre les divers services et stations au sol (échanges sur le mouvement et le contrôle des aéronefs, échanges entre l'ATS et les agents météorologistes, les véhicules de lutte contre l'incendie, etc.). Les données radar et les enregistreurs ATC sont traités en détail au Chapitre 5.

7.5.18 Lors d'une enquête sur un accident, il peut être nécessaire de recueillir les informations transmises sur liaison de données par le système embarqué de communications, d'adressage et de compte rendu (ACARS) et le système de contrôle de l'état de l'aéronef (ACMS). Il est possible qu'un exploitant enregistre aussi les communications entre l'aéronef et le personnel au sol pour une période qui n'est pas couverte par le CVR.

7.6 BESOINS FUTURS

Nouveaux appareils

7.6.1 Même si la plupart des États ne prescrivent pas encore l'utilisation de ces dispositifs, les aviateurs et les exploitants emploient actuellement des enregistreurs combinés redondants et des CVR de deux heures pour remplacer l'ancienne version de 30 minutes. Il a également été proposé d'utiliser des sources d'alimentation indépendantes pour les CVR afin de leur permettre de continuer à fonctionner pendant dix minutes après la coupure de l'alimentation de l'enregistreur.

Enregistrement des communications par liaison de données

7.6.2 Les échanges entre l'ATC et les membres de l'équipage de conduite sont normalement enregistrés par les CVR, mais avec la mise en place des systèmes de communication, navigation et surveillance/gestion du trafic aérien (CNS/ATM), il sera peut-être obligatoire d'enregistrer les données CNS/ATM. Certains CVR actuels sont équipés pour enregistrer ces informations et la durée d'enregistrement sera la même que celle des CVR, soit normalement de deux heures.

Enregistreur d'images embarqué (AIR)

7.6.3 Les enquêteurs sur les accidents ont aussi recommandé l'installation d'enregistreurs d'images embarqués (AIR). L'EUROCAE a déjà élaboré une norme technique sur ces dispositifs et la technologie pour leur utilisation est disponible. Même si les FDR et les CVR classiques sont inestimables, la vue de l'intérieur du poste de pilotage peut donner des renseignements supplémentaires. Les avantages des AIR sont notamment de pouvoir documenter l'interaction humain-machine (commutateurs, manettes, commandes), les conditions ambiantes du poste de pilotage (fumée, éclairage), les communications non verbales (signaux manuels) et l'interaction entre les membres d'équipage. Les AIR pourraient capter des centaines de paramètres supplémentaires qui ne sont pas enregistrés actuellement. De plus, sur les aéronefs qui ne sont équipés ni de FDR ni de CVR, un AIR pourrait être un moyen peu coûteux de remplacer ces enregistreurs. L'AIR pourrait fournir des données paramétriques des instruments du poste de pilotage (voir la Figure III-7-8).



Figure III-7-8. Image captée par un enregistreur d'images embarqué

7.7 CONCLUSION

7.7.1 Les FDR et CVR résistants aux impacts font partie intégrante des enquêtes sur les accidents. Ils doivent être adéquatement entretenus et documentés afin d'en maximiser l'utilité. À la suite d'un accident, les enregistreurs doivent être rapidement localisés et immédiatement remis à un service approprié pour qu'il procède à l'analyse. Leur contenu doit être analysé par des experts qualifiés en tenant compte de toutes les autres données relatives à l'accident, notamment les éléments recueillis sur les lieux de l'accident et les contributions des participants, afin d'obtenir un maximum de renseignements. Pour qu'elles aient une valeur optimale, les données doivent être traitées rapidement et de manière efficace.

7.7.2 Il existe de nombreuses sources de données qui peuvent grandement contribuer à l'enquête. Surtout dans les aéronefs modernes dotés d'équipements électroniques, les données recueillies peuvent contenir des indices cruciaux sur les défaillances, la maintenance, le fonctionnement des systèmes et les actions exécutées à bord.

7.7.3 Les programmes efficaces de collecte de données constituent une étape importante vers la prévention des incidents et des accidents. Les avantages d'une utilisation proactive des données, tant du point de vue de la sécurité que des coûts, sont une garantie de leur développement futur. En outre, les avancées technologiques modifient constamment l'environnement des aéronefs et des postes de pilotage et les enquêtes devront de plus en plus avoir recours aux données. Les renseignements qui étaient auparavant recueillis dans le cadre d'entrevues sont maintenant stockés sur des unités de disque, des cartes informatiques et des appareils portables. Les techniques d'enquête et de collecte des données doivent être constamment améliorées pour suivre les progrès de la technologie.

Chapitre 8

RECONSTITUTION DE L'ÉPAVE

8.1 GÉNÉRALITÉS

8.1.1 La décision de reconstituer l'épave dépend de plusieurs facteurs et a une incidence sur les méthodes et les précautions appliquées durant l'identification et la récupération des éléments de l'épave. Des anomalies dans la trajectoire de vol ou la répartition des éléments de l'épave peuvent indiquer la nécessité d'une analyse plus approfondie de certaines parties ou de la totalité de l'aéronef accidenté. La Partie I du présent manuel et le *Manuel des services d'aéroport* (Doc 9137), Partie 5, *Enlèvement des aéronefs accidentellement immobilisés*, donnent des renseignements supplémentaires sur les techniques et les méthodes de récupération des épaves.

8.1.2 La reconstitution de l'épave peut être une technique très utile pour les enquêtes sur les accidents. Elle consiste à remettre les divers éléments de l'épave de l'aéronef dans leur position relative avant l'accident. Il n'est pas nécessaire de procéder à une reconstitution pour chaque accident, mais elle peut être la clé qui permet de trouver des indices qui mènent aux causes de l'accident et qui permettent d'éliminer certaines causes.

8.1.3 La reconstitution de l'épave peut aller de la simple juxtaposition de tous les éléments ou de certains éléments de l'épave dans la configuration générale de l'aéronef jusqu'à une reconstitution tridimensionnelle détaillée des principales parties de l'aéronef. Avec les logiciels et les outils de conception assistée par ordinateur qui existent actuellement, l'épave peut aussi être reconstituée de manière virtuelle.

8.1.4 La méthode de reconstitution comporte deux volets. Les divers éléments doivent d'abord être identifiés et placés dans leurs positions relatives. Il faut ensuite examiner en détail les dommages subis par chaque élément et établir leur lien avec les dommages subis par des éléments voisins ou d'autres éléments qui leur sont associés. Cette deuxième étape est l'objectif essentiel de la reconstitution. Les Figures III-8-1 à III-8-5 donnent des exemples de reconstitution d'une épave.

8.1.5 La reconstitution peut être effectuée par un ou plusieurs groupes d'enquête, habituellement par le Groupe des structures ou des systèmes. Les travaux de reconstitution plus importants peuvent exiger la formation d'un groupe de reconstruction distinct. Les circonstances de l'accident et les ressources disponibles (temps, argent et personnel) sont évidemment des facteurs majeurs dans l'ampleur de la reconstitution.

8.2 DÉCISION DE RECONSTITUER UNE ÉPAVE

8.2.1 L'enquêteur doit d'abord déterminer s'il faut reconstituer une épave. Les reconstitutions sont en général particulièrement utiles dans les cas de rupture structurelle en vol, de collision, d'incendie ou d'explosion. Elles aident à comprendre l'aspect et la séquence des ruptures, la perte de pièces, la propagation et les effets de l'incendie, de la fumée et de la chaleur, les collisions en vol ou les collisions avec des missiles ou d'autres projectiles, les impacts de météorites ou de débris provenant de l'espace, les résidus chimiques ou la suppression résultant d'explosions ou d'engins explosifs, etc.

8.2.2 Facteurs qui peuvent rendre une reconstitution souhaitable :

- a) indices d'incendie et de fumée sur les structures et les systèmes ;
- b) pièces trouvées à quelque distance de l'emplacement principal de l'épave ;
- c) éléments majeurs manquants ;
- d) preuves provenant des autopsies des victimes, par ex., brûlures ou inhalation de fumée ;
- e) indices indiquant l'utilisation d'explosifs ou des actes de sabotage.

8.3 TYPES DE RECONSTITUTION

8.3.1 Il y a différents degrés, plus ou moins complexes, de reconstitution de l'épave selon les besoins de l'enquête.

Simple juxtaposition des éléments de l'épave

8.3.2 La décision de procéder à une reconstitution bidimensionnelle simple est généralement facile à prendre. La reconstitution peut, par exemple, être une tâche du Groupe des structures et la décision peut être prise par le chef de ce groupe. Le coût d'une simple juxtaposition des éléments de l'épave peut être très bas puisqu'elle peut être fréquemment effectuée par le personnel en place et dans l'espace existant. Ces juxtapositions sont réalisées dans de nombreux accidents. Il est en effet utile d'agencer quelques pièces ou éléments pour en visualiser les liens ou pour examiner les marques témoins et les traces de feu ou de fumée.

8.3.3 Cette méthode est souvent suffisante pour permettre à l'enquêteur de déterminer la cause probable de l'accident et elle sert souvent de base à une décision plus formelle de procéder à une reconstitution plus complète.

8.3.4 Toutes les reconstitutions ont l'avantage de permettre un inventaire visuel de l'épave récupérée.

Reconstitution bidimensionnelle complète

8.3.5 Ces reconstitutions sont fréquemment réalisées et peuvent être très minutieuses, mais elles présentent tout de même un bon rapport coût-efficacité. Les outils requis pour réaliser une grande reconstitution bidimensionnelle peuvent être un ruban à mesurer, du ruban-cache, de la craie, un plancher propre et l'information technique de base. Elle peut se faire à l'intérieur ou à l'extérieur. La nécessité d'un toit est dictée par la durée prévue de l'enquête et les conditions météorologiques. L'information technique requise est un schéma de l'élément examiné, qui peut probablement être fourni par le fabricant.

8.3.6 Une fois le contour de la zone de reconstitution mesuré et marqué à la craie, l'application du ruban-cache permettra de mieux visualiser les éléments. Il est recommandé d'augmenter l'aire de reconstitution jusqu'à 20 %, en laissant plus d'espace entre les éléments, pour permettre aux enquêteurs de se déplacer entre les pièces afin de les visualiser et de les examiner ; il leur est aussi plus facile de les déplacer et de les positionner. Cet espacement permet aussi de s'assurer que les bords déchiquetés des pièces ne frottent pas les uns contre les autres, qu'ils n'endommagent pas les faciès de rupture et qu'ils ne font pas disparaître d'autres indices. Il permettra aussi de juxtaposer les surfaces supérieures et inférieures des éléments sur la même aire de travail ; quoique pour les reconstitutions plus détaillées il faudra placer les deux surfaces sur des aires de travail différentes. Une reconstitution bidimensionnelle peut être convertie en reconstitution tridimensionnelle au besoin.

Reconstitution tridimensionnelle

8.3.7 Ces reconstitutions, selon leur ampleur, sont les meilleures mais elles sont aussi beaucoup plus coûteuses en raison de l'espace et des ressources humaines nécessaires. Les installations matérielles seront utilisées plus longtemps à cause de la durée des travaux de reconstitution et de conservation de l'épave. Certaines grandes reconstitutions tridimensionnelles peuvent nécessiter la formation d'un groupe de reconstitution distinct pour fournir le personnel nécessaire et gérer le processus. Il faudra aussi mettre sur pied une base de données pour assurer le suivi des pièces à mesure qu'elles sont fixées au support. Dans une reconstitution majeure, le support sur lequel seront montées les pièces de l'avion peut coûter à lui seul des dizaines de milliers de dollars. Le coût total d'une reconstitution d'envergure peut s'élever à plusieurs millions de dollars.

8.3.8 Les reconstitutions tridimensionnelles présentent des avantages réels qui ne sont offerts par aucun autre outil d'enquête. Elles peuvent montrer la présence ou l'absence de causes, telles qu'une pénétration ou l'impact d'un missile. Elles créent des lignes d'observation qui peuvent fournir d'autres indices, réduire le nombre de théories privilégiées ou les éliminer. Elles peuvent aussi donner de nouvelles idées, éliminer ou confirmer la possibilité d'une activité criminelle et permettre de bien visualiser les éléments manquants. Les liens tridimensionnels sont plus faciles à visualiser, particulièrement dans le cas de traces de feu ou de fumée ou de pièces déformées ou pliées.

8.3.9 Parfois les reconstitutions tridimensionnelles n'ajoutent pas grand-chose à la compréhension technique et il est difficile que ces reconstitutions demeurent simples, sûres et désencombrées. Certains estiment que les reconstitutions exhaustives sont rarement nécessaires dans une enquête technique, mais elles sont importantes pour des raisons non techniques. Elles peuvent apporter un appui public et politique à un organisme d'enquête qui a besoin de reconnaissance et de ressources financières et humaines. Il est très important de bien comprendre cet aspect ; il peut y avoir des raisons et des exigences non techniques très valables qui peuvent faire pencher une décision du côté de la reconstitution.

8.3.10 Une fois qu'une reconstitution majeure est commencée, il est difficile de l'arrêter même si l'axe principal de l'enquête change. Le processus de décision pour mettre fin à la reconstitution ou la limiter devrait être déterminé au préalable par le personnel de l'enquête de qui relève cette décision. L'équipe d'enquête doit comprendre qu'il peut être nécessaire de préserver la reconstitution pendant des années ou des décennies pour des raisons non techniques qui vont au-delà de son utilité pour l'enquête. Dans la mesure du possible, il est utile d'élaborer une « stratégie de sortie » ou un ensemble de critères qui peuvent être appliqués pour mettre fin à la reconstitution lorsque la poursuite des travaux ne peut apporter que peu ou pas d'avantages.

8.4 RECONSTITUTION SUR LES LIEUX DE L'ACCIDENT

8.4.1 La reconstitution, notamment lorsqu'il s'agit d'ensembles déterminés, est souvent effectuée sur les lieux de l'accident, en particulier lorsque l'accident s'est produit dans une zone relativement dégagée et que les conditions météorologiques ne sont pas normalement rigoureuses. Avant de procéder à la reconstitution, il convient d'effectuer les opérations indiquées au Chapitre 2 de la présente partie : prendre des photos de l'ensemble de la scène, établir le schéma de répartition des débris de l'épave, parcourir les lieux à pied et les examiner, et prendre des notes sur la manière dont les divers éléments de l'épave ont d'abord été trouvés.

8.4.2 Les pièces sont recueillies, identifiées et disposées sur le sol dans leurs positions relatives. Les ensembles principaux tels que les ailes, l'empennage et le fuselage sont souvent disposés séparément les uns des autres pour en faciliter l'examen. Si l'élément soupçonné se trouve au point de jonction d'ensembles principaux, il est parfois reconstitué séparément. Les câbles de commande et leurs composants sont en général disposés séparément, toujours pour en faciliter l'examen. Si des traces révélatrices sont découvertes sur l'un de ces derniers éléments, il y a lieu de rechercher les traces correspondantes dans les parties correspondantes de l'aéronef.

8.5 RECONSTITUTION HORS DES LIEUX DE L'ACCIDENT

8.5.1 Très souvent la topographie des lieux de l'accident ou les conditions météorologiques empêchent d'effectuer la reconstitution sur les lieux de l'accident. Dans ce cas, l'enquêteur doit décider s'il est justifié ou non de transporter l'épave à un autre endroit en vue de sa reconstitution. Comme il est possible que d'autres dommages soient causés aux éléments de l'épave pendant le transport, l'enquêteur doit s'assurer qu'il dispose d'un jeu complet de notes sur toutes les taches, rayures, déchirures, etc. Toutes les pièces principales doivent être convenablement étiquetées, identifiées, photographiées et indiquées sur le schéma de répartition de débris de l'épave.

8.5.2 Le désassemblage devrait être minimal. S'il est nécessaire de séparer des ensembles boulonnés, il faut noter l'ordre de démontage des rondelles, entretoises, écrous, etc. Il est souvent nécessaire de couper les câbles de commande pour séparer des parties de l'épave et il faut prendre soin dans ce cas de bien identifier et étiqueter toutes les coupures.

8.5.3 Si ces simples précautions ne sont pas prises, on risque de perdre de précieux indices et de compliquer considérablement la tâche de l'enquêteur.

8.5.4 Lorsque la reconstitution est effectuée hors des lieux de l'accident, dans un hangar par exemple, il est généralement possible de procéder à une reconstitution plus complète. Il est très utile de disposer d'un avion du même type pour pouvoir effectuer des comparaisons.

8.6 RECONSTITUTION VIRTUELLE

8.6.1 L'augmentation de la puissance des ordinateurs et l'amélioration des méthodes de numérisation des objets ont accentué l'intérêt pour la reconstitution virtuelle à l'aide des programmes de conception assistée par ordinateur (CAD) actuellement employés pour la conception des pièces ou les processus de fabrication. Ces logiciels font encore l'objet de beaucoup de développement et les enquêteurs doivent rechercher les techniques et les logiciels les plus récents. Au moment où a été rédigé le présent manuel, les reconstitutions virtuelles étaient en général effectuées après une reconstitution tridimensionnelle. Elles aident à cataloguer les éléments récupérés et à déterminer ceux qui peuvent manquer. Cette méthode de reconstitution représente une autre option pour l'enquêteur, mais ses avantages et ses inconvénients doivent encore être déterminés.

8.6.2 Un des désavantages possibles de cette technologie est la possibilité de manipuler les données numérisées et la nécessité pour les systèmes d'assurer l'absolue sécurité des données.

8.6.3 Il sera peut-être possible avec le temps de procéder directement à une reconstitution virtuelle sans passer par une reconstitution bidimensionnelle ou tridimensionnelle. La technologie permettra peut-être de travailler sous l'eau à l'aide de véhicules téléguidés et de numériser les pièces sur place, éliminant ainsi la nécessité de les ramener à la surface. Il sera peut-être possible aussi de numériser des faciès de rupture, des traces de feu ou d'autres caractéristiques en plan de détail très rapproché et de les appliquer séparément sur le support.

8.7 IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS DE L'ÉPAVE

8.7.1 Une des difficultés de la reconstitution d'un ensemble tel qu'une aile est l'identification des divers éléments de l'épave. Si l'aile s'est brisée en un nombre relativement faible de morceaux, la tâche est beaucoup plus simple, mais si elle a éclaté en un grand nombre de petits fragments, comme dans le cas d'un impact à grande vitesse, le travail de reconstitution peut être extrêmement difficile.

8.7.2 La meilleure méthode d'identification est d'utiliser le numéro de pièce gravé sur la plupart des pièces des aéronefs. Elles peuvent ensuite être vérifiées à l'aide du catalogue des pièces. Lorsque les numéros sont illisibles ou ne figurent pas sur les pièces, il faut utiliser des méthodes indirectes d'identification. La couleur (peinture ou apprêt), le type de matériau et de construction, les marques extérieures, l'épaisseur du matériau, les dimensions et l'espacement des vis ou des rivets peuvent être utilisés pour faciliter l'identification des différentes pièces. Pour les éléments plus grands, comme les semelles de longerons, il est souvent possible d'apparier les deux parties de la cassure. On risque parfois d'être induit en erreur car de nombreuses pièces sont très déformées.

8.7.3 Dans la mesure du possible, faire appel à des membres du personnel du transporteur aérien ou du constructeur qui connaissent bien la partie à reconstituer. Ils peuvent souvent identifier les pièces et leur emplacement par des indices subtils tels que le matériau, les fixations, le fini ou l'épaisseur. Il est bien sûr impératif d'avoir de bons dessins de la partie à reconstituer. Vu que la plupart des reconstitutions sont des processus rapides et fluides exécutés dans le cadre de calendriers serrés, il est bon de penser à transmettre les dessins et les données sous forme électronique.

Catalogage de l'épave

8.7.4 Il est important, surtout dans le cas de grandes reconstitutions, d'avoir un système pour cataloguer chaque pièce de l'épave. Il est essentiel de noter l'emplacement géographique de l'épave par rapport à la grille cartographique de l'épave, à la longitude et à la latitude ou à n'importe quel système de référence approprié. Noter brièvement tout indice important, par exemple, dommages causés par le feu ou la présence de suie, la corrosion, une fissuration, etc. Les renvois aux photos ou aux croquis peuvent aussi être inscrits dans le catalogue de l'épave. Il peut aussi être utile de noter des renseignements supplémentaires, tels que la date de récupération de la pièce et qui l'a récupérée.

8.7.5 Les programmes informatiques, notamment ceux dans lesquels il est possible de créer un lien entre l'élément de l'épave et les photos ou d'autres renseignements, peuvent être particulièrement utiles. Un programme de cartographie permettant de situer tous les éléments ou certains éléments de l'épave sur une carte ou une grille peut être particulièrement utile.

Examen des éléments de l'épave

8.7.6 Le but principal de la reconstitution de l'épave est de permettre un examen détaillé de ses divers éléments. Lorsque ces éléments sont placés dans leurs positions relatives exactes, il est possible d'étudier la continuité (ou la discontinuité) des dommages sur les éléments connexes. Si le froissement d'un panneau de revêtement se poursuit au-delà d'une déchirure ou d'une rupture sur un autre panneau, la détermination des contraintes qui ont causé le froissement ou la déformation est très utile pour établir si le dommage s'est produit en vol ou à l'impact, ou s'il s'agit d'une rupture primaire ou secondaire. La continuité des taches ou des rayures de part et d'autre d'une cassure est un autre indice à retenir lors d'un examen détaillé. On peut déterminer de la même manière si un incendie s'est produit en vol ou au sol.

8.7.7 Si on soupçonne la fatigue ou une déformation de certaines commandes de vol, il peut être utile de les comparer à celles d'un aéronef ayant un nombre similaire d'heures et de cycles de vol afin de constater l'état que présentent les commandes après une exploitation normale. Ce processus peut aussi conduire à examiner ou à observer des modifications ou des réparations de la cellule si elles sont liées aux endroits qui posent problème.

8.7.8 Il est généralement possible de déterminer les conditions générales de la rupture et la direction dans laquelle les contraintes se sont exercées d'après les dommages subis par les divers éléments de l'épave. Le type de rupture et la direction dans laquelle les fixations se sont cisailées constituent une indication utile dans ce travail. Les experts qui examinent les surfaces de rupture telles que les revêtements du fuselage peuvent souvent déterminer l'ordre de rupture et la direction de la déchirure.

8.7.9 Il convient de prendre des bonnes notes et de faire des croquis pendant tout cet examen détaillé. Lorsque la clarté du rapport sur l'accident peut y gagner, il y a lieu de prendre des photographies de l'ensemble reconstitué et des gros plans des détails importants. Les photos numériques prises avec flash et indiquant les échelles de mesure fournissent les meilleures détails et présentent la meilleure polyvalence pour les analyses futures.

8.8 RÉSUMÉ

8.8.1 La décision de procéder à une reconstitution n'est qu'une partie de l'ensemble du processus de gestion de l'enquête. Généralement, la gestion de l'enquête comprend la détermination et l'allocation des ressources, les personnes et leurs tâches, les budgets, les voyages et la recherche. La décision de reconstituer l'épave est différente mais doit s'inscrire dans l'allocation générale des ressources de l'enquête.

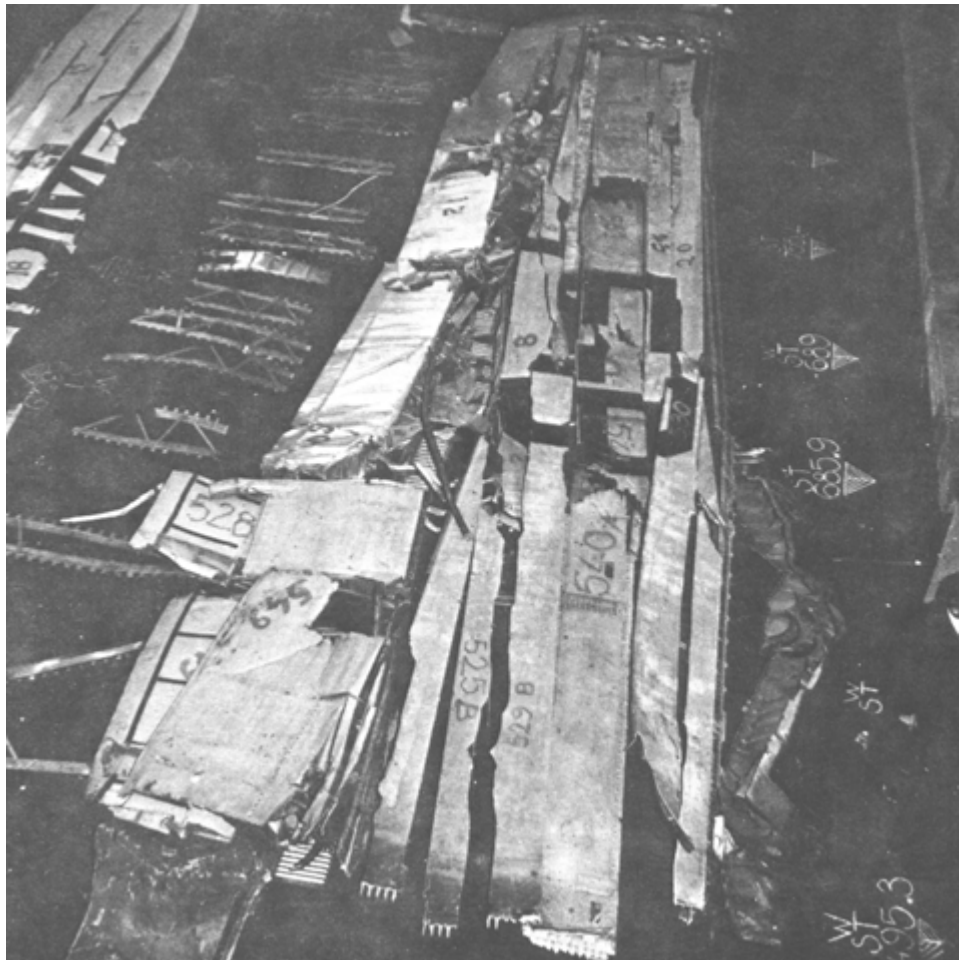


Figure III-8-1. Vue d'ensemble d'une aile reconstituée sur maquette

8.8.2 Des reconstitutions simples, bidimensionnelles de certains éléments ou de l'ensemble de l'épave peuvent être facilement réalisées, selon les dimensions relatives de l'épave, la disponibilité d'un espace approprié et les conditions météorologiques. Le transport de l'épave à un site de reconstitution implique un travail, des coûts et des délais supplémentaires. Normalement des reconstitutions exhaustives bidimensionnelles ou tridimensionnelles ne sont nécessaires que dans les cas, ou cas présumés, de rupture structurelle en vol, de collision, d'incendie ou d'explosion.

8.8.3 Les reconstitutions tridimensionnelles de la totalité ou d'une partie de l'épave sont très coûteuses, exigent beaucoup de temps et sont souvent inutiles. Il sera peut-être possible à l'avenir de faire des reconstitutions virtuelles, accompagnées ou non d'une reconstitution physique de l'épave. Ces reconstitutions cependant exigent des ressources particulières et elles doivent être pensées et planifiées, et la décision de procéder à cette reconstitution peut souvent dépendre de nombreux facteurs non techniques, mais importants. Comme dans toutes les activités d'enquête, il est essentiel de faire preuve de bon jugement et de tenir compte des coûts et des avantages.

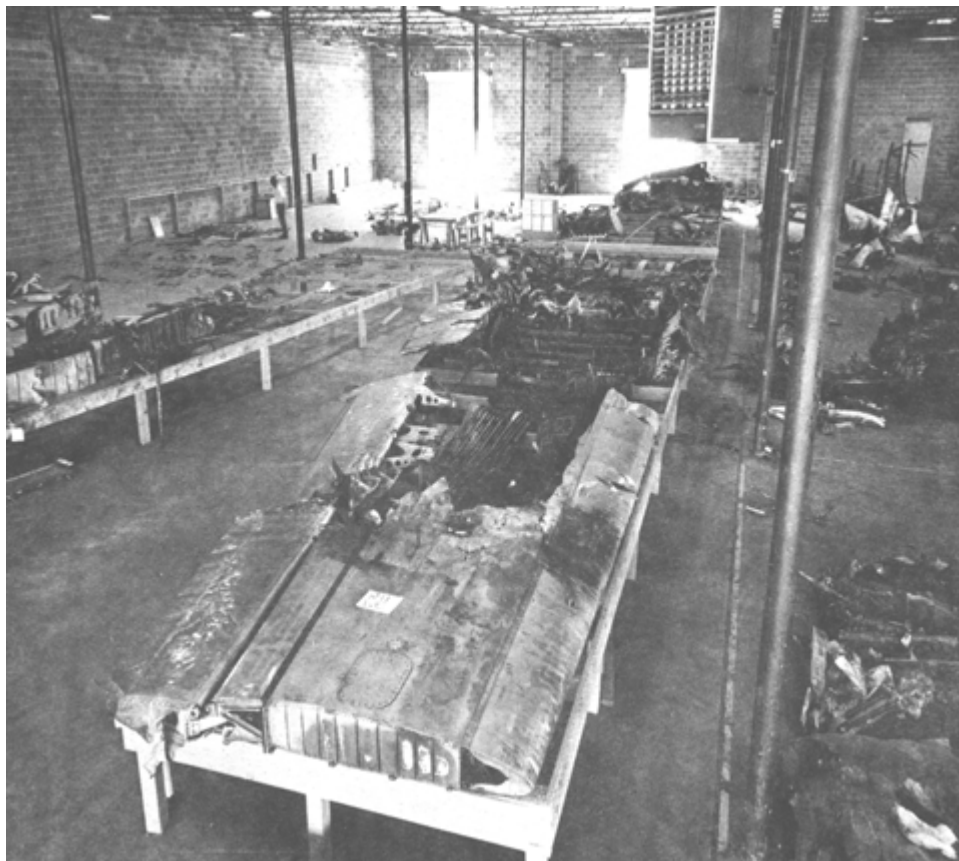


Figure III-8-2. Vue de l'extrados de l'aile droite au point de rupture côté extérieur



**Figure III-8-3. Disposition de la reconstitution de systèmes du vol Swissair 111
(photo publiée avec l'autorisation du Bureau de la sécurité des transports du Canada)**

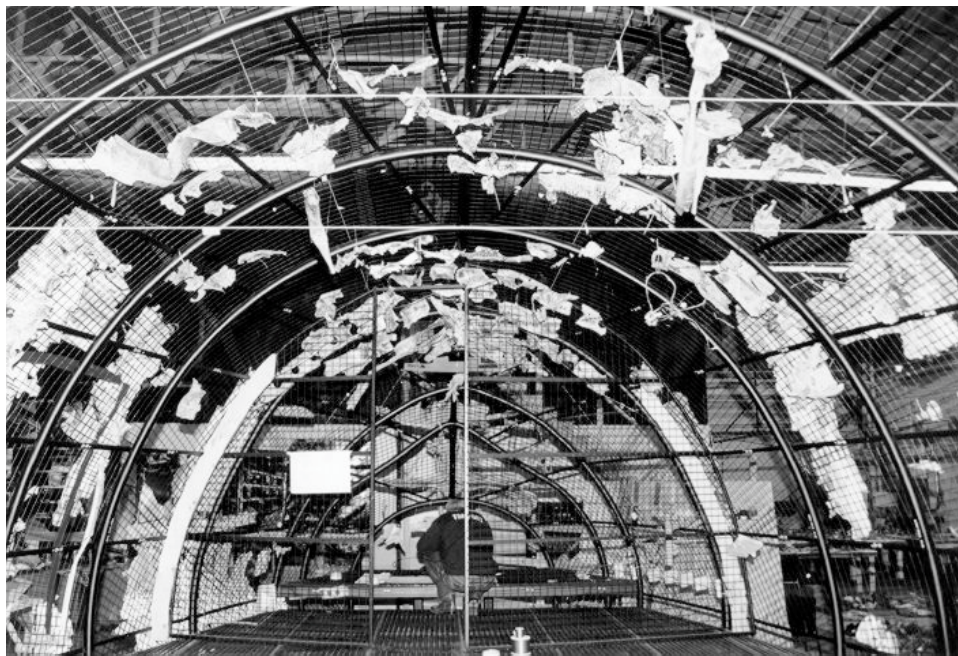
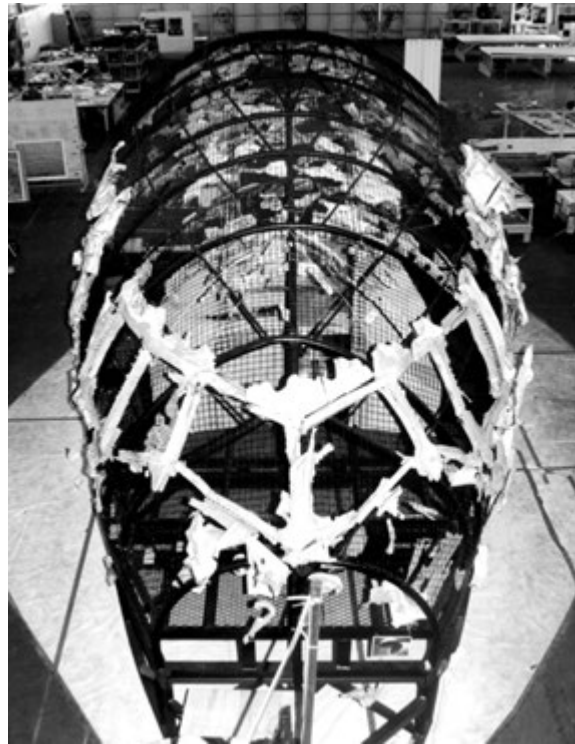


Figure III-8-4. Reconstitution d'une section de neuf mètres de la partie avant du fuselage de l'épave du vol Swissair 111 sur un support spécialement conçu pour permettre la reconstitution intérieure et extérieure (photo publiée avec l'autorisation du Bureau de la sécurité des transports du Canada)



**Figure III-8-5. Reconstitution de la section principale du fuselage de l'épave du vol TWA 800
(photo publiée avec l'autorisation du Bureau de la sécurité des transports du Canada)**

Chapitre 9

ENQUÊTE SUR LES STRUCTURES

9.1 MATÉRIAUX STRUCTURAUX

Généralités

9.1.1 La construction des avions modernes — ou de n'importe quel type de structure — est fondée sur un groupe de cinq types de matériaux : les métaux, les composites, les céramiques, les polymères et les semi-conducteurs. Les propriétés mécaniques et physiques de ces matériaux sont très différentes et ces différences sont les éléments clés de la conception, du traitement et des performances. Les différences de propriétés expliquent aussi les différents modes de rupture des matériaux.

9.1.2 La construction de la plupart des avions utilisés et construits actuellement est basée sur les métaux et leurs alliages. En général, les métaux et les alliages se caractérisent par une résistance relativement élevée, une grande rigidité, leur force portante et une bonne conductivité électrique et thermique. Cependant, la tendance à employer des matériaux plus « exotiques » exige d'élargir les techniques actuelles d'enquête sur les structures.

9.1.3 Il n'est pas nécessaire que chaque professionnel de la sécurité des vols soit un expert en technologie des matériaux, mais plus un enquêteur connaît ce domaine, plus il sera en mesure de déterminer efficacement les causes des défaillances des composants structurels.

Mailles

9.1.4 La maille est l'unité de base des matériaux solides et le plus petit constituant qui conserve les caractéristiques générales de l'ensemble plus grand. Dans le cas des métaux de structure, la nature arrange les atomes selon trois formes géométriques ou structures cristallines. Les métaux peuvent donc être décrits comme des matériaux cristallins. Les trois types qui intéressent ici sont illustrés à la Figure III-9-1.

Structure cubique centrée (BCC)

9.1.5 La structure cubique centrée, dite aussi cubique à corps centré, se compose de 9 atomes (voir figure) et apparaît dans plusieurs métaux courants : le chrome (*Cr*), le fer (*Fe*), le molybdène (*Mo*) et le tungstène (*W*).

9.1.6 Il est important de comprendre, pour les besoins des enquêtes, que les métaux à structure cubique centrée sont *fragiles* ou *cassants* et que cette caractéristique détermine l'endroit où ils sont utilisés dans un avion. Les matériaux fragiles sont généralement résistants et peuvent supporter de fortes charges, mais lorsqu'ils se cassent, ils le font sans avertissement. Ils peuvent aussi se fragmenter sous des charges d'impact, comme c'est souvent le cas de la fonte lorsqu'on la laisse tomber.

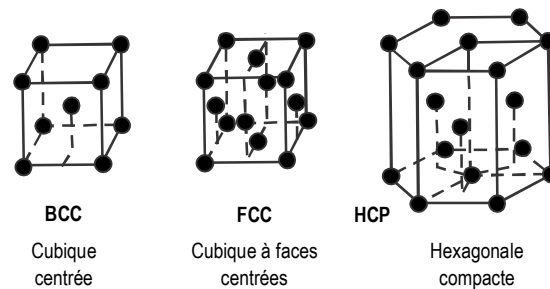


Figure III-9-1. Structures cristallines courantes

Structure cubique à faces centrées (FCC)

9.1.7 La structure cubique à faces centrées comprend 14 atomes. Elle se rencontre dans des métaux tels que l'aluminium (*Al*), le cuivre (*Cu*), l'or (*Au*), le fer (*Fe*), le plomb (*Pb*), le nickel (*Ni*) et l'argent (*Ag*). Ces métaux font partie du groupe de matériaux ductiles.

9.1.8 Les matériaux ductiles sont ceux qui peuvent se déformer ou changer considérablement de forme avant de se rompre. Cette propriété est très importante parce qu'elle permet d'obtenir les formes complexes requises dans la construction des aéronefs et d'autres structures. Contrairement aux matériaux fragiles, les matériaux ductiles peuvent absorber une quantité considérable d'énergie cinétique lors des impacts, ce qui accroît encore leur utilité.

Structure hexagonale compacte (HCP)

9.1.9 La structure hexagonale compacte (voir la Figure III-9-1) s'applique à plusieurs métaux : le béryllium (*Be*), le cobalt (*Co*), le magnésium (*Mg*), le titane (*Ti*) et le zinc (*Zn*).

9.1.10 Ces métaux sont à la fois fragiles et ductiles. Le cobalt, par exemple, est très cassant à la température ambiante ordinaire, mais il peut être allié avec le fer pour obtenir de l'acier résistant aux hautes températures. Le magnésium est très ductile et peut être utilisé seul ou allié avec un autre métal. Le titane est plus ou moins ductile selon les méthodes de traitement thermique et de traitement appliquées.

Le réseau cristallin

9.1.11 Le niveau suivant de la structure des matériaux est le réseau cristallin. Cette structure géométrique est formée par l'agrégation de plusieurs mailles pour produire un motif répétitif semblable à celui de l'exemple illustré à la Figure III-9-2.

Résistance monocristalline

9.1.12 Si le réseau cristallin est parfait (ou presque parfait) à tous points de vue, le résultat est un cristal unique, ou monocristal. Il faut dans ce cas que chaque point du réseau soit occupé par le bon atome, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir d'atomes étrangers dans la structure ni aucune distorsion dans les espaces. Si ces conditions sont remplies, le métal atteint presque sa résistance théorique. Vu que la résistance théorique peut être de 10 à 100 fois la résistance normale, les avantages des monocristaux sont évidents. La production de structures monocristallines est une technologie en expansion. Il y a actuellement des aubes de turbine monocristallines utilisées en service dans les turboréacteurs, et d'autres composants devraient suivre.

Grains

9.1.13 Les grains sont des parties microscopiques d'un matériau, dans lesquelles l'arrangement des atomes dans la structure cristalline est le même. C'est l'orientation du réseau qui est différente de celles des parties adjacentes, formant ainsi un groupe de grains (les grains peuvent se voir à un grossissement d'environ 2 000x).

9.1.14 On peut prendre comme exemple de la formation des grains une cuve contenant du cuivre en fusion que l'on laisse se recristalliser. Comme la température n'est pas homogène dans la cuve, le regroupement des atomes pour former une structure à faces centrées se fait dans des directions différentes. Ces différentes orientations des structures du réseau cristallin forment des grains.

Jointes de grains

9.1.15 Les endroits où les structures du réseau se rencontrent s'appellent des jointes de grains. La Figure III-9-3 montre trois structures cristallines convergentes.

9.1.16 Les jointes de grains sont des zones où l'espacement entre les atomes est irrégulier, ce qui crée une compression aux endroits où les atomes sont anormalement proches les uns des autres, et une traction là où ils sont anormalement éloignés les uns des autres. Ces conditions sont importantes, car une distorsion minimale favorise l'assemblage mécanique des grains et augmente la résistance du matériau. Par contre, un espacement excessif affaiblit mécaniquement le matériau et permet en outre aux fluides d'envahir les jointes et de favoriser la corrosion.

Taille des grains

9.1.17 Les propriétés d'un matériau peuvent souvent être déterminées par la taille des grains. La taille des grains est en partie inhérente au type de matériau, mais elle est aussi fonction de la vitesse de refroidissement, du traitement thermique subséquent et des procédés mécaniques utilisés, comme le laminage de l'acier ou de l'aluminium.

9.1.18 En général, un refroidissement lent produit de gros grains et une plus grande ductilité des matériaux. Un refroidissement rapide (trempe) produit de petits grains et des matériaux résistants, mais cassants. Le laminage, dans le processus de fabrication, allonge les grains et les oriente plus dans la direction du laminage.

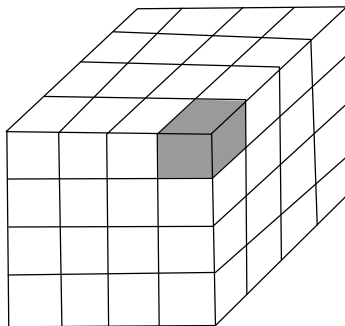


Figure III-9-2. Réseau cristallin représentatif (maille en grisé)

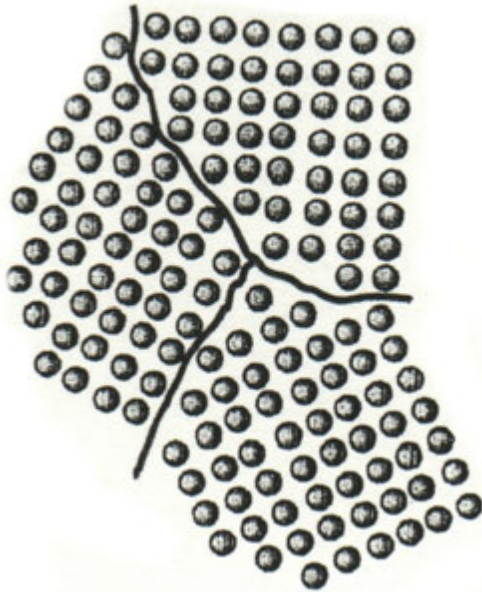


Figure III-9-3. Joints de grains

9.2 TYPES DE RUPTURES DES MATÉRIAUX

Rupture d'un élément principal

9.2.1 Les défaillances ou les ruptures en vol d'un élément principal affectent, par ordre de fréquence, la voilure, l'empennage, les ailerons, le système de commande et le fuselage ; les défaillances majeures du fuselage et des systèmes de commande sont très rares. En général, la rupture d'un élément principal est le résultat d'une des causes suivantes : 1) résistance de calcul insuffisante, 2) contraintes excessives imposées, ou 3) diminution de la résistance statique par la fatigue ou la corrosion.

9.2.2 Étant donné que tous les aéronefs civils sont conçus et testés pour satisfaire au moins aux normes imposées par les règlements nationaux, les ruptures directement attribuables à une résistance de calcul insuffisante sont rares si l'aéronef est utilisé à l'intérieur des limites de la résistance de calcul. Il arrive parfois cependant, surtout au moment de la mise en service d'un nouveau type d'aéronef, que celui-ci soit soumis à des charges différentes des charges prévues et qu'une rupture statique se produise sans que les limites d'utilisation aient été dépassées. Ce cas est très rare, mais les ruptures constatées sur des aéronefs d'un type nouveau doivent toujours faire l'objet d'un examen minutieux. La plupart des ruptures attribuables à l'insuffisance de la résistance de calcul sont généralement dues à des réparations ou à des modifications défectueuses ou à un défaut de fabrication d'une pièce ou d'un élément. Comme les normes et les procédures de fabrication sont supervisées par des agents du gouvernement et de l'industrie, les erreurs graves de fabrication sont réduites au minimum. Les réparations ou modifications défectueuses sont à l'origine d'un grand nombre de ruptures de cette catégorie. La vérification des pièces de rechange approuvées par le fabricant et des procédures de réparation ou de modification est essentielle.

9.2.3 Un aéronef se trouve soumis à des charges excessives s'il est utilisé avec un facteur de charge ou à une vitesse supérieurs à ses limites. Très souvent, ces charges excessives sont le résultat involontaire d'une manœuvre telle qu'un rétablissement après une perte de contrôle à une altitude où l'aéronef amorce une descente rapide, par exemple, lorsqu'il pénètre dans une activité orageuse ou dans des conditions de givrage, ou lorsqu'il effectue des

acrobaties aériennes Dans d'autres cas, le pilote peut avoir effectué des manœuvres brusques pour lesquelles l'aéronef n'a pas été conçu. Dans les deux cas, les contraintes sur la voilure, l'empennage, le fuselage, etc. atteignent des valeurs supérieures à la limite de calcul et il en résulte une rupture statique. Les circonstances qui ont immédiatement précédé la rupture, telles qu'elles ressortent des déclarations des témoins, peuvent être très utiles pour déterminer si l'accident a été directement provoqué par des contraintes excessives.

9.2.4 La fatigue reste encore une des causes principales des ruptures structurelles des pièces et des éléments des aéronefs. Il faut toujours fortement soupçonner cette cause tant que d'autres faits ou circonstances ne permettent pas de l'écarter comme facteur ayant contribué à l'accident. Comme il est indiqué dans la section sur la fatigue, ce type de rupture peut résulter d'un certain nombre de causes. En général, les ruptures de fatigue sont dues à : 1) une mauvaise conception, 2) une maintenance déficiente, 3) un défaut de fabrication ou 4) l'action des charges alternées non prévues dans la conception. La majorité des ruptures de fatigue résultent soit d'imperfections de détail dans la conception, soit d'une installation ou d'une utilisation défectueuse de la pièce. La fatigue étant en général associée à la répétition d'un grand nombre de cycles de chargement, ce type de rupture se produit rarement sur les aéronefs récemment mis en service. Les régions qui présentent des taux d'accident au-dessus de la moyenne exploitent aussi des aéronefs plus vieux qui évoluent souvent dans des conditions environnementales difficiles et qui ne sont soumis qu'à un minimum de maintenance préventive et d'analyses de fatigue.

9.2.5 Aux trois causes fondamentales de rupture structurelles en vol mentionnées ci-dessus, il faut ajouter un type spécial de rupture associé aux vibrations aéroélastiques. Ces vibrations sont un phénomène d'instabilité qui comporte un système d'oscillations auto-induites et qui se produit pour une certaine combinaison de forces aérodynamiques, de forces d'inertie et de forces élastiques du système. Lorsque des vibrations aéroélastiques se produisent, l'amplitude des oscillations augmente, créant des contraintes très élevées qui entraînent en général une rupture de la cellule ou de l'un de ses éléments. C'est pourquoi les vibrations aéroélastiques peuvent être considérées comme un cas particulier de contraintes excessives et l'enquêteur peut donc les traiter de la même manière que les autres ruptures de cette catégorie. La conception et les essais de certification des aéronefs modernes sont effectués de manière à éviter le risque de vibrations aéroélastiques en utilisation normale, mais ces vibrations peuvent se produire en service si la conception d'origine ou la rigidité des éléments sont altérées par des réparations, des modifications ou un jeu excessif.

9.2.6 Pour déterminer l'élément qui a cédé en premier, l'enquêteur peut tenir compte du fait qu'un élément principal se détache presque toujours de l'aéronef après la rupture et, dans ce cas, on peut le trouver à une certaine distance de l'épave principale. Lorsque des éléments se détachent de l'aéronef à faible altitude, les débris se trouvent répartis le long de la trajectoire de vol approximativement dans l'ordre dans lequel ils se sont détachés de l'aéronef. Lorsque des éléments se détachent de l'aéronef à haute altitude, la trajectoire de chute dépend de la masse, du profil aérodynamique, de la vitesse au moment du détachement et des vents en altitude ; il est nécessaire de procéder à un examen minutieux afin de déterminer, d'après l'ordre dans lequel les débris ont été retrouvés au sol, l'ordre dans lequel les différents éléments se sont détachés de l'aéronef. Il y a des méthodes qui permettent d'évaluer la trajectoire de chute des débris de l'épave et certains enquêteurs ont obtenu des résultats très utiles grâce à l'analyse de la répartition des débris de l'épave à la suite d'accidents de ce genre. L'étude de la répartition des débris de l'épave et la reconstitution de l'aéronef jouent un rôle important dans la détermination de l'ordre des ruptures ; d'autres techniques sont exposées dans les sections suivantes.

Rupture partielle ou dysfonctionnement

9.2.7 Les enquêtes sur les accidents de cette catégorie sont de loin les plus difficiles, car l'enquêteur ne peut fonder ses conclusions sur des indices évidents tels que le fait qu'une aile ait été retrouvée à une distance de 3 km de l'épave principale. Une rupture partielle ou un dysfonctionnement d'un élément important modifie en général les caractéristiques de vol, et cette modification est la cause directe de l'accident. Parmi les causes générales des accidents de cette catégorie, on peut citer le blocage des commandes, une mauvaise répartition du chargement à bord, le calage incorrect des gouvernes, l'installation défectueuse de certaines pièces, des réactions trop brutales du pilote automatique, etc. Comme il est fréquent que les accidents de ce type se produisent peu après une réparation ou une

modification, l'enquêteur pourra découvrir des indices précieux en procédant à une étude des antécédents de l'avion d'après les livres de maintenance, les comptes rendus du pilote et d'autres sources.

9.2.8 La procédure générale suivie pour les accidents de cette catégorie consiste à appliquer les méthodes classiques d'enquête en vérifiant systématiquement les diverses possibilités et les divers indices jusqu'à ce que la cause puisse être déterminée. Certaines techniques permettent de réduire la tâche de l'enquêteur. La technique d'élimination est l'une des plus utiles. Dans la plupart des accidents, un enquêteur expérimenté peut rapidement éliminer les hypothèses improbables, par exemple, d'après le type d'impact et cerner ainsi de manière générale la zone où la défaillance initiale a pris naissance. La méthode de reconstitution donne des résultats extrêmement utiles dans cette phase de l'enquête.

9.3 EXAMEN DE LA CELLULE, Y COMPRIS LE TRAIN D'ATERRISSAGE ET LES COMMANDES DE VOL

Dépôts et éraflures

9.3.1 Il peut être extrêmement difficile pour l'enquêteur de déterminer sur les lieux de l'accident les éléments qui ont cédé en vol et ceux qui ont cédé au moment de l'impact, mais un examen attentif de l'épave peut lui donner des renseignements utiles. Dans la mesure du possible, cet examen doit être fait avant que l'épave ne soit déplacée, car tout déplacement de l'épave risque de détruire de précieux indices ou créer des indices trompeurs. L'étude et l'analyse des dépôts et des éraflures de l'épave sont extrêmement utiles pour l'enquête sur des accidents survenus à la suite d'une collision.

9.3.2 Les dépôts peuvent être de la peinture, de l'apprêt, un film d'huile ou d'autres matériaux transférés d'une pièce à une autre lorsque les deux surfaces glissent ou frottent l'une sur l'autre. Ces glissements et frottements sont fréquents après une rupture structurelle en vol. Par exemple, un panneau d'aile qui se détache vient fréquemment heurter la partie arrière du fuselage ou l'empennage. Si le panneau d'aile était peint d'une couleur particulière, il serait normal de retrouver des traces de cette couleur sur le fuselage ou l'empennage. Ces dépôts de peinture sont plus épais sur les parties saillantes telles que les têtes de rivets ou les recouvrements du revêtement. Il est généralement possible de déterminer la direction du mouvement de l'élément qui a produit le dépôt car la peinture s'amasse du côté de la pièce en saillie opposé à la direction de ce mouvement. On trouve parfois des dépôts dans les fentes des vis ; dans certains cas un excédent de dépôt dépasse l'extrémité des fentes et se recourbe dans la direction du mouvement de l'élément qui a produit le dépôt. Si l'enquêteur n'est pas à même d'effectuer une détermination préliminaire et s'il estime que les dépôts peuvent fournir des indices intéressants, il peut faire procéder à un examen en laboratoire. Ce type d'examen permet habituellement de révéler la nature du dépôt et de déterminer exactement la direction du mouvement de l'élément qui a produit le dépôt.

9.3.3 Les éraflures se produisent lorsqu'une pièce glisse ou frotte sur une autre, par exemple, lorsque le bord acéré d'une pièce entaille l'autre pièce. Il arrive parfois que seule la couche de peinture est éraflée tandis que, plus souvent, c'est le métal qui est entaillé avec formation d'un sillon. L'examen minutieux d'une éraflure à la loupe ou au microscope révèle la présence de traces directionnelles et de copeaux métalliques incurvés dans la direction de la force d'éraflure. Lorsqu'un panneau de revêtement comportant un joint riveté avec des têtes de rivets en saillie heurte sous un angle très aigu un panneau de revêtement peint, il laisse généralement sur ce dernier une série de rayures parallèles dans la couche de peinture. S'il est possible de retrouver les dépôts correspondants sur l'une des rangées de rivets, et connaissant le pas des rivets, il est généralement possible de déterminer la position relative des deux pièces au cours du frottement. Cette détermination est souvent utile pour les enquêtes. Les éraflures peuvent souvent servir à déterminer si la rupture s'est produite avant l'impact ou après. Si l'on constate la présence d'éraflures sur plusieurs pièces contiguës de l'épave, la concordance et la continuité des éraflures sur les pièces après que celles-ci ont été replacées dans leurs positions relatives montrent que l'éraflure a été faite avant que les pièces aient été arrachées. Ce genre d'indice peut souvent être utilisé pour montrer que l'élément éraflé a heurté un autre élément, ce qui permet de déterminer l'ordre logique des ruptures en vol.

9.3.4 On relève souvent, sur les éléments de l'épave, un grand nombre d'autres marques distinctives et l'étude attentive de ces marques fournit souvent de nombreux indices utiles. Lorsqu'une hélice en rotation entaille un métal, elle laisse des marques en dents de scie très caractéristiques. Les dentelures déchiquetées sont déformées dans la direction de l'effort tranchant et leur extrémité est rebroussée d'une manière particulière. L'ampleur du rebroussement, l'étendue du déchiquetage des dentelures, la longueur et la largeur de l'entaille fournissent des indications sur le couple de l'hélice et sur la vitesse de translation au moment où les entailles ont été faites. Les câbles de commande produisent aussi des marques caractéristiques lorsqu'ils frappent un panneau de revêtement ou frottent contre ce panneau. Dans ce cas, les marques se présentent sous la forme d'une série de fines lignes parallèles. La forme et les dimensions exactes de ces marques peuvent souvent servir à déterminer la direction dans laquelle le câble se déplaçait au moment où les marques ont été faites. Il est parfois possible d'identifier, d'après la forme particulière des marques relevées sur des pièces ou des panneaux de revêtement, la pièce qui les a produites, ce qui donne un indice sur l'ordre dans lequel les ruptures se sont produites. Cependant, on peut quelquefois être induit en erreur par les marques des haches ou des scies à métaux faites au cours des opérations de récupération ; l'enquêteur doit apprendre à reconnaître ces marques et à les distinguer des autres marques décrites plus haut.

Voilure, fuselage et empennage

9.3.5 Lors de l'examen initial de la cellule, l'enquêteur doit déterminer si un des éléments principaux de la cellule n'était pas dans sa position relative correcte au moment de l'impact. La répartition des débris sur le sol et le télescopage des éléments de l'épave fournissent souvent des indices précieux. Des pièces manquantes et des tôles soumises à des contraintes excessives peuvent aussi se révéler très utiles.

9.3.6 Des pièces telles que les câbles, les poulies, les articulations et les dispositifs d'équilibrage et de compensation doivent être examinés de très près pour déterminer si les ruptures observées sont dues à un défaut de conception, à l'usure, à une maintenance insuffisante ou à l'impact.

9.3.7 L'examen de la partie principale du fuselage doit comporter, dans la mesure du possible, une évaluation de la répartition réelle des charges. Les valeurs ainsi obtenues doivent être comparées à celles du devis de poids et de centrage.

Train d'atterrissage

9.3.8 Il convient d'examiner les biellettes de commande, les dispositifs de verrouillage train rentré et train sorti ainsi que la position des vérins de commande pour déterminer si le train était rentré ou sorti. Si le train s'est cassé ou s'est détaché, noter la direction de la force qui a causé la rupture ou la séparation.

Commandes de vol

9.3.9 Dans la mesure du possible, il faut retrouver toutes les commandes, tant les commandes manuelles que les servocommandes, et les examiner minutieusement pour s'assurer qu'il ne manque aucun élément.

9.3.10 Il faut noter l'angle d'incidence de l'empennage horizontal et le réglage des compensateurs et des volets et de comparer ces valeurs aux indications correspondantes des instruments dans le poste de pilotage.

9.3.11 Tous les leviers de commande et les fixations de la tringlerie ou des câbles de commande à ces leviers doivent être vérifiés pour déterminer s'ils ont été convenablement montés et suffisamment lubrifiés, et s'ils ne sont pas coincés.

9.3.12 Si l'avion est équipé de déporteurs, il convient de les examiner pour déterminer s'ils étaient sortis au moment de l'impact et si leurs fixations se sont brisées.

Poste de pilotage

9.3.13 Consigner et photographier la position et le réglage de toutes les commandes et de tous les commutateurs et disjoncteurs du poste de pilotage peuvent être utiles dans l'enquête sur les structures. Ces tâches sont normalement exécutées durant l'enquête sur les systèmes et l'exploitation.

9.4 FATIGUE DES MATÉRIAUX

Généralités

9.4.1 La fatigue est le processus de dégradation et de rupture d'un élément dû à l'application répétée, ou cyclique, d'une charge. Les contraintes imposées peuvent très bien se situer au-dessous de la résistance maximale du matériau, mais elles peuvent causer des fissures microscopiques ou d'autres dommages qui peuvent conduire à la rupture de la pièce.

9.4.2 Trois conditions doivent être remplies pour que des criques, ou fissures, de fatigue se forment et se propagent dans les métaux :

- a) une contrainte plastique locale (concentration de contraintes) ;
- b) une contrainte de traction ;
- c) une contrainte cyclique (variable).

Les conditions b) et c) sont présentes chaque fois que l'aéronef est utilisé. Les exploitants et les spécialistes de la maintenance doivent savoir que l'élimination d'une quelconque de ces trois conditions peut mettre fin au processus de fatigue et le personnel peut jouer un rôle crucial dans l'incidence de la fatigue des structures.

9.4.3 En général, les ruptures de fatigue sont le résultat des fissures de fatigue. Ces fissures apparaissent le plus souvent dans les zones de grande concentration de contraintes (contrainte plastique locale). Certaines de ces concentrations se produisent à l'intérieur du métal. Des impuretés, des vides ou d'autres défauts peuvent constituer des concentrateurs de contraintes internes. La plus grande partie des concentrations se produisent cependant à la surface du métal, par exemple, des éléments de conception tels que des trous, des arêtes vives, des filetages tranchants, etc., et des défauts qui se produisent en service, tels que des entailles, des rainures, des griffures, des marques d'outil, etc.

9.4.4 L'augmentation de contrainte créée par le perçage de trous de fixation ronds ou elliptiques, par exemple, peut être calculée avec une bonne approximation à l'aide du facteur de concentration de contrainte K , qui se définit comme suit :

$$K = \frac{\text{contrainte réelle maximale}}{\text{contrainte nominale}}$$

la contrainte nominale étant la contrainte de traction de la plaque avant qu'elle ne soit percée, donnée par : $f = \frac{P}{A}$.

En pratique, on peut obtenir une bonne approximation de K dans la plaque percée à l'aide de la formule $K = 1 + 2\left(\frac{a}{b}\right)$.

Les dimensions de a et b par rapport à la charge sont indiquées à la Figure III-9-4. On peut voir que plus l'orifice s'allonge, plus la valeur de K augmente rapidement. Inversement, plus les dimensions se rapprochent d'un cercle parfait, plus la valeur de K se rapproche de 3.

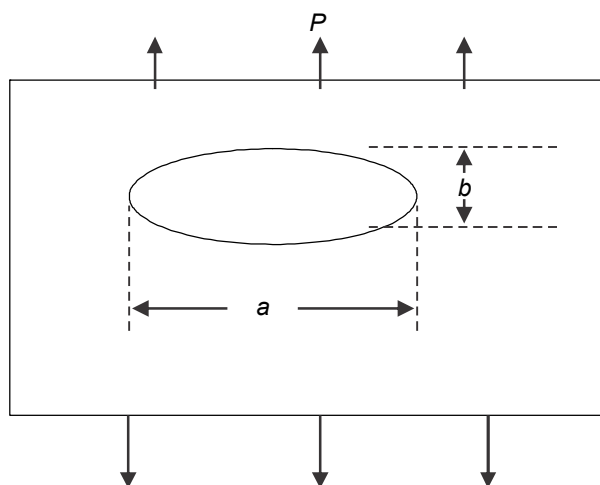


Figure III-9-4. Facteurs de concentration de contraintes des trous elliptiques

Identification des ruptures de fatigue

9.4.5 L'histoire complète d'une rupture de fatigue est presque toujours écrite sur le faciès de rupture. Une étude minutieuse des faciès de rupture permet donc d'obtenir de précieux renseignements sur l'intensité et la direction de la charge et sur la présence ou l'absence de concentrations de contraintes. L'interprétation de la rupture par contre n'est pas toujours une question simple parce que de nombreuses variables peuvent intervenir dans chaque cas. Certaines variables ont été brièvement mentionnées dans les sections précédentes. Certains facteurs contributifs, comme la décarburation (perte superficielle de carbone subie par un alliage ferreux à la suite d'un chauffage dans l'air), ne peuvent être vérifiés que par une analyse en laboratoire. En revanche, la cause peut être déterminée sur les lieux de l'accident par un examen minutieux de la rupture.

9.4.6 Les ruptures de fatigue se produisent sans ductilité (déformation plastique) appréciable, contrairement aux ruptures statiques qui s'accompagnent généralement d'une forte striction. Cette différence est souvent utile pour déterminer si la rupture d'une pièce est due à la fatigue. Toutefois, toutes les ruptures qui révèlent une faible résilience ne sont pas nécessairement des ruptures de fatigue et cette caractéristique doit être utilisée avec d'autres caractéristiques qui sont décrites plus loin avant de pouvoir porter un jugement définitif. En outre, la plupart des ruptures de fatigue (à l'exception de certaines ruptures de fatigue en torsion) se produisent dans les plans qui sont perpendiculaires ou presque perpendiculaires à la charge. Dans un grand nombre de pièces, le plan de fatigue est perpendiculaire à l'axe de la pièce et dans la zone soumise à la fatigue, la rupture est habituellement plane. Par conséquent, il est très probable que les ruptures irrégulières où le faciès de rupture présente plusieurs plans et où ces plans sont loin d'être perpendiculaires à la direction de la charge ou à l'axe de la pièce, sont très probablement dues à une cause autre que la fatigue, bien qu'il soit souvent nécessaire de procéder à un examen approfondi pour s'assurer qu'une petite partie du faciès de rupture ne présente pas des signes caractéristiques d'une rupture de fatigue. Les deux caractéristiques des ruptures de fatigue indiquées dans le présent paragraphe sont extrêmement utiles pour discerner une rupture de fatigue d'autres ruptures. En fait, dans les cas où les faciès de rupture ont été dégradés par des dommages ultérieurs, ces caractéristiques peuvent être les seuls indices qui permettent de distinguer une rupture de fatigue d'une rupture statique. Il est vivement souhaitable, pour des déterminations de ce genre, de disposer des deux moitiés de la rupture. Les enquêteurs doivent faire très attention de ne pas essayer de réunir les deux parties, car les marques d'arrêt sur les deux surfaces seront détruites.

9.4.7 Comme il est indiqué plus haut, les renseignements les plus utiles sont ceux que fournit le faciès de rupture. La rupture elle-même se compose de deux zones distinctes : une très lisse et veloutée, la zone de fatigue, et l'autre granuleuse et cristalline, la zone de rupture instantanée. L'aspect lisse et velouté de la zone de fatigue est dû au frottement des surfaces correspondantes à mesure que la fissure s'ouvre et se ferme sous l'action répétée de la charge. L'aspect granuleux de la zone de rupture instantanée a donné naissance à la théorie erronée de la cristallisation. Pendant longtemps, les personnes qui examinaient ces ruptures ont considéré que la rupture de fatigue était due au fait que la pièce s'était « cristallisée », mais on sait maintenant que tel n'est pas le cas puisque tous les métaux sont cristallins à l'état solide.

9.4.8 Pour repérer une rupture de fatigue, il faut donc d'abord rechercher les deux types de zones distinctes sur le faciès de rupture : la zone de fatigue et la zone de rupture instantanée (Figures III-9-5 et III-9-6).

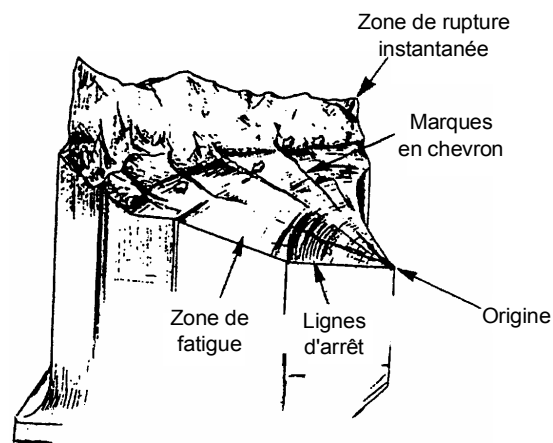


Figure III-9-5. Rupture de fatigue type d'un matériau ductile

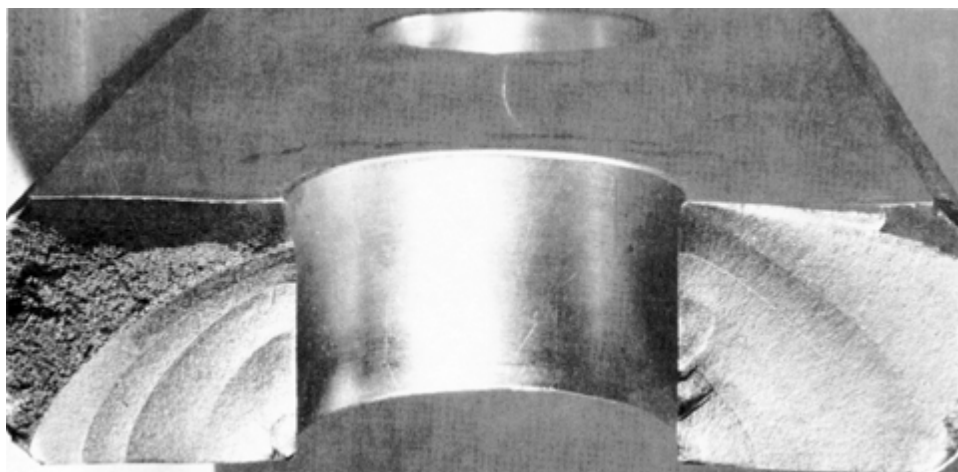


Figure III-9-6. Rupture de fatigue. Noter l'apparence lisse et veloutée de la zone de fatigue, les lignes d'arrêt claires et l'apparence rugueuse de la zone instantanée.

9.4.9 Sur de nombreuses ruptures, on constate fréquemment la présence de plusieurs zones de fatigue, ce qui indique que la fatigue avait provoqué l'apparition de plusieurs fissures qui progressaient au moment de la rupture finale. Dans chaque zone de fatigue, on peut trouver l'origine de la fissure de fatigue en déterminant le point à partir duquel rayonnent les marques de progression frontale des fissures. Ces traces de progression de la fatigue, qui dessinent des courbes sur la surface de la rupture, s'appellent des lignes d'arrêt et on les retrouve sur presque toutes les ruptures de fatigue en service. On remarquera cependant que dans certains cas, notamment lorsque les cycles de chargement sont relativement constants, les fissures de fatigue peuvent progresser sans laisser de traces de progression. Dans ce cas, la rupture de fatigue peut habituellement être décelée par son aspect lisse et velouté, ou par l'existence d'un plan de rupture unique sensiblement perpendiculaire à la direction de la charge ainsi que par l'absence de tout signe de déformation plastique. Toute rupture douteuse ou suspecte doit être soumise à l'examen d'un spécialiste.

9.4.10 Les nombreuses marques de progression des fissures qui caractérisent une rupture de fatigue en service sont dues aux variations du frottement lorsque la fissure s'arrête de progresser pendant certaines périodes ou progresse plus ou moins vite selon l'intensité des contraintes. C'est pourquoi l'expression « lignes d'arrêt » est peut-être plus imagée pour désigner les marques de progression des fissures que les autres expressions généralement utilisées, car elle indique un temps d'arrêt dans la progression de la fissure. Les ruptures de fatigue obtenues en laboratoire sur des éprouvettes présentent très rarement ces lignes d'arrêt, car la plupart des essais de fatigue sont effectués avec une amplitude de charge constante. Les lignes d'arrêt sont généralement concaves par rapport au point d'amorce de la rupture, mais la courbure varie beaucoup avec la forme de la pièce, la concentration des contraintes et le type de charge.

9.4.11 L'enquêteur doit aussi noter les dimensions relatives des deux zones, car elles peuvent permettre d'estimer de façon qualitative le nombre de cycles et les niveaux de contrainte en cause. Une grande zone de fatigue par rapport à la zone de rupture instantanée indique de faibles niveaux de contrainte et un grand nombre de cycles avant la rupture, tandis qu'une grande zone instantanée indique que la rupture s'est produite à la suite de contraintes élevées sur moins de cycles. Les termes « fatigue polycyclique » et « fatigue oligocyclique » sont souvent employés pour décrire ces conditions : le terme oligocyclique s'applique à des centaines ou des milliers de cycles, tandis que le terme polycyclique indique des millions de cycles.

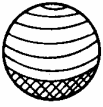
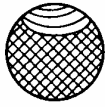





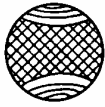




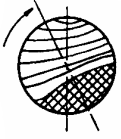
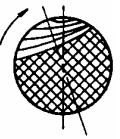

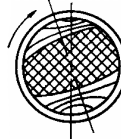
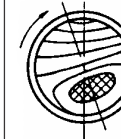
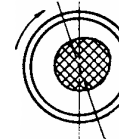
9.4.12 Il convient de rappeler que l'analyse des ruptures est un problème complexe et que le présent document ne peut pas présenter les innombrables variantes que l'on peut rencontrer, mais les renseignements présentés dans les sections qui suivent devraient permettre à l'enquêteur de reconnaître et d'analyser la plupart des ruptures de fatigue en service qu'il est susceptible de rencontrer.

Ruptures de fatigue en flexion

9.4.13 Les ruptures de fatigue en flexion peuvent être divisées en trois catégories selon le type d'effort de flexion imposé : la flexion unilatérale, la flexion bilatérale et la flexion rotative. La plupart des ruptures de fatigue en service peuvent être classées dans une de ces catégories (voir le Tableau III-9-1).

9.4.14 Les ruptures de fatigue en flexion unilatérale se produisent lorsqu'une charge de flexion variable produit des contraintes supérieures à la limite d'endurance du matériau d'un seul côté de la pièce. La limite d'endurance d'un matériau peut se définir comme le niveau de contrainte au-dessous duquel il y a une probabilité d'au plus 50 % que la fatigue s'amorce. Sous ce type de charge, la contrainte est généralement maximale en un point de la surface extérieure de la pièce et une fissure de fatigue se produit en ce point si la contrainte dépasse la limite d'endurance et si elle est répétée un nombre suffisant de fois. Dans le cas de charges de flexion bilatérale, des contraintes de traction se produisent de part et d'autre d'un axe neutre et, lorsque le niveau de contrainte et le nombre de chargements atteignent les valeurs indiquées ci-dessus, des fissures apparaissent sur les deux côtés de la pièce et progressent vers le centre. La flexion rotative se produit lorsqu'une pièce tourne pendant qu'elle est soumise à une charge de flexion. Un exemple type de flexion rotative est celui du vilebrequin d'un moteur ou de l'essieu d'un wagon de chemin de fer sous une charge de service.

Tableau III-9-1. Apparence des ruptures de fatigue en flexion

Cas	Contrainte	Aucune concentration de contraintes		Faible concentration de contraintes		Forte concentration de contraintes	
		Faible surcharge a	Forte surcharge b	Faible surcharge c	Forte surcharge d	Faible surcharge e	Forte surcharge f
1	Charge de flexion unilatérale						
2	Charge de flexion bilatérale						
3	Flexion alternée et charge de rotation						

9.4.15 Dans tous les cas, le niveau de contrainte a une incidence sur les dimensions relatives de la zone de fatigue et de la zone de rupture instantanée. Lorsque la contrainte est faible, la zone de fatigue est grande, et vice versa. La concentration de contraintes joue sur la courbure générale des lignes d'arrêt. Les sources ponctuelles de concentration de contraintes tendent à diminuer avec le rayon de courbure près du point d'origine et les sources linéaires tendent à produire des fissures multiples qui se rejoignent pour former un front de fissure à peu près parallèle à la ligne de concentration des contraintes.

9.4.16 Ces caractéristiques générales peuvent être utilisées pour déterminer le type de charge de flexion appliquée et, de manière qualitative, le niveau de contrainte et la présence ou l'absence de concentrations de contraintes. Si la section de la pièce examinée est très différente d'une section symétrique, la signification réelle des lignes en tant qu'indication du niveau de contrainte et de la concentration des contraintes peut être quelque peu différente, mais le même raisonnement s'applique.

Rupture de fatigue en traction

9.4.17 En raison de l'excentricité initiale des pièces ou de l'application excentrique des charges, les charges en traction pure se produisent rarement en service. En général, la traction sur un chargement axial s'accompagne d'une certaine flexion. Cependant, il se produit en service un nombre suffisant de ruptures de fatigue sous des charges essentiellement axiales pour qu'il soit justifié d'apprendre à distinguer ces ruptures des ruptures en flexion et en torsion. On peut généralement reconnaître les ruptures de fatigue en traction par le mode de progression de la fissure dans la pièce. Des lignes d'arrêt parallèles ou à courbure constante sont caractéristiques des ruptures de fatigue dues à une charge de traction. Comme dans le cas des ruptures de fatigue en flexion, les dimensions relatives de la zone de fatigue et de la zone instantanée peuvent être utilisées pour obtenir une indication du niveau de contrainte qui a produit la rupture.

Ruptures de fatigue en torsion

9.4.18 Il y a fondamentalement deux types de rupture de fatigue en torsion : 1) la rupture de type hélicoïdal, sous un angle d'environ 45° par rapport à l'axe de rotation de l'arbre, dans le plan de traction maximale, et 2) la rupture de type longitudinal ou transversal par rapport à l'axe de rotation, dans les plans de cisaillement maximal. Les lignes d'arrêt ne sont pas toujours visibles sur le faciès de rupture et il est souvent nécessaire d'utiliser des moyens indirects, tels que l'absence de ductilité et l'observation de l'angle du plan de rupture pour identifier les ruptures de ce type. Les surfaces des ruptures transversales sont habituellement très lisses en raison du frottement des deux moitiés de la rupture avant qu'elles ne se séparent et cette caractéristique peut être utilisée pour identifier ce type de rupture. Dans de nombreux cas de ruptures en torsion observées en service, la fissure initiale commence dans un plan puis glisse vers un autre plan. Les ruptures hélicoïdales se produisent généralement lorsqu'il existe des sources ponctuelles de concentration des contraintes. Les fissures de fatigue tendent à suivre la direction des sources linéaires de concentration des contraintes. L'enquêteur qui recherche des indices de ruptures de fatigue en torsion a l'avantage de savoir que la pièce est soumise à des charges de torsion lors de son utilisation en service. Il faut soupçonner la fatigue en torsion lors de l'examen de ruptures de vilebrequins, de tubes de commande de volets, de ressorts hélicoïdaux, d'arbres cannelés, etc. De nombreuses pièces soumises aux charges de torsion peuvent être cimentées et la rupture du ciment (couche superficielle dure) peut ressembler à une rupture de fatigue même lorsqu'elle est causée par une forte surcharge (voir la Figure III-9-7).

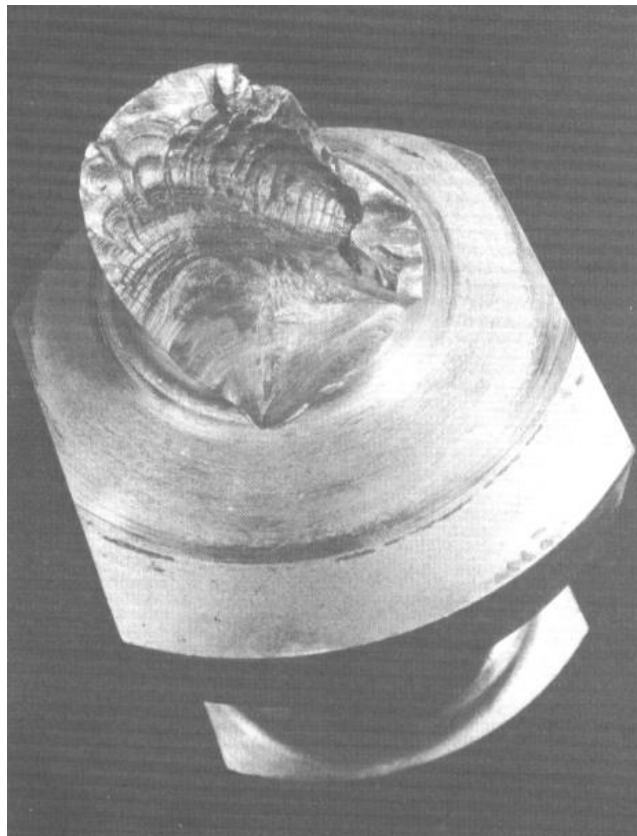


Figure III-9-7. Rupture de fatigue d'un arbre de poinçonneuse soumise à des charges de torsion et de flexion. La fissure de fatigue commence à un congé de raccordement à angle vif à un changement de section.

9.5 IDENTIFICATION DES RUPTURES STATIQUES

Généralités

9.5.1 Dans le présent document, une rupture statique désigne une rupture provoquée par une charge appliquée une seule fois ou un petit nombre de fois. La rupture se caractérise par une déformation permanente ou une rupture de la pièce sous l'effet de contraintes supérieures à la limite d'élasticité du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles, on peut reconnaître ce type de rupture par une déformation sur une grande partie de la pièce dans la zone de rupture. Ce phénomène est généralement appelé déformation plastique ou « striction » dans le cas de la rupture d'une éprouvette soumise à un essai de traction classique. Les matériaux relativement peu ductiles, tels que les alliages d'aluminium à haute résistance, les aciers à ultra-haute résistance et la plupart des pièces moulées peuvent ne présenter aucune striction ou déformation appréciable. Les charges d'impact peuvent être considérées comme un cas spécial de charge statique dans lequel la vitesse d'application de la charge influe sur l'intensité de la charge.

9.5.2 Les ruptures statiques se produisent lorsque des charges supérieures aux charges ultimes sont imposées à l'aéronef ou à l'un de ses éléments. En vol, ces ruptures peuvent se produire lorsqu'une manœuvre est exécutée trop brutalement ou à une vitesse trop élevée. À l'atterrissage ou au sol, elles peuvent se produire lorsque l'atterrissage est trop brutal ou lorsque l'aéronef roule sur un obstacle. Les dommages causés lorsqu'un aéronef heurte le sol sont du type statique, la charge d'impact constituant alors un facteur important.

Types courants de ruptures des métaux

9.5.3 La déformation ou « striction » présente dans la plupart des ruptures de métaux est un indice d'une rupture de type statique. Un examen détaillé de la déformation permet de déceler le type de charge (flexion, traction, etc.) et la direction du chargement. Dans la plupart des cas, les deux moitiés de la rupture s'adaptent l'une à l'autre ou on peut reconnaître la correspondance entre les deux. Il faut cependant prendre soin d'éviter tout contact entre les surfaces car il pourrait altérer ou détruire les indices superficiels dont a besoin le laboratoire pour évaluer les faciès de rupture.

Traction

9.5.4 Dans une rupture en traction, le faciès de rupture est généralement constitué, en totalité ou en partie, d'une série de plans inclinés d'environ 45 à 60° par rapport à la direction de la charge. Dans le cas d'une pièce mince, comme une tôle, il peut n'y avoir qu'un seul plan incliné. Les ruptures en plan incliné s'appellent « ruptures obliques » ou « ruptures par cisaillement à la traction » tandis que les ruptures perpendiculaires à la direction de la charge s'appellent « ruptures plates ». Lorsqu'une rupture plate présente de petites cassures obliques sur les bords, les cassures obliques s'appellent des lèvres de cisaillement. Dans les matériaux ductiles, on constate généralement une forte déformation locale ou « striction » avec une diminution de la section transversale. Dans le cas d'une rupture en une traction pure, les deux parties se séparent nettement sans qu'il y ait frottement entre les deux surfaces. La Figure III-9-8 montre une rupture en traction d'un matériau généralement employé dans les aéronefs.

Compression

9.5.5 Les ruptures par compression se présentent sous deux formes générales : la compression pure et la compression avec flambage. La compression pure se produit en général dans des pièces courtes et épaisses, tandis que le flambage se produit dans les pièces longues et minces. Si le flambage se produit localement, on parle alors de « voilement ». S'il s'applique à toute la pièce, on parle de « flambage en colonne ». Il est facile de reconnaître le voilement et le flambage puisque, dans tous les cas, la pièce est déformée.

9.5.6 Dans les ruptures par compression pure, la pièce se casse selon des plans obliques, comme dans le cas de la traction, sauf qu'il y a frottement entre les deux surfaces de rupture durant la séparation. En outre, dans certains matériaux, il y a une augmentation de la surface de la section droite à l'endroit où le matériau a cédé. La Figure III-9-9 donne des exemples de flambage et de compression pure.

Flexion

9.5.7 Dans une rupture par flexion, un côté de la pièce est soumise à des contraintes de traction et l'autre côté, à des contraintes de compression. Dans les zones correspondantes, l'aspect de la rupture est celui qui est indiqué plus haut pour la traction et la compression. La direction du moment de flexion qui cause la rupture peut toujours être déterminée par la déformation locale de la zone de rupture. La séparation des deux moitiés de la pièce peut laisser des bords arrondis en forme de lèvres du côté intérieur, ou côté de compression de la rupture. Cette déformation se produit parce qu'après la rupture initiale en traction, la rupture finale du côté compression peut se produire par cisaillement plutôt que par compression. Ce type de rupture est illustré à la Figure III-9-10.

Cisaillement

9.5.8 Les ruptures par cisaillement, comme les ruptures par compression, peuvent se produire de deux façons : le cisaillement pur et le cisaillement avec flambage. Dans le premier cas, les deux parties de la pièce glissent l'une sur l'autre après la rupture et les surfaces présentent des signes de frottement, de polissage ou d'éraflure. La direction des éraflures donne une indication de la direction dans laquelle l'effort de cisaillement a été appliqué.

9.5.9 Le cisaillement avec flambage se produit habituellement sur des tôles minces telles que le revêtement des ailes ou les âmes de longerons. La tôle présente un gondolement oblique et l'aspect de ce gondolement permet de déterminer la direction d'application de l'effort de cisaillement. La Figure III-9-11 montre des exemples de cisaillement pur et de cisaillement avec flambage de matériaux ductiles.

9.5.10 Lorsqu'il y a cisaillement d'un rivet, d'une vis ou d'un boulon, la rupture s'accompagne habituellement d'une ovalisation du trou et il se forme derrière le rivet un espace vide en forme de lunule. La position de la lunule peut être utilisée pour déterminer la direction de l'effort de cisaillement.

Torsion

9.5.11 La torsion étant une forme de cisaillement, la rupture provoquée par une surcharge en torsion présente des caractéristiques analogues à celles de la rupture par cisaillement. La direction du couple de torsion est indiquée par les éraflures qui apparaissent sur le faciès de rupture. La plupart des pièces conservent une déformation permanente qui peut aussi être utilisée comme indice. Dans le cas de pièces tubulaires ou de sections creuses de grandes dimensions, comme celles d'une aile, les ruptures par torsion se produisent souvent comme s'il s'agissait d'une rupture d'instabilité avec flambage. Un examen attentif du flambage permet de déterminer le sens de la torsion. La Figure III-9-12 montre des exemples de rupture par torsion.

Déchirement

9.5.12 Le déchirement des tôles minces, ou même des pièces plus épaisses, se produit habituellement de deux manières : le déchirement par cisaillement et le déchirement par traction.

9.5.13 Le déchirement par cisaillement se produit lorsque les forces appliquées agissent dans le plan de la tôle. Ces ruptures se caractérisent par la formation de lèvres sur les bords de la tôle et l'apparition de rayures sur le faciès de rupture. La concavité des rayures peut être utilisée pour déterminer la direction du déchirement, qui va du côté convexe au côté concave. Dans certains cas, s'il y a une épaisse couche de peinture, la rupture en dents de scie de cette couche de peinture peut être utilisée pour établir la direction du déchirement.

9.5.14 Le déchirement par traction se produit lorsque la tôle se déchire sous des forces de traction qui s'exercent dans le plan de la tôle ou de la pièce. Ce type de rupture est très fréquent. Sauf dans le cas d'une tôle mince, l'examen de la rupture permet de déceler des marques en chevron ; la pointe du chevron indique l'origine du déchirement.

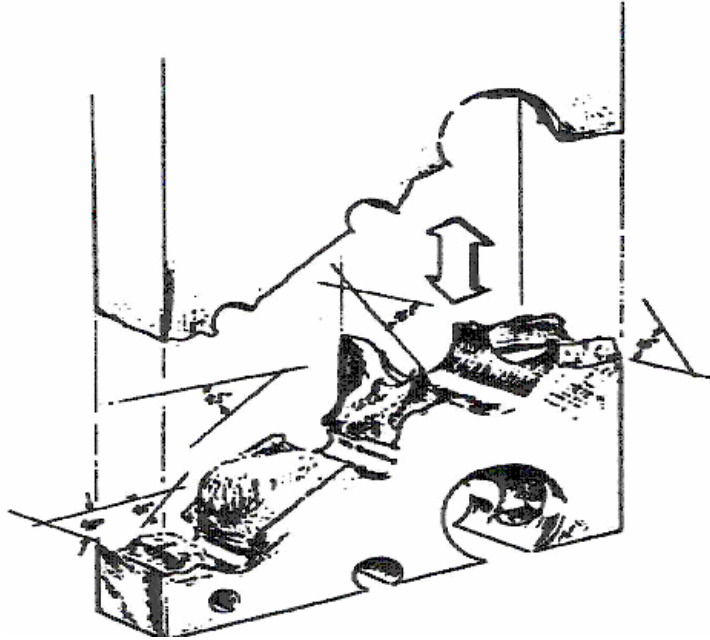


Figure III-9-8. Rupture statique par traction d'un matériau ductile

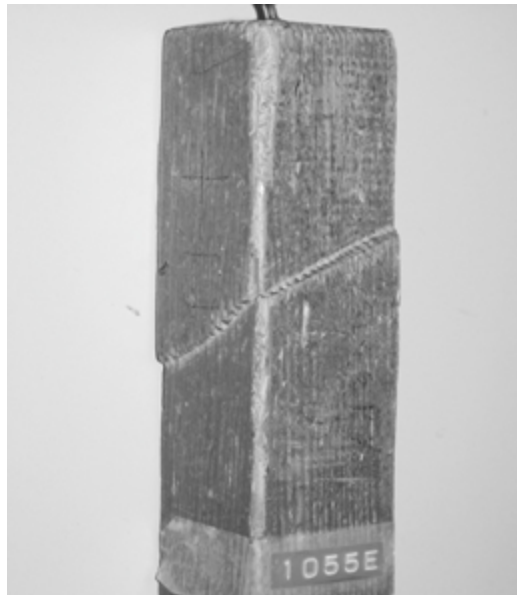
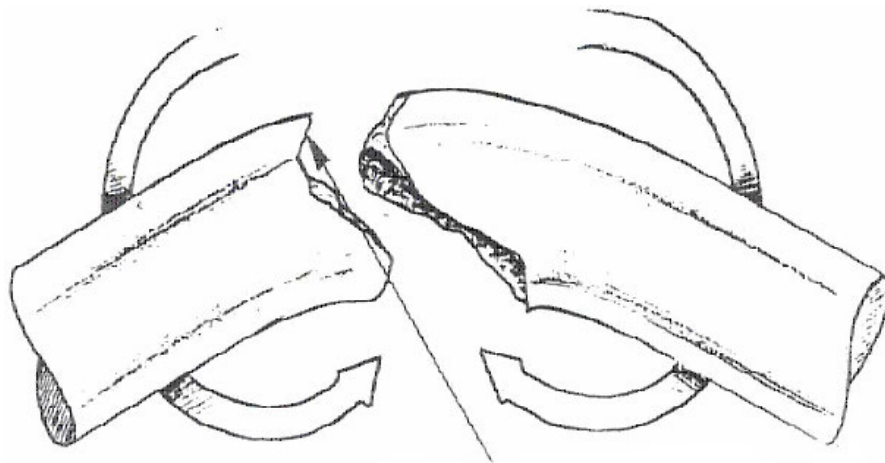


Figure III-9-9. Rupture par compression avec flambage (à gauche)
Rupture par compression pure (à droite)



Surface de cisaillement à un angle de 45°

Figure III-9-10. Rupture par flexion d'un matériau ductile

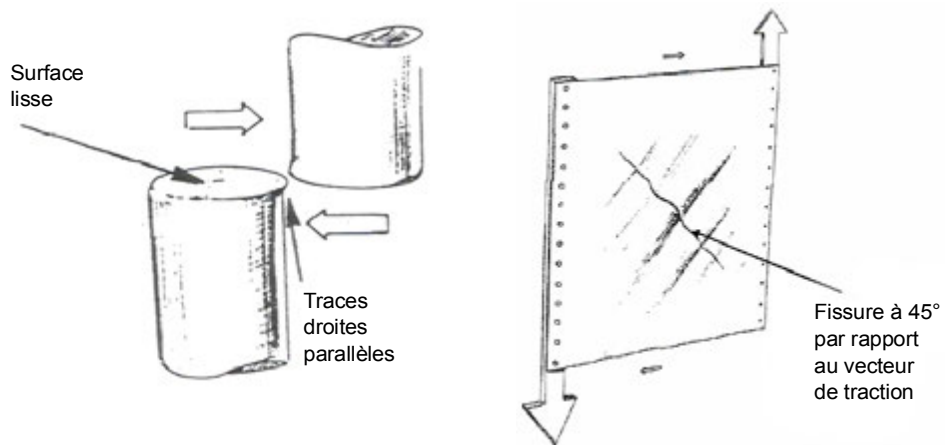


Figure III-9-11. Ruptures par cisaillement. Rupture par cisaillement pur (à gauche) et rupture par cisaillement avec flambage (à droite).

Ruptures courantes des tissus

Traction

9.5.15 Comme on peut s'y attendre, les ruptures de tissus résultent d'un effort excessif exercé sur les différents fils. Si l'effort de traction est parallèle aux fils du tissu, les extrémités des fils libres prennent un aspect broussailleux et ne se déforment pas par rapport à l'axe de la charge de traction. Si l'effort de traction est appliqué à un angle par rapport aux fils, les fils qui se trouvent sur la ligne de rupture se déforment dans l'axe de la charge (Figure III-9-13).

Déchirement

9.5.16 Lorsqu'ils sont soumis à des charges de déchirement, les fils se rompent sous l'effet de la traction, mais ils se déforment généralement dans la direction du déchirement. Les extrémités des fils présentent l'aspect broussailleux classique. La déformation de fils est beaucoup plus prononcée que lorsque l'effort de traction s'exerce à un angle par rapport aux fils (Figure III-9-14).

Effilochage

9.5.17 L'effilochage désigne l'aspect des tissus qui claquent au vent après une rupture. Le tissu se défait, devient duveteux et peut même former des nœuds. Ce phénomène est parfois l'indication d'une rupture en vol, mais il peut aussi se produire au sol par vent fort et il faut l'interpréter avec prudence. L'importance de l'effilochage peut donner une idée du temps d'exposition au vent ; un effilochage important peut indiquer une longue exposition au vent ou une exposition à un vent violent (Figure III-9-15).

Ruptures courantes des polymères (plastiques)

Généralités

9.5.18 Les ruptures des hublots de plastique sont difficiles à étudier vu que, dans la plupart des cas, il ne reste qu'un petit nombre de fragments pouvant être examinés. Plus le nombre de morceaux récupérés est grand, meilleures sont les chances de pouvoir déterminer le mode de rupture. La méthode générale utilisée pour l'étude des ruptures des plastiques est de rassembler les fragments disponibles et de localiser la rupture initiale en établissant la relation entre les différents tracés de chaque rupture. Les paragraphes qui suivent donnent des renseignements sur l'apparence des ruptures par traction, par flexion et par déchirement, ainsi que quelques principes généraux qui aident à localiser la rupture initiale. La première trace de rupture ne se termine qu'au bord d'un panneau et présente généralement une courbe régulière. Les cassures ou ruptures qui se terminent à d'autres cassures sont donc des ruptures secondaires. Toutes les cassures doivent être soigneusement examinées pour voir s'il y a des bulles, des rayures, des entailles ou des sillons. En général, ces marques servent de concentrateurs de contraintes et amorcent la rupture.

9.5.19 Deux types généraux de marques ont été identifiés dans les ruptures du verre ou du plastique et sont généralement utilisés : les « nervures » et les « lancettes ». Les nervures sont analogues aux marques classiques de fatigue en forme d'onde ou de coquille ; il s'agit de lignes incurvées qui rayonnent dans la direction de propagation de la rupture. La rupture atteint la nervure par le côté concave et la quitte par le côté convexe. Bien que les marques de nervures qui apparaissent dans la rupture du verre ou du plastique soient causées par un impact, elles peuvent être produites par une déchirure relativement lente du verre ou du plastique. Les lancettes sont perpendiculaires aux nervures et sont analogues aux marques « en dent de loup » provoquées par la fatigue et correspondant à des fissures multiples qui se rejoignent. Les lancettes facilitent l'identification de l'origine de la rupture, car elles indiquent toujours la direction de la fissure initiale. Si la rupture a été provoquée par une bulle ou un autre défaut, on constate souvent que des marques en lancette rayonnent à partir de ce défaut.

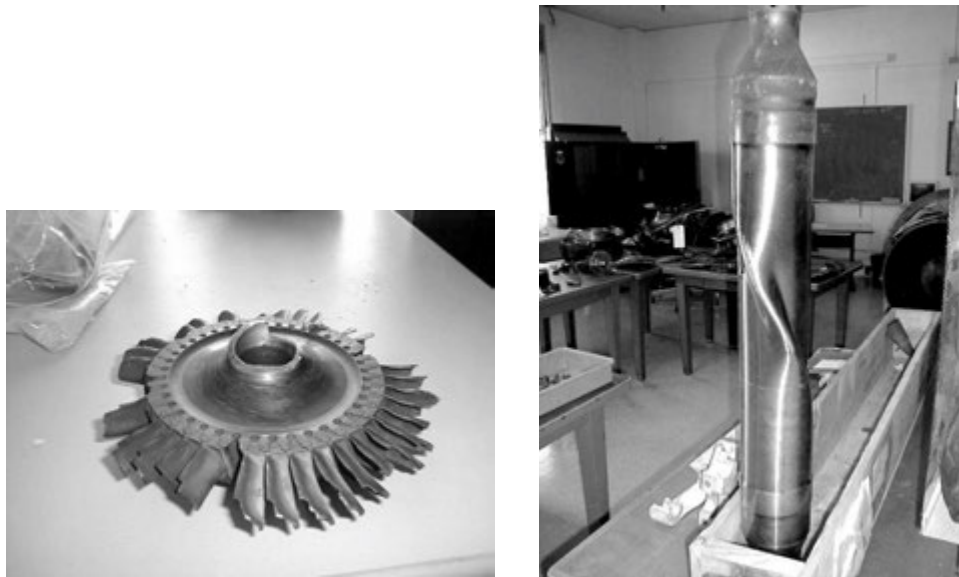
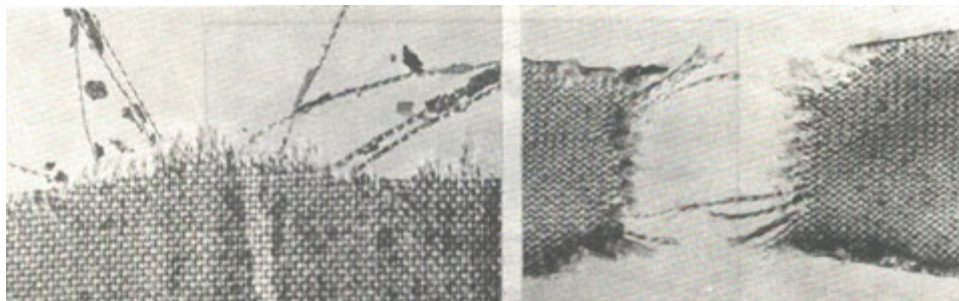


Figure III-9-12. Ruptures en torsion. Turbine d'hélicoptère (à gauche) et rupture d'arbre de turbine (à droite).



**Figure III-9-13. Ruptures en traction du tissu.
Aspect broussailleux ; les fibres sont effilochées dans le sens du fil (à gauche).
Aspect broussailleux ; les fibres sont rebroussées localement en travers des fils au point de déchirement (à droite).**

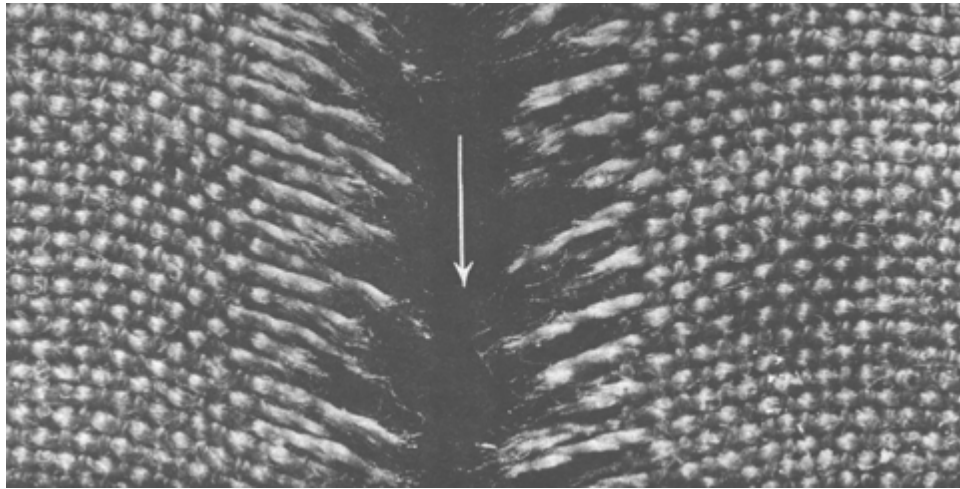


Figure III-9-14. Déchirement. Les fibres sont rebroussées dans le sens du déchirement.



Figure III-9-15. Effilochage. Bords rompus devenus duveteux après le claquement au vent (à gauche). Rupture après effilochage (à droite).

Rupture en traction

9.5.20 En raison de leur faible ductilité, les plexiglas et autres matières plastiques du même genre se brisent par fragilité. Les ruptures commencent généralement en un point faible quelconque du matériau ou au niveau d'une rayure ou d'une entaille. La zone de rupture initiale est généralement plane, lisse et fortement polie. Des marques ressemblant aux chevrons constatés sur les ruptures par déchirement du métal rayonnent à partir du point d'origine de la rupture en traction. En déplaçant la pièce pour en modifier l'éclairage, on réussit parfois à rendre ces marques plus visibles.

Rupture en flexion

9.5.21 On peut généralement déterminer le côté extérieur, ou côté traction, de la pièce fléchie en recherchant le côté plan de la fracture, qui est à peu près perpendiculaire à la surface. Du côté compression, la rupture se produit généralement selon un plan oblique et le bord côté compression est soit en forme de lèvres, soit arrondi.

Déchirement

9.5.22 Le déchirement d'une pièce en matière plastique est essentiellement un déchirement en traction sous l'effet d'une charge qui est presque dans le plan de la surface. Les ruptures par déchirement comportent souvent les effets de la flexion combinés à ceux de la traction. Des lignes incurvées et ondulées sont visibles sur le plan de rupture et rayonnent à partir du point de départ de la déchirure. Ces lignes incurvées sont généralement perpendiculaires au bord en traction de la rupture et s'incurvent rapidement jusqu'à paraître tangentes au bord de compression. Ces marques ressemblent aux marques classiques en coquille qui apparaissent dans le cas de ruptures de fatigue des pièces métalliques et qui, dans le cas du plastique, sont généralement appelées marques de nervures.

9.6 MODES D'APPLICATION DE LA CHARGE

Généralités

9.6.1 Le mode d'application de la charge a un effet très important sur la manière dont un élément cède en service. Toute classification des divers modes d'application d'une charge ne saurait être qu'arbitraire car, en général, la différence entre un mode et un autre n'est en fait qu'une question de degré. Un mode donné d'application de la charge devient un autre mode lorsqu'on augmente ou qu'on diminue la vitesse d'application. Les variations de la fréquence d'application de la charge entraînent également un changement de mode. En réalité, il est impossible d'établir une règle rigide. Toutefois, pour les besoins de l'enquête, il est parfois commode de considérer une charge comme appartenant à un mode donné. C'est pourquoi dans l'exposé qui suit, les différents modes ont été subdivisés arbitrairement en trois catégories : charges statiques, charges répétées et charges dynamiques.

Charges statiques

9.6.2 Les charges statiques peuvent se subdiviser en charges statiques de courte durée et en charges statiques de longue durée.

Charges de courte durée

9.6.3 Dans le cas d'une charge statique de courte durée, la charge est appliquée d'une manière progressive de telle sorte qu'à tout moment toutes les pièces sont sensiblement en état d'équilibre et on peut utiliser directement les formules classiques simples de résistance des matériaux. Aux essais, on augmente progressivement la charge jusqu'à la rupture et le temps total nécessaire pour produire la rupture ne dépasse pas quelques minutes. En service, la charge augmente progressivement pour atteindre sa valeur maximale, ne reste à sa valeur maximale que pendant un temps limité et n'est pas réappliquée avec une fréquence suffisante pour que la fatigue entre en jeu. La résistance à la rupture, la limite élastique, la limite de résistance, la limite conventionnelle d'élasticité et le module d'élasticité d'un matériau sont généralement déterminés au moyen d'essais statiques de courte durée. Comme il est expliqué en détail plus loin, c'est le mode d'application de la charge qui est utilisé avec les critères de calcul actuels. Les charges imposées à l'aéronef au cours de diverses manœuvres ou sous l'effet de rafales isolées sont généralement considérées comme des charges statiques.

Charges de longue durée

9.6.4 Lors de l'application des charges statiques de longue durée, la charge est appliquée progressivement, comme précédemment, jusqu'à la charge maximale, mais elle est maintenue. Aux essais, on la maintient pendant un temps suffisant pour qu'il soit possible de prévoir son effet final probable. En service, cette charge est maintenue continuellement ou par intermittence pendant toute la durée d'utilisation de la cellule. Les caractéristiques de fluage, ou

déformation plastique à froid, d'un matériau et sa résistance permanente probable sont déterminées par des essais de longue durée à la température qui correspond aux conditions d'utilisation en service. Ce mode d'application de la charge n'a généralement d'importance qu'aux hautes températures. Lorsqu'une pièce est sollicitée pendant un temps relativement long à une température supérieure à la température normale, elle commence à se déformer à une vitesse plus ou moins uniforme. La résistance de la pièce est plus faible qu'elle ne l'est à la température ambiante. À l'heure actuelle, les charges de ce genre n'ont que peu d'applications dans les avions civils. Toutefois, elles prendront de plus en plus d'importance à mesure que la vitesse des avions augmentera et que la température du revêtement atteindra des valeurs suffisamment élevées.

Charges répétées

9.6.5 Dans une sollicitation répétée, la contrainte ou charge est appliquée, puis entièrement ou partiellement relâchée ou augmentée un grand nombre de fois en succession rapide. C'est le type de sollicitation qui est associé à la fatigue. D'une manière générale, les charges répétées impliquent un grand nombre d'applications de la charge. Toutefois, dans certaines conditions, une charge répétée un nombre de fois relativement faible peut fournir un résultat analogue à celui d'un grand nombre d'applications. Ce point est examiné plus à fond dans la section sur la fatigue. Le point important dont il faut se souvenir pour le moment est que la résistance d'une pièce diminue par rapport à sa résistance statique lorsque l'on applique une charge répétée. L'importance exacte de la diminution varie en fonction du niveau de contrainte et du nombre de répétitions. Voici un exemple type qui illustre ces variations : si on sollicite une barre cylindrique en alliage d'aluminium 2014-T6 en traction, sa charge de rupture est de 42 kg/mm^2 ($60\,000 \text{ lb/po}^2$). Cependant, si on soumet la même barre à $100\,000\,000$ de cycles de flexion alternée, sa résistance à la rupture tombe à 14 kg/mm^2 ($20\,000 \text{ lb/po}^2$). Des nombres de cycles de cet ordre se rencontrent fréquemment au cours de la durée de vie utile d'un aéronef. Les rafales et les vibrations produisent des charges répétées et pour certains aéronefs les charges imposées par les manœuvres sont importantes.

Charges dynamiques

9.6.6 Dans les deux types de charges ci-dessus, il y a un état d'équilibre ; autrement dit, les charges extérieures sont équilibrées par les charges intérieures. Dans le cas des charges dynamiques, la pièce sollicitée est en vibration et, pendant un certain temps, il n'y a pas d'équilibre statique. D'une manière générale, on peut considérer deux catégories de charges dynamiques, la charge soudaine et la charge d'impact.

Charge soudaine

9.6.7 Il y a charge soudaine lorsqu'un « poids mort », immobile, est subitement placé sur un élément de la cellule. C'est le genre de contrainte que subirait une poutre si on suspendait un poids à une corde jusqu'à ce que le poids touche la poutre, puis qu'on coupe la corde. La contrainte et la déformation produites par cette charge correspondent à environ deux fois la contrainte et la déformation qu'imposerait la même charge si on la posait doucement sur la poutre, comme dans le cas d'une charge statique. Lorsqu'on applique un effort soudain, la contrainte et la déformation sont environ le double de celles que l'on observe lorsque le même effort est appliqué progressivement. La valeur exacte de coefficient de multiplication dépend surtout de la nature de l'effort ou de la charge considérée et de la rigidité du système. En aéronautique, les charges de rafales entrent dans la catégorie des charges soudaines bien que, comme on le verra plus loin, on les traite comme s'il s'agissait de charges statiques.

Charge d'impact

9.6.8 L'impact est généralement associé au mouvement, comme c'est le cas lorsqu'un corps en heurte un autre. Dans le cas des charges d'impact, l'effort exercé peut être considérable. Ce type de chargement n'est pas directement utilisé pour la conception des aéronefs (à l'exception peut-être du calcul des probabilités de survie en cas d'impact), mais il est important pour l'enquête sur les accidents d'aviation. Les matériaux dont la rupture présente généralement

les caractéristiques de la ductilité sous l'effet d'une charge statique peuvent se comporter comme des matériaux fragiles si la vitesse d'application de la charge est suffisamment grande. Il faut que la vitesse d'application soit notablement supérieure à 15 m/s (50 ft/s) pour que ce phénomène se manifeste sensiblement. Il ne faut pas oublier que, même lorsqu'un aéronef heurte le sol à grande vitesse, en raison de l'élasticité de la cellule et des caractéristiques d'absorption des charges que présente le sol, de nombreuses pièces sont sollicitées à une vitesse beaucoup plus faible que la vitesse d'impact.

Critères de charge de calcul

9.6.9 Il n'est pas possible, dans le cadre du présent manuel, d'étudier en détail les critères de charge de calcul qui figurent dans les divers règlements des États. Il n'est pas non plus possible d'exposer ces critères pour le calcul de tous les aéronefs. Lorsqu'il se produit un accident où il soupçonne que l'intégrité structurale est en cause, l'enquêteur doit prendre connaissance des règlements et des critères de calcul appropriés.

9.7 DÉSINTÉGRATION EN VOL

Séquence des ruptures

9.7.1 Une dislocation en vol est généralement provoquée par la fatigue du métal, par une erreur de conception ou par des charges aérodynamiques excessives. Lorsqu'un élément ou un ensemble de la cellule cède en vol, il se produit généralement une réaction en chaîne et d'autres éléments ou d'autres ensembles cèdent à leur tour. Par exemple, lorsqu'un panneau d'aile cède et est arraché, il arrive souvent qu'il heurte des parties du fuselage ou de l'empennage et les arrache. L'arrachement du panneau d'aile est généralement appelé rupture initiale tandis que les ruptures du fuselage ou de l'empennage sont appelées ruptures consécutives. De plus, lorsque l'aéronef ou les éléments arrachés heurtent le sol, ils subissent en général des dommages graves causés par l'impact ; dans ce cas, le travail de l'enquêteur consiste alors à distinguer les dommages subis en vol des dommages causés par l'impact au sol. Il doit ensuite déterminer parmi les ruptures en vol celle qui constitue la rupture initiale, puis déterminer la cause exacte de la rupture initiale.

9.7.2 On trouvera dans d'autres sections du présent chapitre des éléments de base qui permettent à l'enquêteur de déterminer les faits dans le cas des accidents dus à une rupture structurale. L'enquêteur doit constamment coordonner les nouveaux indices au fur et à mesure que son enquête progresse. Si l'enquête est faite systématiquement et si l'examen détaillé est exhaustif, les types de rupture deviennent évidents. L'enquêteur peut alors déterminer l'ordre dans lequel les ruptures ont dû se succéder pour produire les dommages constatés. La séquence des ruptures pourra être ainsi établie au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Rupture initiale de l'aile

9.7.3 Lorsque l'aile cède en premier sous l'effet d'une surcharge statique dirigée vers le haut, l'aile qui se détache fléchit vers le haut et vers l'arrière sur le fuselage. En même temps, le déséquilibre de portance de l'autre aile entraîne une rapide accélération en roulis, le côté de l'aéronef sans aile pivotant vers le bas. Dans certains cas, le taux de roulis est assez rapide pour causer une rupture en torsion de l'empennage. L'aile détachée heurte souvent l'empennage et on peut trouver des marques d'impact et des traces correspondantes entre l'aile cassée et les bords d'attaque de l'empennage. L'impact avec l'empennage peut être assez violent pour causer des ruptures secondaires des structures de l'empennage (Figures III-9-16, III-9-17 et III-9-18).

Rupture initiale de l'empennage

9.7.4 Lorsque les forces aérodynamiques dépassent la résistance de l'empennage, celui-ci fléchit généralement vers le bas et se détache de l'aéronef. Les longerons de l'empennage horizontal présentent les caractéristiques d'une rupture en flexion. Le revêtement peut aussi présenter un flambage en diagonale si le bord d'attaque pivote durant l'arrachement. Une fois l'empennage détaché, l'aéronef pique rapidement entraînant souvent la rupture secondaire des ailes en raison de la surcharge vers le bas exercée sur les ailes ; les ailes peuvent quand même présenter les signes de charges positives excessives précédentes (Figures III-9-19 et III-9-20).

9.7.5 Dans les deux cas (aile d'abord ou empennage d'abord), avant que la rupture ne survienne, des charges excessives sont imposées à la cellule. Il est souvent possible de trouver les effets résiduels de ces surcharges, même après une rupture de surcharge secondaire dans la direction opposée. Dans le premier cas, par exemple, l'aile est d'abord exposée à des forces positives élevées jusqu'à ce que l'empennage cède, entraînant une rupture de surcharge négative de l'aile. Ces « inversions » de charge peuvent être incorrectement interprétées comme des vibrations aéroélastiques. L'enquêteur doit aussi examiner soigneusement la cause des « inversions » de charge présentées par d'autres éléments secondaires qui oscillent dans le flux d'air durant la séquence de rupture. Ces inversions de charges ne sont pas le résultat de vibrations aéroélastiques.

Assiette de l'aéronef immédiatement avant la rupture

9.7.6 Si l'enquêteur se conforme aux méthodes indiquées dans le présent chapitre, il devrait pouvoir déterminer, par exemple, que c'est le panneau d'aile gauche qui a cédé en vol. Il lui reste cependant à déterminer la raison pour laquelle ce panneau a cédé et si cette rupture était compatible avec l'assiette de l'aéronef au moment de la rupture. Cette compatibilité doit être établie pour écarter la possibilité d'une erreur de conception ou pour montrer que les charges imposées étaient excessives. Si l'accident a été observé par des témoins au sol ou en vol, il peut être facile d'établir la corrélation entre les dommages subis par la cellule et l'assiette de l'aéronef en vol. En l'absence de témoins, l'enquêteur doit comparer l'effort de rupture aux efforts connus pour diverses assiettes de vol, de façon à avoir une indication de la vitesse de l'aéronef et de la manœuvre en cours au moment de la rupture.

Rupture primaire et rupture secondaire

9.7.7 Lorsqu'on détermine l'ordre des ruptures, il est très utile de savoir bien distinguer une rupture primaire d'une rupture secondaire. Une rupture primaire est une rupture qui se produit lorsqu'une charge analogue à la charge de calcul est appliquée à la pièce qui cède tout en laissant les pièces voisines ou connexes intactes. Par exemple, une rupture primaire de l'un des longerons principaux de la voilure pourrait impliquer la rupture en compression de l'une des semelles du longeron et/ou le flambage de l'âme du longeron et/ou la rupture en traction de l'autre semelle du longeron. Une rupture secondaire est une rupture qui se produit à la suite de ruptures de pièces voisines. En général, les charges qui produisent ces ruptures sont d'un type différent de celui des charges de calcul. Par exemple, si l'on constate que les deux semelles d'un longeron ont cédé sous l'effet de contraintes en torsion ou en flexion, ces ruptures sont des ruptures secondaires. Pour déterminer si une rupture est de type primaire ou secondaire, il faut posséder une certaine connaissance des fonctions des divers éléments de la cellule d'un aéronef. En général, les ruptures primaires sont liées à la rupture initiale et aux ruptures consécutives en vol, tandis que les ruptures secondaires sont le plus souvent liées aux ruptures ou aux dommages résultant de l'impact au sol.

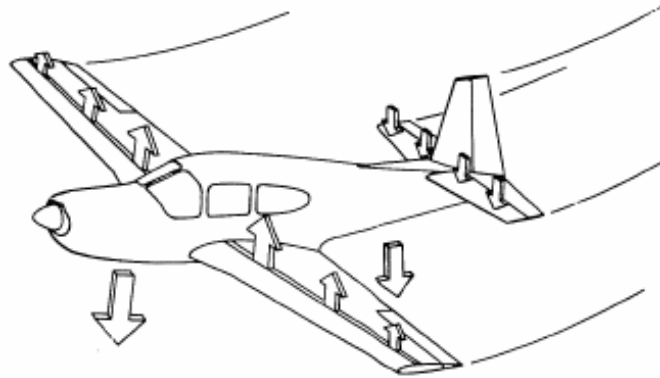


Figure III-9-16. Dans une manœuvre à grande vitesse, la voilure est soumise à un facteur de charge positif élevé et l'empennage à un facteur de charge négatif élevé.

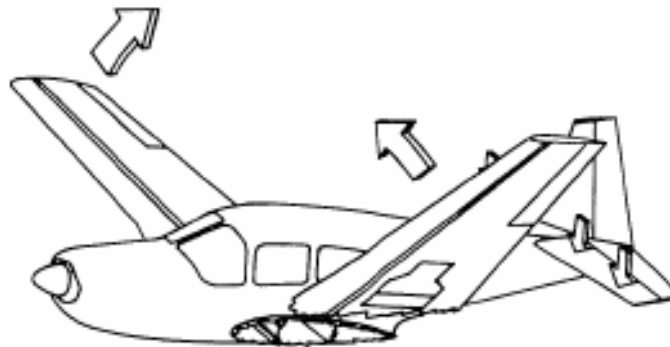


Figure III-9-17. Rupture d'une aile sous l'effet d'une charge excessive vers le haut, faisant pivoter brusquement l'avion.

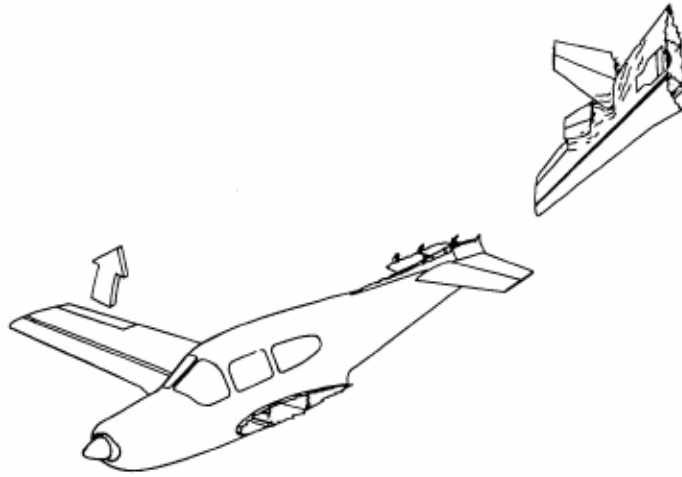


Figure III-9-18. L'aile qui se détache heurte souvent l'empennage, entraînant des ruptures et/ou des marques secondaires.

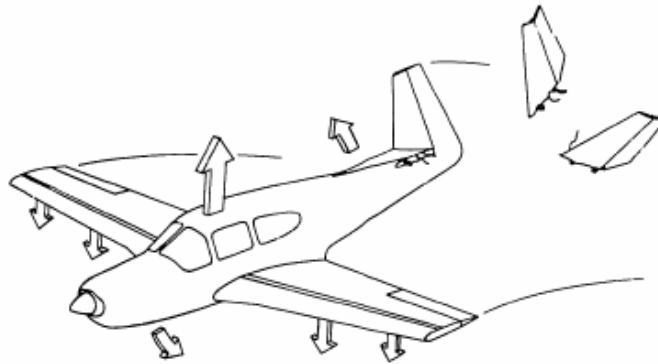


Figure III-9-19. La forte charge vers le bas imposée à l'empennage cause la rupture de l'empennage horizontal. La perte de la charge d'équilibre de l'empennage fait rapidement piquer l'avion et exerce une charge négative sur la voilure.

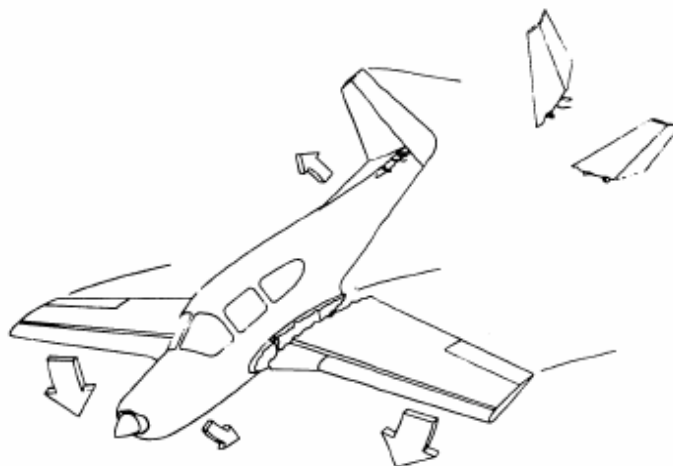


Figure III-9-20. La charge négative excessive exercée sur la voilure entraîne le fléchissement vers le bas et la rupture d'une aile (ou des deux ailes).

9.8 MATÉRIAUX COMPOSITES¹

9.8.1 Les composites² sont utilisés dans les aéronefs depuis des décennies. L'armée les utilise depuis plus de 40 ans et fait de plus en plus appel à ces matériaux. Le Windecker Eagle, le premier avion construit entièrement de matériaux composites certifié par la Federal Aviation Administration (FAA) des États-Unis, a obtenu son certificat de type en 1969. Les avions tout composite en kit de construction amateur sont disponibles depuis plus de 20 ans. Même un engin spatial tout composite, le SpaceShipOne, est allé dans l'espace à plusieurs reprises avec succès. Durant cette longue histoire, cependant, les composites n'ont été utilisés que de façon limitée dans les aéronefs commerciaux, principalement dans les gouvernes, les structures secondaires et les panneaux non structurels.

9.8.2 Les aéronefs commerciaux à turboréacteurs qui arrivent sur le marché dans ce nouveau millénaire rompent sensiblement avec cette tendance historique. Dans ces aéronefs, les composites sont utilisés pour les structures primaires et, dans certains cas, pour presque 100 % de la cellule. La cellule de l'Airbus A380, par exemple, mis en service commercial en 2007, contient environ 25 % de composites en poids et possède un caisson central de voilure tout composite. La cellule du Boeing 787, dont la mise en service est prévue pour 2008, contient environ 50 % de composites en poids et près de 100 % du revêtement, des sections complètes du fuselage avec des raidisseurs intégrés (Figure III-9-21) et les caissons de voilure sont construits en composites. Le Boeing 787 est équipé de turbosoufflantes GEnx dont les aubes et le carter de rétention sont faits de composites (Figure III-9-21) plutôt que des métaux classiques. Les cellules tout composite des aéronefs d'affaires et des avions à réaction très légers, comme l'Adam A700 (Figure III-9-21), et les avancées parallèles des aéronefs militaires, complètent cette transition dans le marché des gros aéronefs de transport. Environ 60 % de la structure du F-22 est en composites par rapport au 20 % du F/A-18C/D, entré en production à peine dix ans auparavant. La Figure III-9-22 montre l'emploi croissant de composites dans les aéronefs militaires et commerciaux.

1. Les auteurs de la présente section, Joseph Rakow (PhD, PE) et Alfred Pettinger (PhD, PE), de Exponent Failure Analysis Associates, sont des ingénieurs du service de génie mécanique et de métallurgie et matériaux de la société. On peut joindre M. Rakow au 650-688-7316 et à jrakow@exponent.com, et M. Pettinger, au 949-341-6004 et à apettinger@exponent.com.

2. Dans la présente section, « composite » désigne une catégorie de matériaux composés de fibres contenus dans une matrice.



Figure III-9-21. Exemples de structures composites (à partir du coin supérieur gauche) : fuselage du Boeing 787, aubes et carter du moteur GEnx de General Electric et l'Adam A700 VLJ.

9.8.3 Contrairement aux métaux, les composites sont constitués de plusieurs matériaux distincts, généralement de fibres longues, qui sont rigides et fortes (carbone ou verre), et d'une matrice qui est essentiellement une colle plastique durcie qui retient les fibres. Les fibres collées sont assemblées couche par couche (chaque couche s'appelle un « pli ») pour former un stratifié. Les fibres de chaque pli sont disposées parallèlement ou sont tissées comme un textile. L'orientation des fibres est dictée par les charges que devra supporter le stratifié et elle varie souvent d'un pli à l'autre dans un stratifié simple. Vu la nature de la construction des composites, et contrairement aux métaux, la réponse des composites aux charges varie généralement selon la direction dans laquelle est appliquée la charge. Les concepteurs comprennent et peuvent prévoir ces phénomènes, mais les enquêteurs doivent être capables de les reconnaître et de les reconstituer.

9.8.4 L'analyse des ruptures des structures composites ne peut pas seulement reposer sur les connaissances et l'expérience acquises dans les structures métalliques. Par exemple, la description physique d'une rupture d'un composite comprend des *termes* tels que : « arrachement des fibres », « délaminage » et « rupture de matrice interfaciale ». Aucun de ces termes n'existe dans la description des ruptures des structures métalliques.

9.8.5 Les composites possèdent des variables de conception qui n'existent pas dans les métaux, notamment l'orientation des fibres, le rapport entre le volume des fibres et celui de la matrice, l'épaisseur des plis et la séquence d'empilement des couches. Ces nouvelles variables représentent aussi de nouvelles possibilités d'erreurs ou de défauts de fabrication, notamment, l'ondulation des fibres, une faible adhésion entre les fibres et la matrice, une faible adhésion entre les plis, trop de vides dans la matrice et un mauvais durcissement de la matrice.

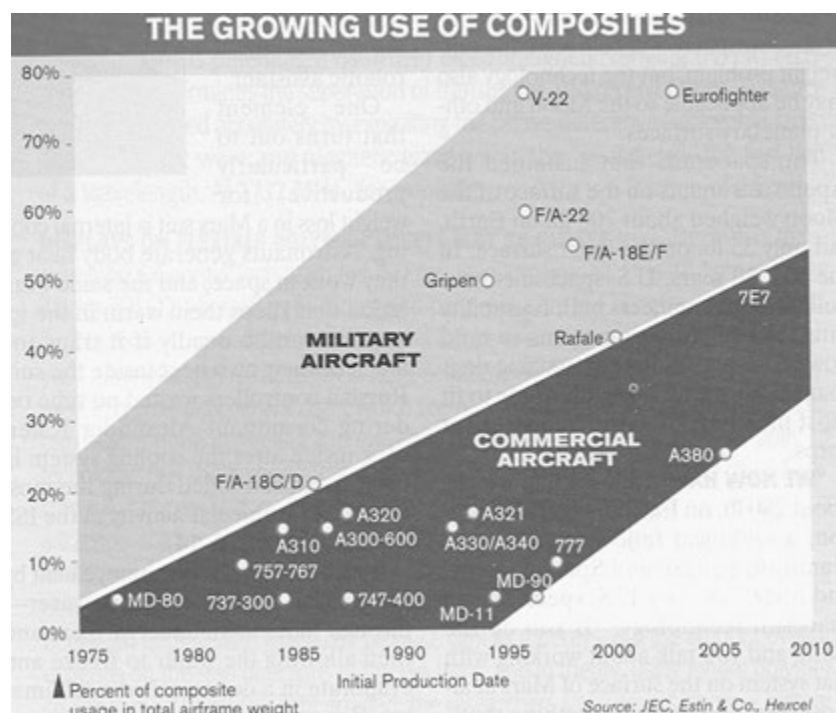


Figure III-9-22. L'utilisation croissante des composites dans les grands programmes d'aéronefs (en pourcentage du poids total de la cellule)

9.8.6 Des changements dans les variables et les défauts de conception des composites ont une incidence directe sur la rupture d'un composite. La Figure III-9-23, par exemple, montre dix éprouvettes en composite qui ont cédé sous une charge en traction³. Les dix éprouvettes sont réparties en deux groupes représentant deux orientations différentes des plis. Même si toutes les éprouvettes ont cédé sous la charge de traction, l'apparence physique des ruptures entre les groupes diffère considérablement. Dans les éprouvettes du premier groupe, la rupture a une apparence déchiquetée tandis que dans celles du second groupe, la rupture est plus compacte et présente une texture fibreuse. Cette différence vient de la différence d'orientation des fibres dans chaque groupe. Même à l'intérieur de chaque groupe, les ruptures ont des aspects différents qui résultent d'imperfections de fabrication entre les cinq éprouvettes de chaque groupe. Les variations d'orientation des fibres et les différentes imperfections donnent une apparence unique à chaque éprouvette même si la rupture est due dans tous les cas à la traction. C'est là un des défis de l'analyse de la rupture des composites. Dans de nombreux cas, il faut faire appel à l'analyse microscopique pour examiner les faciès de rupture et repérer les caractéristiques communes qui indiquent une rupture en traction.

9.8.7 Les métaux généralement employés dans les aéronefs sont ductiles, tandis que les composites généralement utilisés sont fragiles. La ductilité permet une flexion, une torsion et un bossellement permanents des structures, ce qui permet essentiellement de conserver des indices des événements de l'accident. Par exemple, le bossellement des bords d'attaque de l'aile de l'avion de la Figure III-9-24 montre non seulement que l'avion a heurté un obstacle, mais donne aussi une idée des dimensions, de la forme et de l'énergie associée à l'obstacle⁴. Ce type

3. Ginty, C.A. et C.C. Chamis, "Fracture Characteristics of Angleplied Laminates Fabricated from Overaged Graphite/Epoxy Prepreg," *Fractography of Modern Engineering Materials: Composites and Metals*, STP 948, ASTM, 1987, pp. 101-130.

4. Wanttaja, R., "Wire Strike!," <http://www.wanttaja.com/avlinks/wire.htm>, 1994.

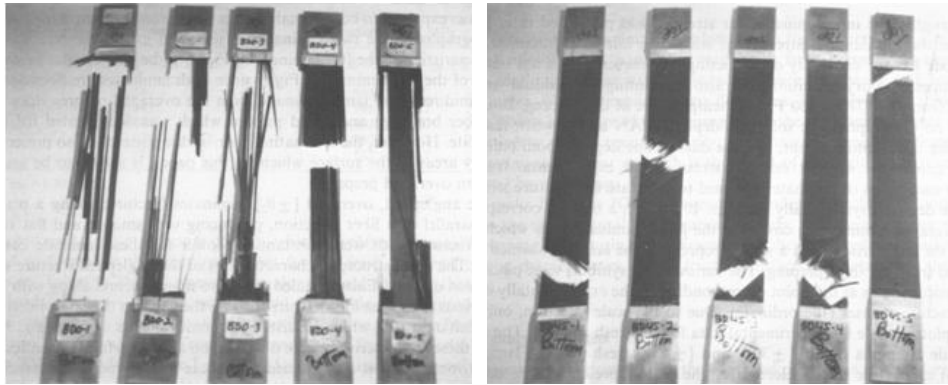


Figure III-9-23. Rupture en traction de composites : même une traction simple produit une variété de ruptures observables à l'échelle macroscopique. L'analyse microscopique est essentielle.



Figure III-9-24. La ductilité des structures de métal fournit des informations macroscopiques sur l'accident.

d'information aide les enquêteurs à déterminer la séquence des événements liés à l'accident. Selon le National Transportation Safety Board (NTSB), cet avion a heurté des lignes de haute tension à l'approche⁵. Un autre exemple d'indices fournis par la ductilité est la déformation produite par une explosion survenant à l'intérieur d'un fuselage métallique. Le bombement des panneaux du fuselage, le recourbement des bords de la rupture en direction opposée à celle de l'explosion et l'étirement et le détachement des panneaux le long des lignes de rivets sont autant d'indices d'une explosion dans un accident. L'évaluation de la nature précise de ces indices dépend fortement de la ductilité du métal, une propriété que ne possèdent pas les matériaux composites.

9.8.8 Dans les composites, comme dans les métaux, l'interprétation des faciès de rupture peut donner des renseignements utiles. Pour interpréter les faciès de rupture d'une structure métallique, les enquêteurs se fondent sur un ensemble de connaissances bien établies et largement utilisées qui, par le passé, a souvent permis d'obtenir rapidement des résultats instructifs. On peut citer comme exemple le crash du vol 101 de Chalks Ocean Airways en décembre 2005 au large de la côte de Miami (FL). Les premiers indices indiquaient que l'aile droite s'était détachée en vol. Quelques jours plus tard, le NTSB a identifié des dommages causés par la fatigue dans les composants métalliques de l'aile droite (Figure III-9-25) avec des dommages correspondants dans la structure de l'aile gauche⁶. Comme le montre la Figure III-9-25, un examen visuel de la semelle du longeron de l'aile permet de constater des lignes d'arrêt, qui sont une preuve largement acceptée d'une rupture de fatigue. Suite aux résultats de cette analyse, la semelle du longeron de l'aile est devenue quelques jours à peine après l'accident un des éléments cruciaux de l'enquête.

Stratifiés

9.8.9 Les stratifiés sont les structures composites de base le plus couramment utilisées dans les aéronefs. Ils sont construits de plis multiples de matériaux composites, chaque pli contenant des fibres longues contenues dans une matrice. Une des difficultés de l'analyse des stratifiés est que leur réponse dépend de la direction dans laquelle la charge est appliquée par rapport à l'orientation des fibres. La meilleure façon de le comprendre est d'examiner un seul pli. Un pli est généralement plus rigide et plus résistant dans la direction de ses fibres que dans les autres directions. Par exemple, si on considère que la direction de la charge est égale à 0 degré, on constate que la résistance du pli diminue considérablement⁷ à mesure que l'angle entre les fibres et la direction de la charge augmente par rapport à 0 (Figure III-9-26). La rigidité baisse de la même façon. Ce comportement est différent de celui d'une feuille d'aluminium, qui présente une rigidité et une résistance constantes quelle que soit la direction d'application de la charge⁸.

9.8.10 Le comportement structurel des composites devient plus complexe lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres et fusionnés pour former un stratifié. La Figure III-9-27 montre une coupe transversale d'un stratifié, qui illustre clairement les différences dans l'orientation des fibres à l'intérieur des plis⁹. Les fibres de la couche du milieu sont perpendiculaires au plan de la coupe transversale, comme on peut le voir par leurs sections circulaires. L'orientation des fibres des autres couches varie de 0 à 90° par rapport au plan de la coupe transversale, comme le montrent leurs formes rectangulaires¹⁰. Le comportement structurel d'un stratifié est dicté par l'orientation et la dépendance directionnelle de chaque pli¹¹. Le Tableau III-9-2 donne un exemple des propriétés physiques de quelques matériaux composites et matériaux métalliques.

9.8.11 Un revêtement stratifié peut présenter un couplage structurel qui n'est pas observé dans les matériaux classiques. Par exemple, certains stratifiés présentent un couple flexion-allongement ou flexion-torsion. Dans la flexion-allongement, un stratifié soumis à une charge de traction s'allonge et fléchit à la fois, même si aucune charge de flexion

5. National Transportation Safety Board, Probable Cause SEA95LA024, 1995.

6. National Transportation Safety Board (NTSB), Advisory 051222a, 2005.

7. Hoskin, B.C. et A.A. Baker, *Composite Materials for Aircraft Structures*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.

8. Divers processus de fabrication, comme le laminage, peuvent créer des variations directionnelles mineures en rigidité et en résistance.

9. Petrak, D.R., "Ceramic Matrices," *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, pp. 160-163.

10. La forme des coupes transversales des fibres peut être utilisée pour déterminer l'orientation nominale des fibres dans les plis.

11. En plus des plis unidirectionnels mentionnés dans ce paragraphe, les stratifiés possèdent souvent des plis bidirectionnels dans lesquels les fibres tissées se croisent à angles droits.



Figure III-9-25. Indications de fissures de fatigue dans la semelle du longeron inférieur droit de l'aile du Grumman Mallard G73 de Chalks Ocean Airways, qui s'est écrasé en décembre 2005. Cette photo est un exemple de l'application des connaissances et de l'expérience accumulées pour identifier les facteurs qui ont pu contribuer à l'accident.

ne lui a été appliquée. De même, dans le cas de la flexion-torsion, un stratifié soumis uniquement à une charge de flexion fléchit et se tord, même si aucune charge de torsion ne lui a été appliquée. Ce couplage ne disparaît que si le stratifié est symétrique, c'est-à-dire que l'orientation des fibres dans les couches au-dessus du plan géométrique central est exactement l'inverse de l'orientation des fibres dans les plis situés au-dessous du plan central. Un exemple de stratifié symétrique est un stratifié de quatre plis dans lequel chaque pli a la même épaisseur avec les orientations suivantes, de bas en haut : 90° , 0° , 0° et 90° . Un stratifié symétrique ne présente ni le couple flexion-allongement ni le couple flexion-torsion.

9.8.12 Les stratifiés non équilibrés présentent un couple différent appelé couple de cisaillement. Un stratifié équilibré est un stratifié où il n'y a qu'un pli orienté à $+\theta$ pour chaque pli orienté à $-\theta$. Un exemple d'un stratifié symétrique non équilibré est un stratifié qui présente, de bas en haut, les orientations suivantes : 45° , 22° , 22° et 45° . Un stratifié symétrique non équilibré soumis uniquement à une charge de traction ne présente pas seulement un allongement mais aussi un cisaillement dans le plan, même si aucune charge de cisaillement ne lui a été appliquée.

9.8.13 Comme il est indiqué plus haut, certains stratifiés ne présentent pas de dépendance directionnelle. Ce sont des stratifiés quasi-isotropes. Le terme « isotrope » décrit les matériaux qui n'ont aucune dépendance directionnelle. Les stratifiés quasi-isotropes sont isotropes dans le plan du stratifié, ce qui signifie que le comportement structurel du stratifié ne dépend pas de la direction dans laquelle est appliquée la charge pourvu qu'elle soit appliquée dans le plan du stratifié. Pour être quasi-isotrope, les plis du stratifié doivent être orientés à 0°, +45°, -45° et 90°, ou à 0°, +60° et -60°, avec un nombre égal de plis dans chaque direction. L'ordre d'empilement des plis n'a pas d'importance.

Tableau III-9-2. Propriétés représentatives de composites et d'alliages métalliques généralement utilisés dans les avions

Fibres de verre¹	
Rigidité en traction	72 GPa
Résistance en traction	4,6 GPa
Diamètre	12 µm
Fibres de carbone²	
Rigidité en traction	200 GPa
Résistance en traction	2,6 GPa
Diamètre	8 µm
Matrices époxydes avancées	
Rigidité en traction	3,5 GPa
Résistance en traction	60 GPa
Température maximale d'utilisation ³	90 – 250 °C
Stratifiés carbone/époxyde⁴	
Rigidité en traction (longitudinale)	130 GPa
Rigidité en traction (transversale)	7 GPa
Résistance en traction (longitudinale)	1,1 GPa
Résistance en traction (transversale)	0,02 GPa
Stratifiés verre/époxyde⁵	
Rigidité en traction (longitudinale)	40 GPa
Rigidité en traction (transversale)	8 GPa
Résistance en traction (longitudinale)	1,1 GPa
Résistance en traction (transversale)	0,03 GPa
Aluminium de qualité aéronautique⁶	
Rigidité en traction	69 GPa
Résistance en traction	310 MPa
Acier de qualité aéronautique⁷	
Rigidité en traction	205 GPa
Résistance en traction	700 MPa

Notes.— Les valeurs de ces propriétés ne sont que représentatives ; certaines d'entre elles ont des plages très grandes. Le document MIL-HNDBK-17-1F¹² et les documents de référence des fabricants donnent plus de renseignements et des informations plus précises sur les propriétés. La plupart des données sur les matériaux composites sont tirées de Hoskin et Baker⁷.

1. Verre de type S
2. Graphite de type II
3. Dépend fortement du traitement thermique durant le processus de durcissement

4. Unidirectionnels, fraction de volume 60 %
5. Unidirectionnels, fraction de volume 45 %
6. Aluminium 6061-T6
7. Acier 4130 ; la résistance dépend fortement du traitement thermique

12. MIL-HNDBK-17-1F, US Department of Defense, Washington (DC), 2002.

9.8.14 Comme les plis d'un stratifié sont fusionnés, la déformation d'un pli a une incidence sur la déformation des plis voisins ; la quantité de déformation des plis à l'interface doit être la même. Cependant, vu que les plis ne sont pas tous orientés dans la même direction, ils n'ont pas la même rigidité dans la direction d'application de la force et, par conséquent, la contrainte exercée dans le stratifié varie d'un pli à l'autre. Le pli ayant la rigidité la plus élevée dans la direction de la charge subira la contrainte la plus élevée. En plus de la contrainte, la résistance physique de chaque pli varie selon l'orientation des fibres par rapport à la direction de la charge⁷, comme le montre la Figure III-9-26. Ces variations de rigidité et de résistance dans les plis peuvent dicter l'origine de la rupture d'un stratifié. Il est important que les enquêteurs sur les accidents sachent déterminer l'incidence que la composition d'un stratifié aura sur sa rupture.

9.8.15 De nouveaux stratifiés sont constamment développés et représentent donc de nouveaux défis pour l'enquêteur. La présente section ne peut pas traiter toutes les ruptures possibles des composites. Les stratifiés fibre-métal (FML), par exemple, sont une catégorie de stratifiés relativement nouvelle. Les FML ressemblent aux stratifiés

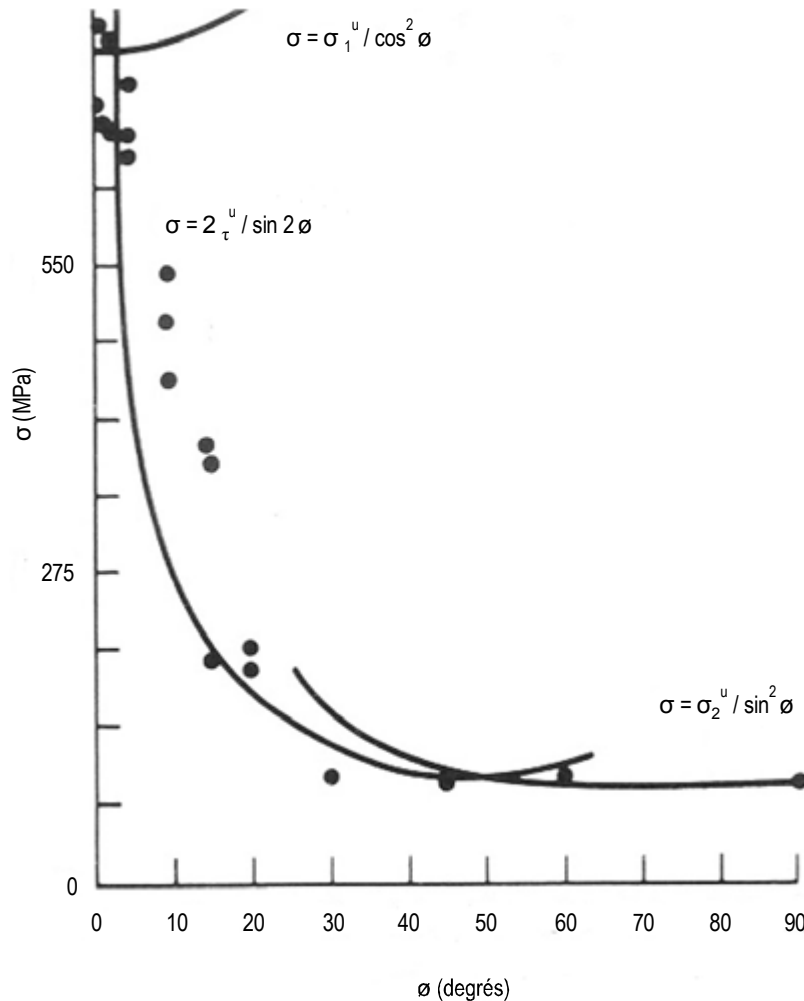


Figure III-9-26. Résistance d'un seul pli composite unidirectionnel, d'après l'angle entre les fibres et la direction de la charge : σ_1^u est la résistance maximale du stratifié mesurée dans la direction des fibres, σ_2^u est la résistance maximale du stratifié mesurée perpendiculairement à la direction des fibres et τ^u est la résistance maximale du stratifié au cisaillement.

mentionnés plus haut, mais ils contiennent des couches de métal, généralement l'aluminium, et des couches de composite. Un exemple de FML est le GLARE qui alterne des couches de composite verre-époxyde avec des couches d'aluminium. Le GLARE est utilisé dans des sections du fuselage de l'A380.

Caractéristiques de rupture

9.8.16 Les paragraphes qui suivent présentent les caractéristiques de rupture de stratifiés soumis à des charges de base : traction, compression, flexion, impact et fatigue. Vu que les stratifiés sont souvent des composants d'autres formes communes de structures composites, comme les structures en sandwich, les joints et les réparations, les caractéristiques de rupture décrites s'appliquent au reste de la présente section sur les composites.

9.8.17 *Traction.* La Figure III-9-23 montre comment même une traction simple peut produire diverses caractéristiques de rupture. Malgré tout, ces ruptures possèdent des caractéristiques communes qui aident à identifier les ruptures en traction des composites fibreux. Une de ces caractéristiques est que le faciès de rupture a généralement une surface rugueuse. La Figure III-9-28 par exemple montre une vue microscopique du faciès de rupture d'un composite qui a cédé sous une charge de traction ; ses fibres sont orientées dans la direction de la charge¹³. Une caractéristique évidente du faciès de rupture est que les fibres rompues ressortent de la matrice fracturée, contribuant à l'aspect rugueux du faciès de rupture. Cette caractéristique s'appelle arrachement des fibres et elle est typique d'une rupture en traction des composites. L'arrachement des fibres est le résultat d'une rupture des fibres et de leur extraction de la matrice. En examinant de plus près la Figure III-9-28 on voit, en plus des fibres arrachées, des trous qui ont été laissés par l'arrachement d'autres fibres. Dans certains cas de rupture en traction, certaines fibres ne se rompent pas mais la matrice cède et les fibres restent attachées à la matrice rompue ; ce phénomène s'appelle « pontage des fibres ».

9.8.18 Dans un cas comme dans l'autre, les fibres arrachées peuvent servir à identifier la charge de traction et lorsque les stratifiés sont empilés, à identifier les couches qui ont été sollicitées en traction. La longueur des fibres arrachées peut donner des indices sur les conditions fondamentales présentes dans le composite au moment de la rupture, telles que la température et l'exposition à l'humidité.

9.8.19 Les fibres longues et minces sont conçues pour supporter des charges de traction. Cependant, dans les composites dont l'orientation des fibres varie d'une couche à l'autre, les charges de traction ne sont pas parallèles aux fibres et la rupture peut se produire dans la matrice. Les ruptures courantes de matrice associées à ces conditions de chargement sont les ruptures en traction entre les fibres, particulièrement à l'interface fibre-matrice, et les ruptures en cisaillement de la région riche en matrice entre les plis, généralement associées à des rugosités sur le faciès de rupture appelées lancettes (*hackles*). Ces ruptures intercouches peuvent aussi se produire par compression.

9.8.20 *Compression.* Lorsqu'elles sont sollicitées en compression, les fibres sont moins efficaces qu'en traction vu que la matrice relativement faible doit stabiliser les fibres contre le flambage. Une caractéristique courante d'une rupture en compression des composites fibreux est la formation de bandes de plissement (*kink bands*)¹⁴ (Figure III-9-29). Ces bandes sont le résultat d'une instabilité structurale, un peu comme une personne qui se tient debout sur une boîte boisson et l'écrase. Les fibres se déforment à mesure que la charge compressive se rapproche du niveau critique, qui est fonction du matériau, de la géométrie et de facteurs environnementaux. La déformation des fibres peut être identifiée par l'examen des extrémités des fibres. Comme le montre la Figure III-9-30, les rainures indiquent que les fibres se sont déformées et ont fléchi jusqu'à se rompre¹⁵. Les rainures coïncident avec l'axe neutre de la fibre en flexion, séparant le côté traction de la fibre du côté compression de la fibre.

13. Friedrich, K. et J. Karger-Kocsis, "Fractography of Unfilled and Short Fiber Filled Semi-Crystalline Thermoplastics," *Fractography of Polymers and Composites*, A.C. Roulin-Moloney (ed), Elsevier Applied Sci. Publ., Londres, 1989, pp. 437-494.

14. Bolick, R.L., A.D. Kelkar et R. Mohan, "Performance Evaluation of Z-pinned Carbon Composites under Tension-Compression Fatigue Loading," *Aerospace Testing Expo*, 2006.

15. Stumpff, P.L., "Fractography," *ASM Handbook*, Volume 21: Composites, ASM International, 2001, pp. 977-987.

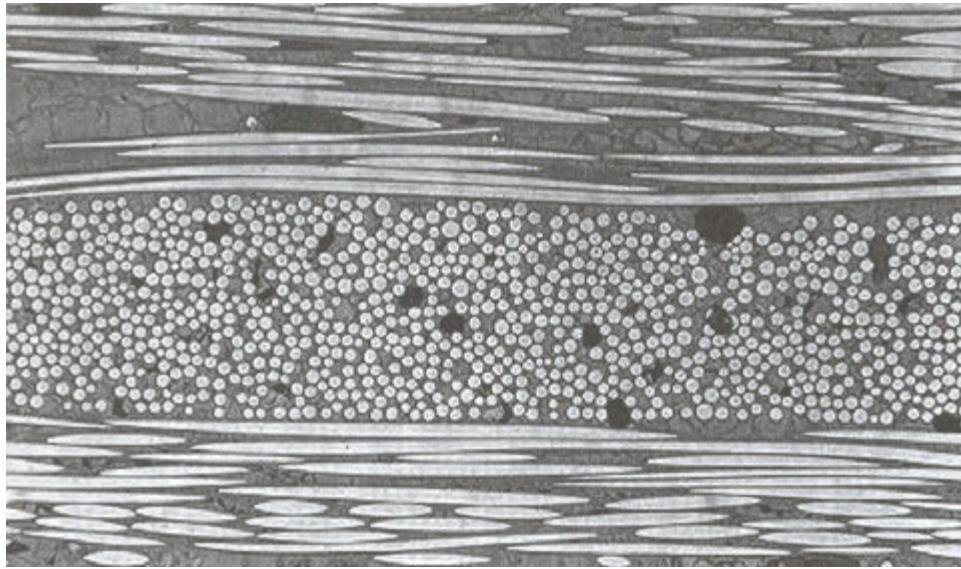


Figure III-9-27. Coupe transversale d'un stratifié montrant les différentes orientations des fibres dans les couches

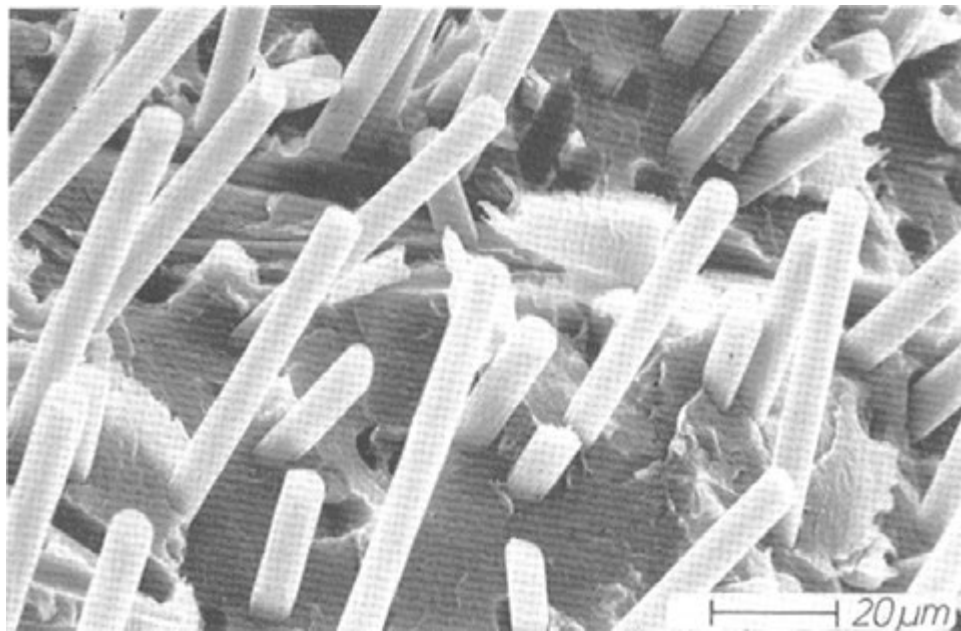


Figure III-9-28. Exemple d'arrachement de fibres dû à des charges de traction

9.8.21 Une caractéristique souvent associée aux bandes de plissement est la séparation de la matrice, qui apparaît dans la Figure III-9-29 sous forme de trous dans la matrice. La séparation se produit aux points faibles de la matrice ou dans les zones de forte concentration des contraintes telles que l'interface fibre-matrice et l'interface intercouche. La séparation de la matrice à l'interface intercouche s'appelle délaminage ; ce phénomène est traité plus loin, dans les paragraphes sur l'impact.

9.8.22 *Flexion.* La différence entre les faciès de rupture en traction et en compression est facile à voir dans les composites qui ont cédé sous la flexion¹⁶ (Figure III-9-31). Divisée par un axe neutre, une partie du faciès de rupture contient des fibres arrachées et l'autre partie est relativement plane. Cette différence vient du fait qu'au moment de la flexion, une partie de la coupe transversale est en traction tandis que l'autre est en compression. Ces caractéristiques sont facilement observables à l'échelle macroscopique. La Figure III-9-32 montre une aile en matériau composite qui se serait rompue en flexion¹⁷. La partie inférieure de l'aile, qui était soumise à la traction en fléchissant, a une texture très fibreuse par rapport à la partie supérieure, qui était soumise à une compression.

9.8.23 *Impact.* Comme il est indiqué plus haut, les composites aéronautiques sont généralement fragiles plutôt que ductiles. Les structures métalliques ductiles sont soumises à des niveaux relativement élevés de déformation permanente avant la rupture finale et cette déformation donne des informations sur les charges qui ont conduit à la rupture structurelle. Comme elles sont fragiles, les structures composites ne présentent que peu ou pas de déformation avant la rupture. Les surfaces métalliques de l'avion de la Figure III-9-24 indiquent clairement qu'elles ont heurté un objet extérieur. Les marques de l'impact ne sont pas aussi évidentes dans une structure composite.

9.8.24 Les charges d'impact peuvent endommager un composite sans produire de signes visibles sur la surface externe du composite. Prenons l'exemple d'un mécanicien qui échappe un outil sur l'extrados d'une aile. Si l'aile est en aluminium, l'impact de l'outil laissera une marque qui témoigne essentiellement de l'impact. L'importance du dommage causé peut généralement être évaluée visuellement. Si le revêtement de l'aile est un stratifié composite, l'impact de l'outil peut ne pas produire de dommage visible sur la surface, mais peut causer un délaminage subsuperficiel qui ne peut pas être détecté par une inspection visuelle. Un délaminage est une séparation des plis d'un composite et un type courant de dommage subsuperficiel. La séparation peut se propager le long de l'interface où a été effectuée la jonction avec les plis voisins durant le procédé de fabrication ou elle peut se propager le long de l'interface fibre-matrice. La Figure III-9-33 montre deux coupes transversales d'une plaque composite après un impact¹⁸. On peut voir que l'impact a causé un fort délaminage dans plusieurs plis. Ces dommages peuvent sérieusement dégrader la résistance aux contraintes du composite même si les fibres demeurent intactes. En outre, s'il n'est pas détecté, le dommage peut continuer à se propager, augmentant ainsi la charge sur le composite.

9.8.25 Comme ils ne laissent pas de marques visibles sur la surface, les délaminages doivent être détectés en effectuant une coupe transversale du composite à l'endroit où s'est produit le délaminage ou en utilisant des techniques non destructives comme l'imagerie ultrasonique, la radiographie ou la thermographie. Lorsque des techniques destructives sont employées, les délaminages peuvent être repérés visuellement dans la subsurface par leur apparence mate et blanchâtre contrairement aux zones voisines non délaminées qui sont brillantes et noires.

9.8.26 *Fatigue.* Une des qualités les plus intéressantes des composites est qu'ils ont en général une meilleure résistance à la fatigue que le même poids structurel des métaux couramment employés dans les aéronefs, comme l'aluminium. Malgré tout, les composites peuvent céder sous une charge de fatigue et ces ruptures présentent des caractéristiques particulières.

16. Beaumont, P.W.R. et J.M. Schultz, *Failure Analysis of Composite Materials*, Delaware Composites Design Encyclopedia, Vol. 4, 1990.

17. Stumpff, P.L., "Visual Analysis, Nondestructive Testing, and Destructive Testing," *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, pp. 958-963.

18. Bascom, W.D. et S.Y. Gweon, "Fractography and Failure Mechanisms of Carbon Fiber-Reinforced Composite Materials," *Fractography and Failure Mechanisms of Polymers and Composites*, Elsevier, 1989.

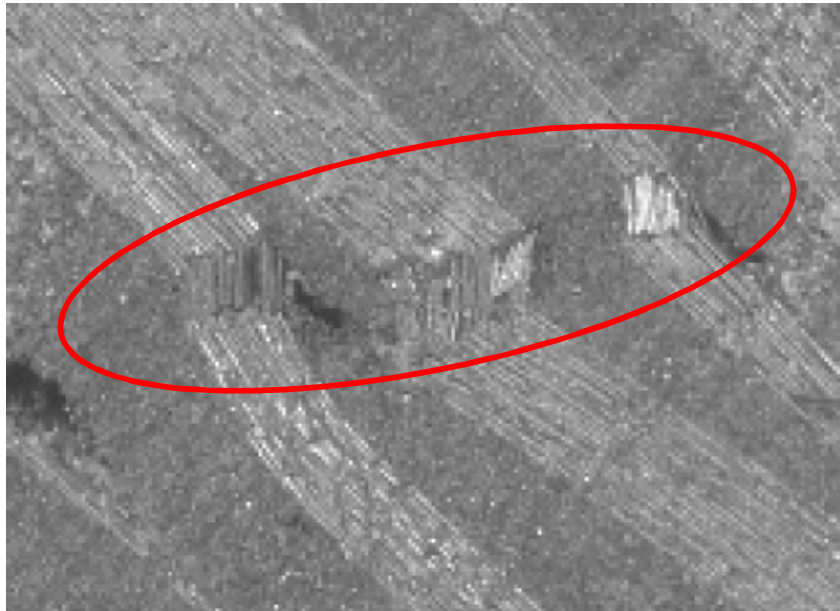


Figure III-9-29. Exemple de plissement résultant de charges compressives

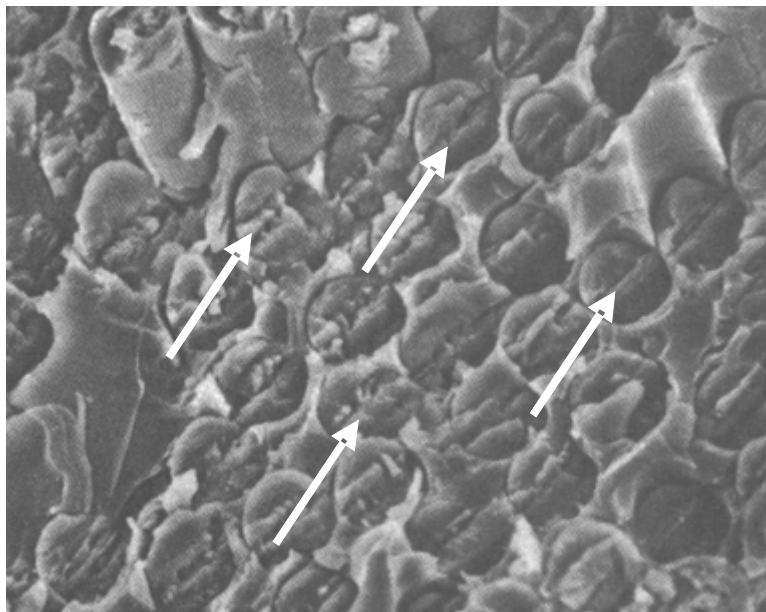


Figure III-9-30. Des rainures peuvent se produire sur les extrémités des fibres qui se sont déformées et qui ont cédé sous des charges compressives.

9.8.27 Les ruptures de fatigue dans les métaux peuvent parfois être identifiées à l'œil nu¹⁹. Dans les métaux, les faciès de ruptures de fatigue présentent des lignes incurvées, comme le montre la Figure III-9-25, mais aucune ligne incurvée n'est visible dans les faciès de rupture des composites ; en fait les ruptures de fatigue des composites ont souvent la même apparence que celles d'une rupture par surcharge.

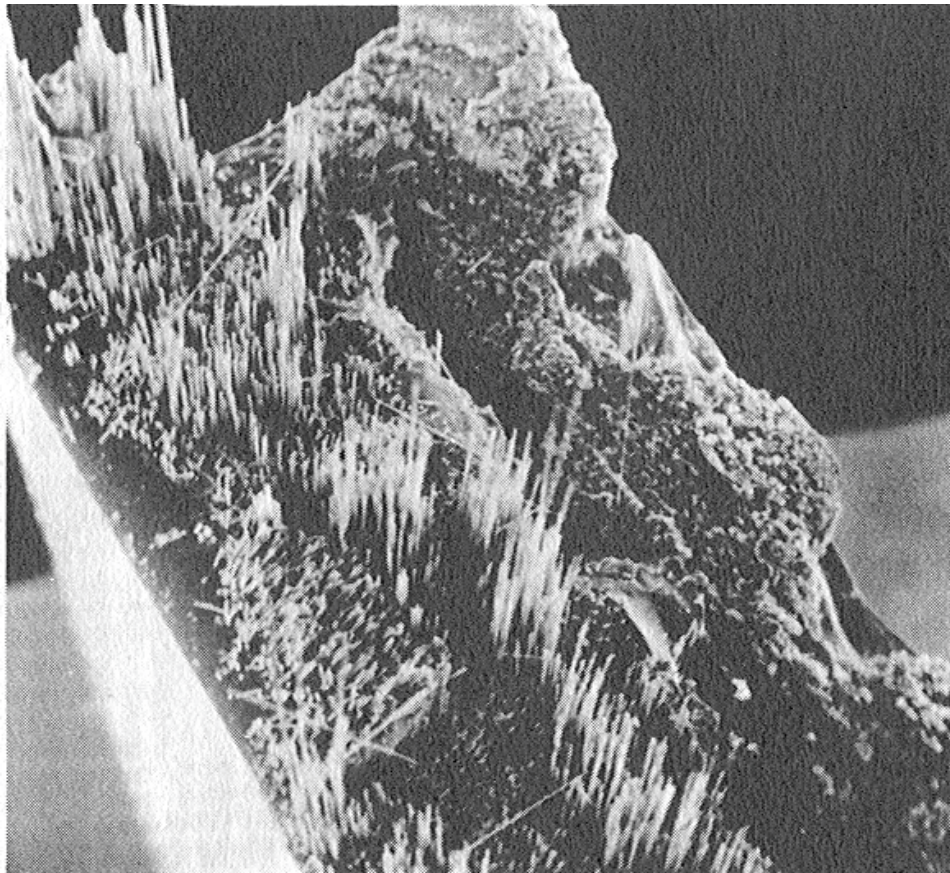


Figure III-9-31. Rupture en flexion d'une éprouvette composite. La différence entre la surface relativement rugueuse de la rupture en traction et la surface relativement lisse de la rupture en compression est clairement visible.

19. Il est prudent d'effectuer un examen visuel détaillé du faciès de rupture à un plus fort grossissement à l'aide de différents moyens pour confirmer la conclusion initiale.



Figure III-9-32. Aile en matériau composite qui se serait rompue en flexion. La différence entre la surface relativement rugueuse de la rupture en traction et la surface relativement lisse de la rupture en compression est clairement visible.

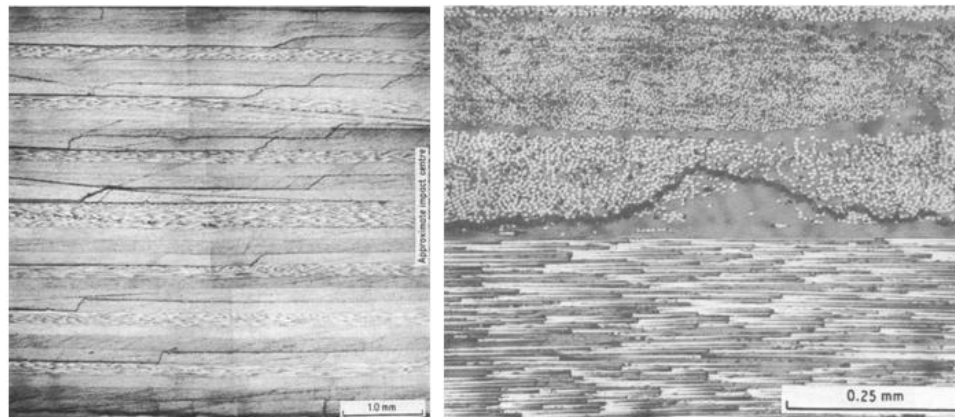


Figure III-9-33. Exemple de rupture d'un composite par délaminage

9.8.28 Les ruptures de fatigue des stratifiés composites portent peu de marques macroscopiques, mais certains indices peuvent quand même être observés à l'œil nu. La Figure III-9-34 montre une striation observée à l'interface fibre-matrice d'un composite. Une strie correspond généralement à un cycle de charge¹⁵. Même si ces stries indiquent une rupture de fatigue, les zones qui contiennent les stries sont généralement petites, peu nombreuses et peuvent se trouver en différents endroits du composite. En outre, les stries ne peuvent souvent être vues qu'avec un fort grossissement et sous un éclairage oblique (la photo de la Figure III-9-34 a été prise avec un grossissement de 2000x)¹⁵. En résumé, les ruptures de fatigue des composites peuvent être très difficiles à identifier et les indices de fatigue ne peuvent pas en général être décelés sur le terrain²⁰.

Vol 587 d'American Airlines

9.8.29 Le crash du vol 587 d'American Airlines en novembre 2001 permet d'illustrer les principes énoncés plus haut. L'empennage vertical de l'A300-600 accidenté est le plus gros élément structurel principal en matériau composite à avoir cédé en service.

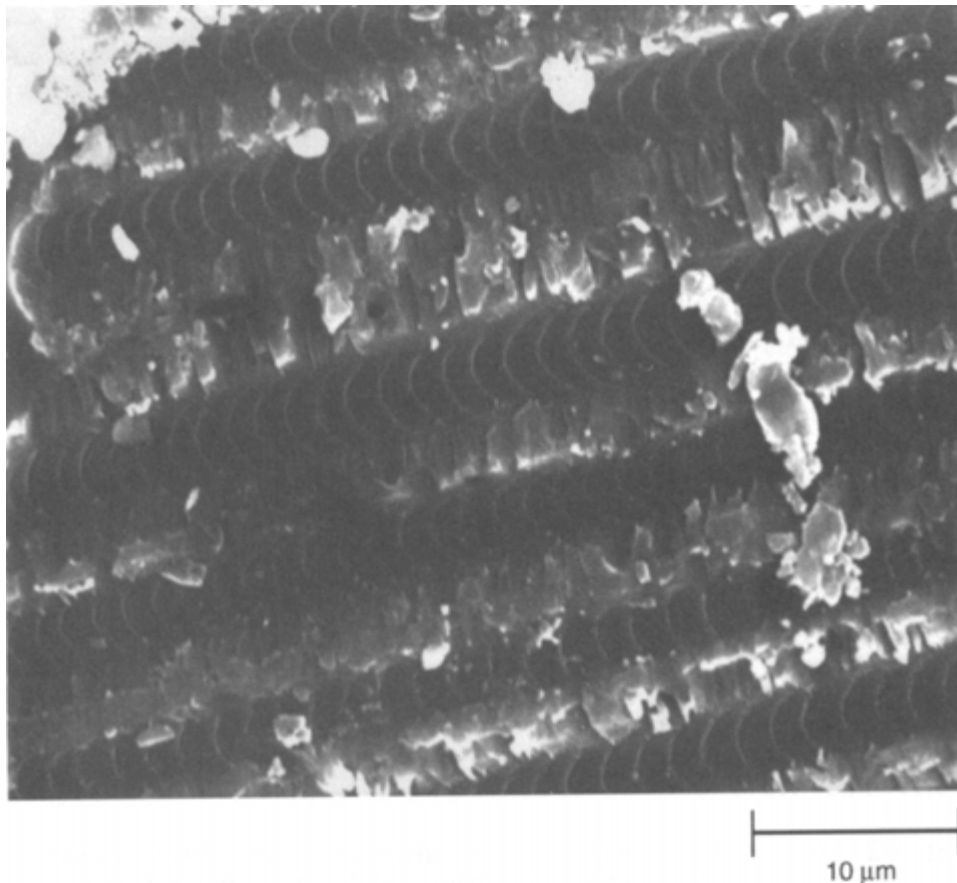


Figure III-9-34. Stries à l'interface fibres-matrice

20. Un élément macroscopique qui peut fournir des indices de fatigue est le frottement entre les deux faciès de rupture correspondants. Avec l'application d'une charge répétée, les surfaces de rupture peuvent frotter l'une contre l'autre à mesure qu'elles se développent et laisser des marques de frottement sur les extrémités des fibres rompues et dans la matrice.

9.8.30 La conception des empennages verticaux des avions de la série Airbus A300 et A310 prévoyait d'abord l'utilisation de matériaux métalliques, mais ceux-ci ont été remplacés au milieu des années 1980 par un matériau composite fait de fibres de carbone dans une matrice époxyde. Entre le moment où ils ont été conçus et la rupture de l'empennage de l'avion du vol 587, les empennages verticaux en matériaux composites ont été utilisés en service pendant plus de 20 ans.

9.8.31 Comme l'empennage vertical de l'A300-600 a été conçu pour remplacer des empennages métalliques, il a été fixé au fuselage avec la même méthode que celle qui était employée pour les structures métalliques. Trois paires de fixations (avant, centre et arrière) en composite le long du joint entre l'empennage et le fuselage transfèrent les charges de flexion et les charges verticales à travers des boulons de grand diamètre. Il y a, entre chaque paire de fixations, un raccord de charge transversale en composite qui transfère les charges latérales et de torsion du stabilisateur au fuselage.

9.8.32 L'analyse des données de l'enregistreur des données de vol faite par le NTSB indiquait que l'avion avait été soumis à un mouvement oscillatoire de glissade croissant qui a fini par créer des charges excédant la charge de calcul ultime de l'empennage. Le NTSB a déterminé que la fixation arrière droite de l'empennage avait cédé sous une surcharge de traction causant une rupture progressive des autres points de fixation²¹.

9.8.33 Comme il est indiqué plus haut, les ruptures en traction des composites produisent généralement des faciès de rupture rugueux. La Figure III-9-35 montre le faciès de rupture de la fixation arrière droite²². L'aspect rugueux de cette rupture a aidé le NTSB à déterminer que la fixation s'était cassée sous des charges de traction. Des ruptures similaires ont été trouvées sur les deux autres fixations de l'empennage. Le NTSB a donc conclu que la rupture des fixations du côté droit de l'empennage était due à une surcontrainte sous une charge de traction.

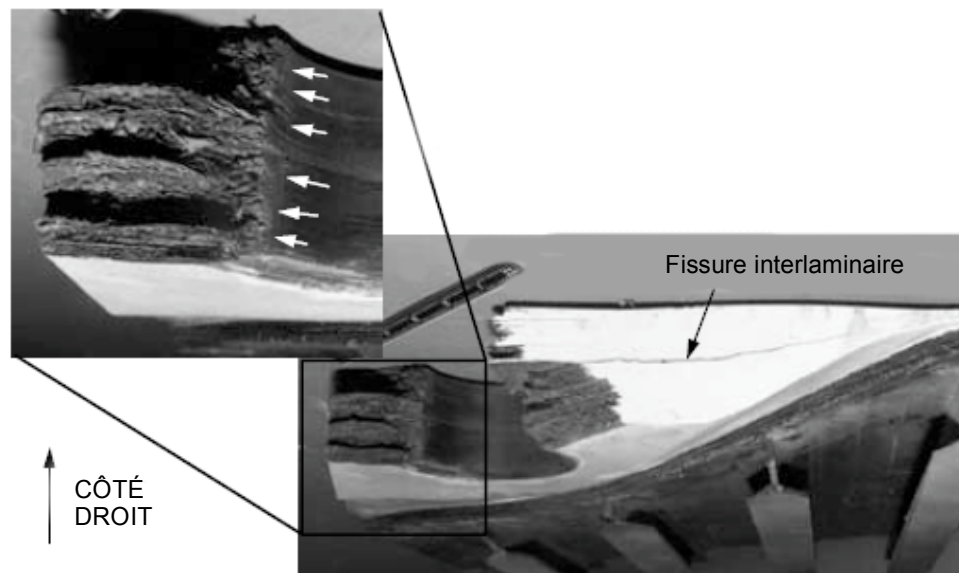


Figure III-9-35. Comme plusieurs autres ruptures, celles de la fixation arrière droite étaient rugueuses, conformes à une charge en traction.

21. National Transportation Safety Board, "In-Flight Separation of Vertical Stabilizer" AAR-04/04, 2004.

22. National Transportation Safety Board, "Materials Laboratory Factual Reports 02-077 and 02-083," 2002.

9.8.34 Selon l'analyse du NTSB, après la rupture des fixations du côté droit, l'empennage endommagé a dévié de droite à gauche, soumettant les fixations du côté gauche de l'empennage à une charge en flexion. Sous la sollicitation en flexion, il s'est créé une traction sur le côté intérieur et une compression sur le côté extérieur des fixations. Le NTSB a trouvé des indices conformes à une rupture en traction sur le côté intérieur et à une rupture en compression sur le côté extérieur des fixations du côté gauche de l'empennage. Ces caractéristiques sont conformes à une rupture en flexion, comme il est expliqué plus haut. La Figure III-9-36 montre un exemple des indices correspondant à une rupture en compression, soit les rainures trouvées sur la fixation arrière gauche²². Comme il est indiqué plus haut, lorsque les fibres sont soumises à des charges compressives, elles peuvent flamber et le faciès de rupture à l'extrémité d'une fibre cassée peut présenter des rainures. Les fixations arrière gauche, centre gauche et avant gauche de l'empennage contenaient toutes des fibres rompues et des rainures. La fixation arrière gauche présentait aussi les lancettes associées à une rupture en cisaillement de la région riche en matrice entre les plis (Figure III-9-37) comme il est expliqué plus haut²². Des lancettes ont aussi été trouvées sur la fixation avant gauche.

9.8.35 Des indices conformes à la flexion ont aussi été trouvés sur le raccord transversal arrière. Les ruptures sur les points de fixation du côté droit du raccord transversal avaient une apparence rugueuse, indiquant une rupture en traction, tandis que la rupture du point de fixation à l'extrême gauche avait une apparence relativement lisse, indiquant une rupture en compression. Le NTSB estimait que ces indices étaient conformes à une flexion de l'empennage de droite à gauche. Il faut enfin noter que le NTSB n'a trouvé aucun signe de dommage par fatigue sur l'empennage vertical.

Structures sandwich

9.8.36 Une structure sandwich est généralement composée de deux stratifiés relativement minces, appelés peaux (ou semelles), collés de part et d'autre d'une âme (ou cœur) épaisse et légère. Les peaux et l'âme peuvent être faites de composite métallique, de bois ou de papier. Une des utilisations courantes des structures sandwich dans les avions sont les gouvernes, où il est extrêmement souhaitable d'avoir une grande rigidité et un poids faible. La Figure III-9-38 montre une poutre avec des peaux en fibre de carbone collées sur une âme en nid d'abeilles et la Figure III-9-39, un grossissement d'une coupe transversale de cette poutre.

9.8.37 Les structures sandwich ont pour but de fournir une structure légère qui présente une forte rigidité et résistance en flexion. Lorsqu'une poutre homogène (un seul matériau) est pliée, les plus fortes contraintes de flexion le long de l'axe de la poutre se situent à la partie supérieure et à la partie inférieure de la section transversale, en supposant un comportement identique en traction et en compression. Elles sont nominalement de zéro au centre de la section transversale. Inversement, les contraintes de cisaillement dans la poutre sont plus élevées dans la section transversale centrale et de zéro en haut et en bas. Les panneaux en flexion sont soumis à des conditions de contraintes analogues.

9.8.38 Les structures sandwich sont conçues pour gérer ces contraintes de manière plus efficace qu'une structure faite d'un seul matériau. Les peaux d'un sandwich sont constituées de matériaux qui sont rigides et résistants le long de l'axe de la poutre pour supporter les grandes contraintes axiales en haut et en bas, tandis que l'âme est constituée d'un matériau suffisamment résistant en cisaillement pour supporter les contraintes de cisaillement au milieu de la poutre.

9.8.39 Les peaux des structures sandwich des avions sont généralement constituées de stratifiés de fibre de carbone ou de verre, selon les conditions d'exploitation prévues. Les deux matériaux le plus couramment utilisés pour l'âme sont la mousse de plastique et le nid d'abeilles. Le nid d'abeilles peut être fait de plastique, de papier ou de métal. Dans la plupart des constructions, les peaux sont collées à l'âme à l'aide d'un adhésif structural.

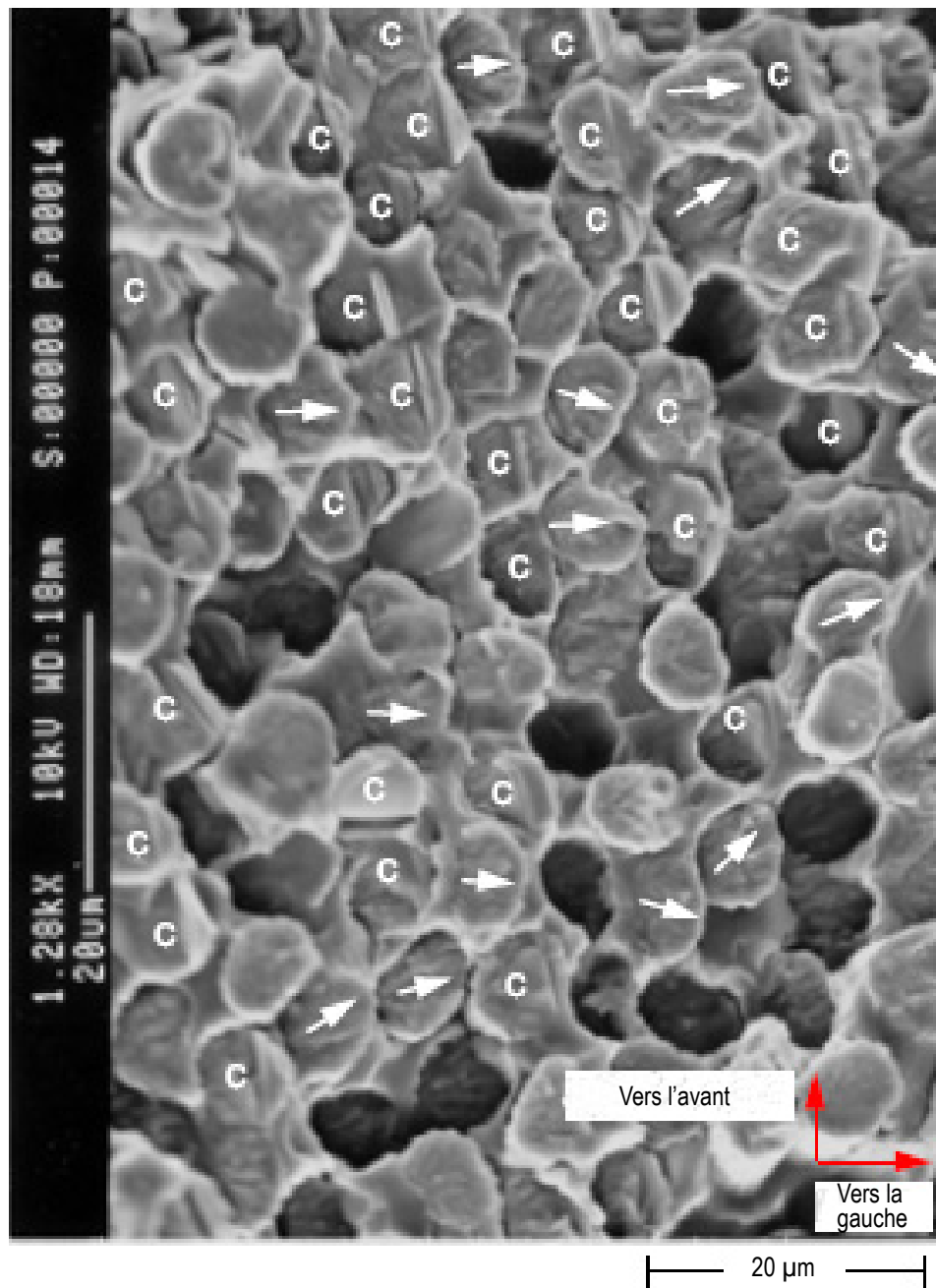


Figure III-9-36. Les extrémités des fibres cassées des ruptures à plusieurs endroits présentaient des rainures (marquées par la lettre « c »), ce qui est conforme à une charge compressive et au flambage des fibres.

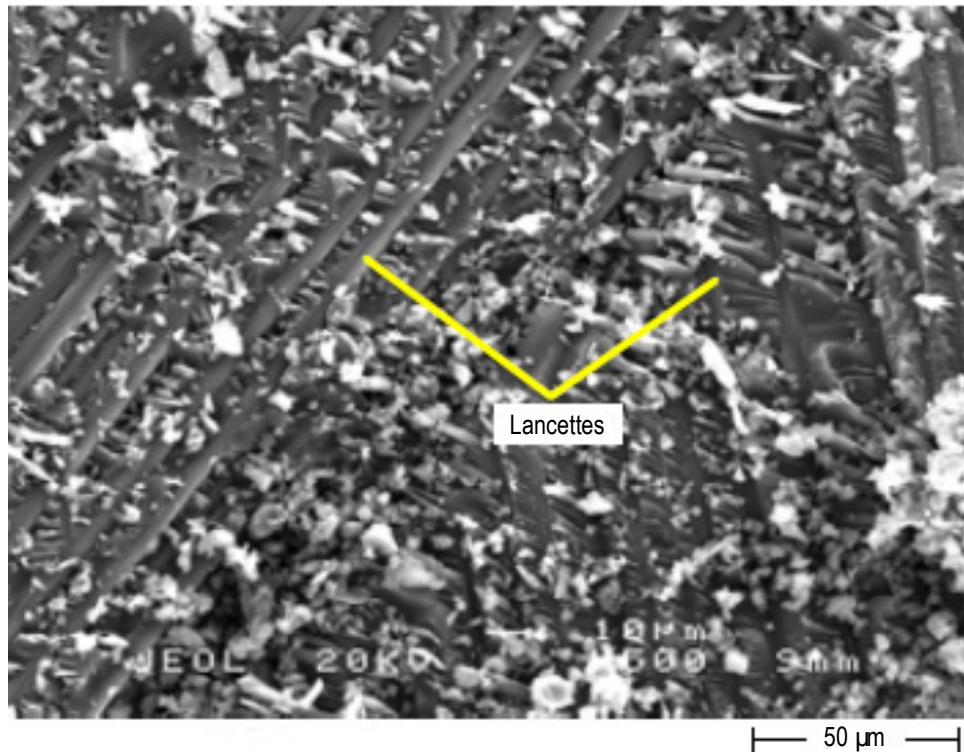


Figure III-9-37. Ruptures interlaminaires à plusieurs endroits présentant des lancettes (hackles), ce qui est conforme à une rupture en cisaillement.

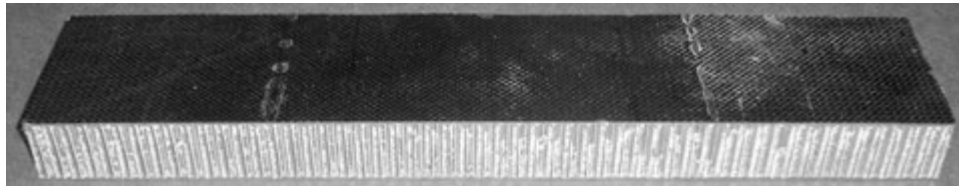


Figure III-9-38. Structure sandwich avec des peaux en fibre de carbone et une âme en nid d'abeilles

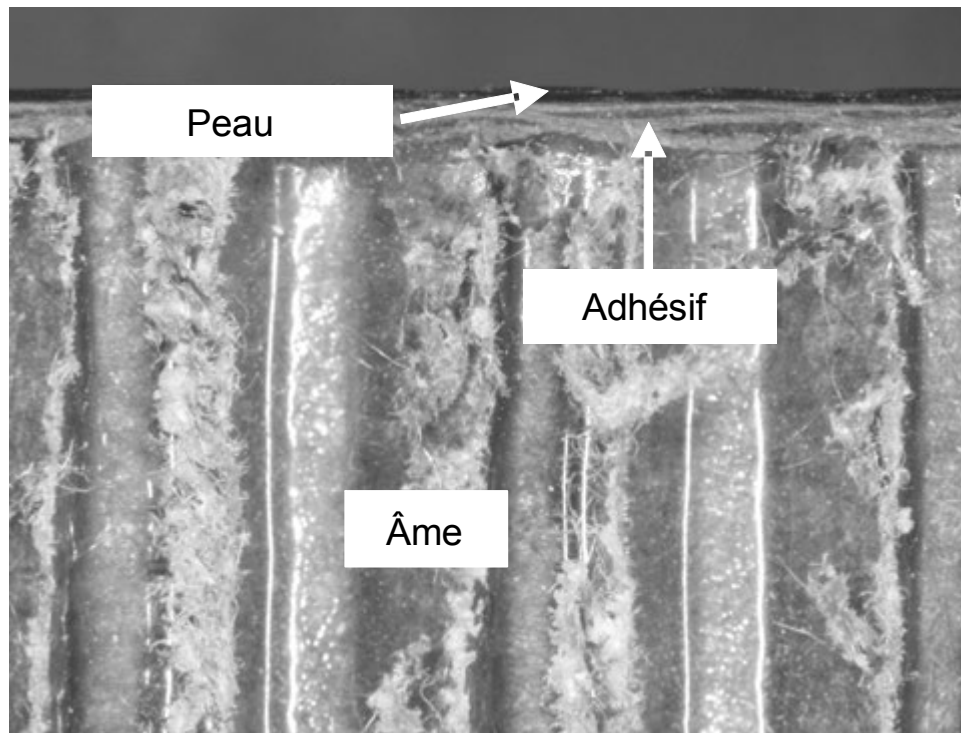


Figure III-9-39. Vue en coupe de la poutre sandwich de la Figure III-9-38

9.8.40 Comme pour les autres éléments structuraux, les structures sandwich doivent généralement être fixées à des éléments voisins de la cellule de sorte qu'ils transmettent des charges structurales. Les fixations peuvent parfois pénétrer l'âme de la structure. Dans de nombreux cas, cependant, les peaux sont jointes comme le montre la Figure III-9-40 de manière à former un stratifié épais convenant aux fixations mécaniques ou adhésives²³.

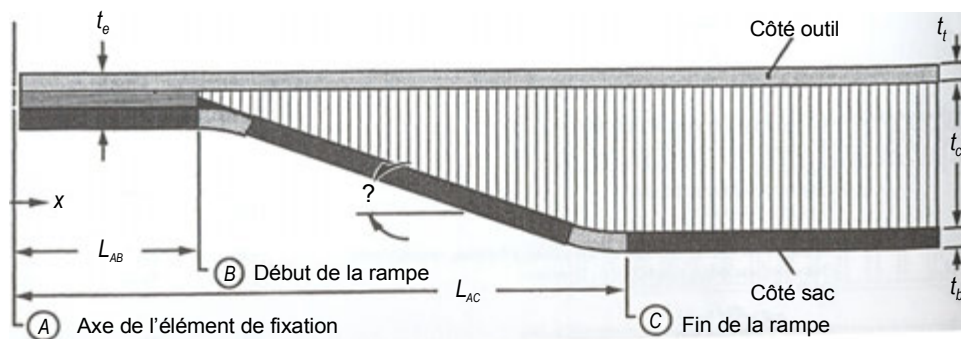


Figure III-9-40. Structure sandwich avec jonction des peaux pour en permettre la fixation

23. Ward, S.W. et L. Gintert, "Analysis of Sandwich Structures," *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, pp. 308-320.

Caractéristiques de rupture

9.8.41 Les ruptures des structures sandwich comprennent la rupture des peaux, la rupture de l'âme, la rupture de la liaison adhésive ou une combinaison des trois. Les caractéristiques de rupture indiquées plus haut dans la section sur les stratifiés peuvent aider l'enquêteur à analyser un grand nombre de ruptures des structures sandwich. Les paragraphes décrivent les caractéristiques fondamentales des ruptures des structures sandwich.

9.8.42 *Traction.* Les structures sandwich étant généralement employées à des endroits soumis à des charges de flexion, les ruptures en traction de ces structures se produisent généralement dans le cadre des charges plus complexes associées à la flexion. Si une structure sandwich est soumise à une traction dans le plan, les deux peaux sont en traction, plutôt qu'une peau en traction et l'autre en compression comme dans le cas de la flexion. Lorsqu'une structure sandwich cède dans ces conditions, les deux peaux devraient présenter les caractéristiques de la rupture en traction des stratifiés exposés plus haut : une surface rugueuse, l'arrachement des fibres et le pontage des fibres.

9.8.43 *Compression.* Les structures sandwich sont aussi utilisées dans les éléments soumis à des charges de compression vu que, pour un poids donné, leur forte rigidité leur procure une grande résistance au flambage. Un exemple courant de flambage est celui d'une personne qui se tient debout sur une boîte boisson. La boîte s'écrase immédiatement ou finit par s'écraser (flambage). Lorsque la boîte cède, les parois fléchissent. La rigidité en flexion des parois a une incidence directe sur la résistance de la boîte. Un renforcement, tel qu'une âme en nid d'abeilles, peut stabiliser les parois et augmenter considérablement la résistance de la boîte au flambage.

9.8.44 Le flambage global est un mode de rupture de base des structures sandwich. La Figure III-9-41 montre un exemple de flambage global, dans lequel la structure sandwich fléchit latéralement sous des charges compressives, ainsi que d'autres exemples de ruptures en compression²⁴ des structures sandwich. Cette flexion exerce une traction sur une peau et une compression sur l'autre. Une rupture dans ces conditions, comme il est indiqué plus haut, peut produire les caractéristiques d'une rupture en traction du stratifié sur une peau et les caractéristiques de compression du stratifié sur l'autre peau.

9.8.45 Le flambage de chaque peau est une autre caractéristique de rupture en compression des sandwichs²⁴. Ce flambage peut se concrétiser de plusieurs manières, qui sont illustrées à la Figure III-9-41.

- A. Les peaux peuvent se détacher localement et fléchir en s'éloignant de l'âme. Le flambage de la peau dépend de sa résistance ainsi que de celle de l'adhésif.
- B. Le pli de cisaillement (Figure III-9-41), semble être une forme de flambage local, mais il dépend en fait des propriétés globales du sandwich. Le pli de cisaillement ressemble aux bandes de plissement qui se forment par flambage des fibres dans les stratifiés, comme il est expliqué plus haut. Dans le pli de cisaillement, l'âme cède par cisaillement et les peaux cèdent sous l'effet d'une flexion locale.
- C. Les peaux peuvent présenter un flambage localisé sous forme de fossettes. La rupture dépend notamment du matériau utilisé pour l'âme.
- D. Plutôt que de se détacher vers l'extérieur, une des peaux peut fléchir vers l'intérieur et comprimer l'âme²⁵ (Figure III-9-42).

24. Bruhn, E.F., *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, Jacobs Publishing, 1973.

25. Wade, M.A., "Experimental Evaluation of Interactive Buckle Localization in Compression Sandwich Panels," *J. Sandwich Structures and Materials*, 1, pp. 230-254, juillet 1999.

9.8.46 *Flexion.* Les ruptures en flexion des structures sandwich deviennent plus évidentes lorsqu'on comprend que la flexion produit une traction sur une peau et une compression sur l'autre. Par conséquent, la rupture de la peau sollicitée en traction produit généralement les caractéristiques associées à la rupture en traction d'un stratifié (faciès de rupture rugueux, arrachement des fibres, pontage des fibres, etc.), et la peau sollicitée en compression présente généralement les caractéristiques associées à la rupture par compression d'un stratifié (flambage des fibres, rainures, etc.). La peau en compression peut aussi présenter les caractéristiques de rupture associées au flambage de peau²⁶ indiquées plus haut et illustrées à la Figure III-9-43.

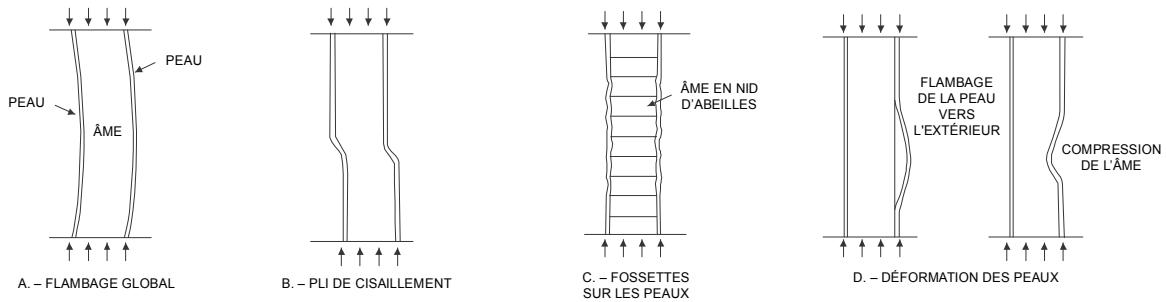


Figure III-9-41. Ruptures en compression de poutres sandwich

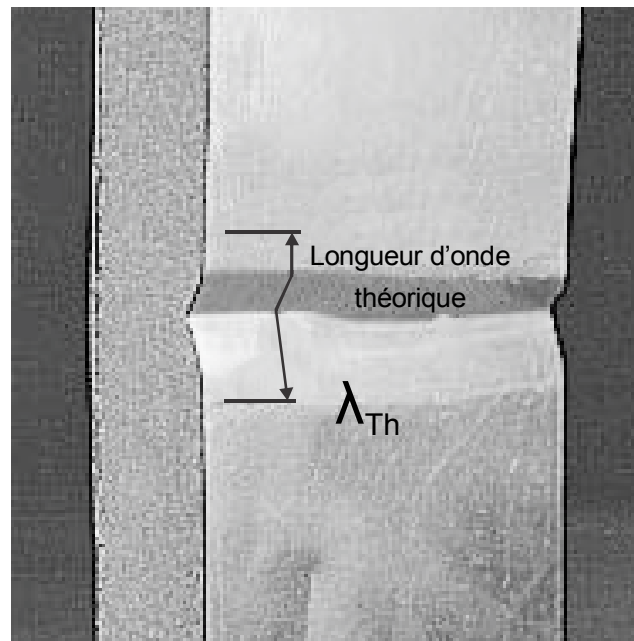


Figure III-9-42. Flambage local d'une peau fléchissant vers l'intérieur

26. Herakovich, C.T., *Mechanics of Fibrous Composites*, John Wiley & Sons, 1998.

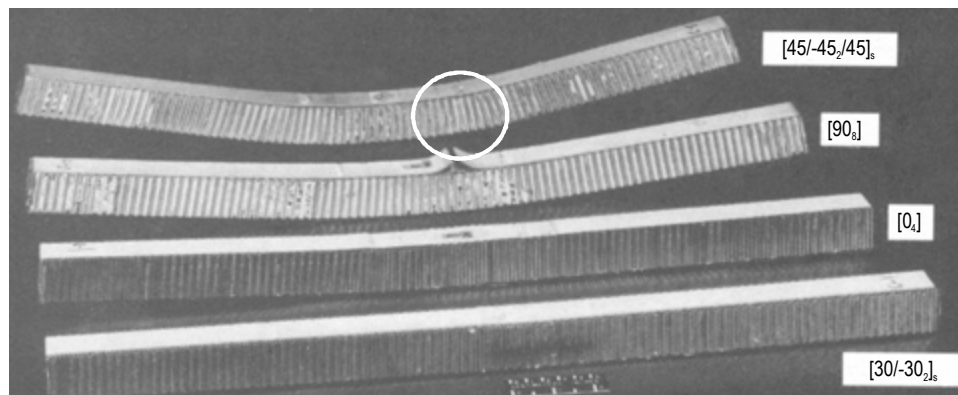


Figure III-9-43. Exemple d'une structure sandwich présentant un flambage qui amène la peau à se détacher de l'âme

9.8.47 En plus de la traction et de la compression des peaux, la flexion produit une charge de cisaillement qui s'exerce sur l'adhésif et sur l'âme. L'adhésif peut céder par cisaillement sans que les peaux ou l'âme ne présentent de marques caractéristiques de rupture. Dans ce cas, la peau se détache le long de la surface de l'âme.

9.8.48 *Impact.* Vu qu'elles sont conçues pour supporter des charges dans le plan produites par la flexion, les structures sandwich sont particulièrement sensibles aux dommages par impact. Les minces peaux et l'âme légère peuvent être endommagées même par des impacts relativement faibles, qui peuvent écraser la peau et l'âme²⁷, comme le montre la Figure III-9-44. Cependant, comme dans le cas des stratifiés, un impact peut endommager une structure sandwich sous la surface sans laisser de marques visibles sur la surface. Ce dommage subsuperficiel peut prendre la forme d'un délaminage de la peau ou d'un écrasement de l'âme, sans que la surface de la peau soit endommagée²⁷, comme le montre la Figure III-9-45. Des impacts d'une énergie relativement élevée peuvent mener à une pénétration complète du panneau sandwich.

9.8.49 *Fatigue.* La fatigue des structures sandwich est possible, mais comme dans le cas des stratifiés, elle n'est pas aussi courante que celle des structures métalliques. Un dommage causé par la fatigue peut produire plusieurs caractéristiques de rupture selon le composant de la structure qui cède par fatigue. Les peaux, l'âme et l'adhésif ont tous le potentiel de céder par fatigue. Les peaux qui cèdent par fatigue présentent généralement les caractéristiques décrites dans la section sur les stratifiés.

Joint

9.8.50 Un aéronef est un assemblage de divers éléments structurels. L'expérience montre que c'est aux joints que les ruptures s'amorcent le plus souvent. Les éléments structurels composites sont joints par des liants adhésifs ou des fixations mécaniques telles que des boulons ou des rivets. Ces joints ont plusieurs caractéristiques fondamentales de conception en commun avec les techniques de fixation des structures métalliques, mais il existe des différences importantes dans les modes de rupture. Malgré l'augmentation du nombre potentiel de modes de rupture, les assemblages composites ont moins de joints que les assemblages métalliques. Ce fait est particulièrement évident quand on compare le nombre de fixations mécaniques des structures métalliques avec celui des structures composites, qui sont habituellement plus intégrées²⁸.

27. Federal Aviation Administration, "Impact Damage Characterization and Damage Tolerance of Composite Sandwich Airframe Structures," DOT/FAA/AR-00/44, Washington (DC), janvier 2001.

28. Niu, M.C.-Y., "Composite Airframe Structures – Practical Design Information and Data," Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 1992.

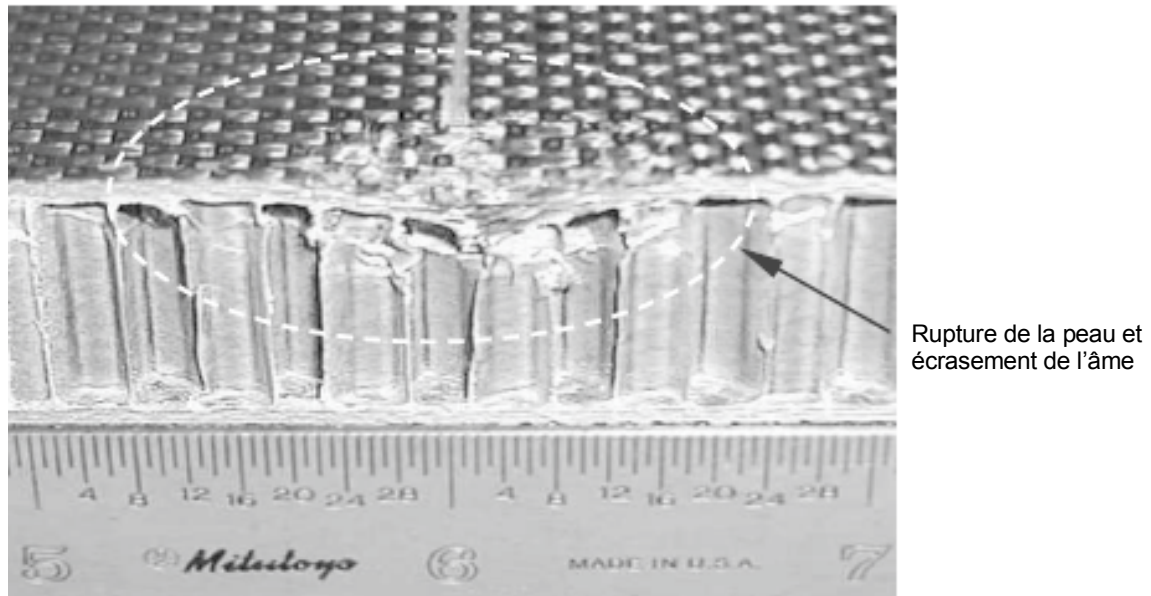


Figure III-9-44. Rupture de la peau et écrasement de l'âme

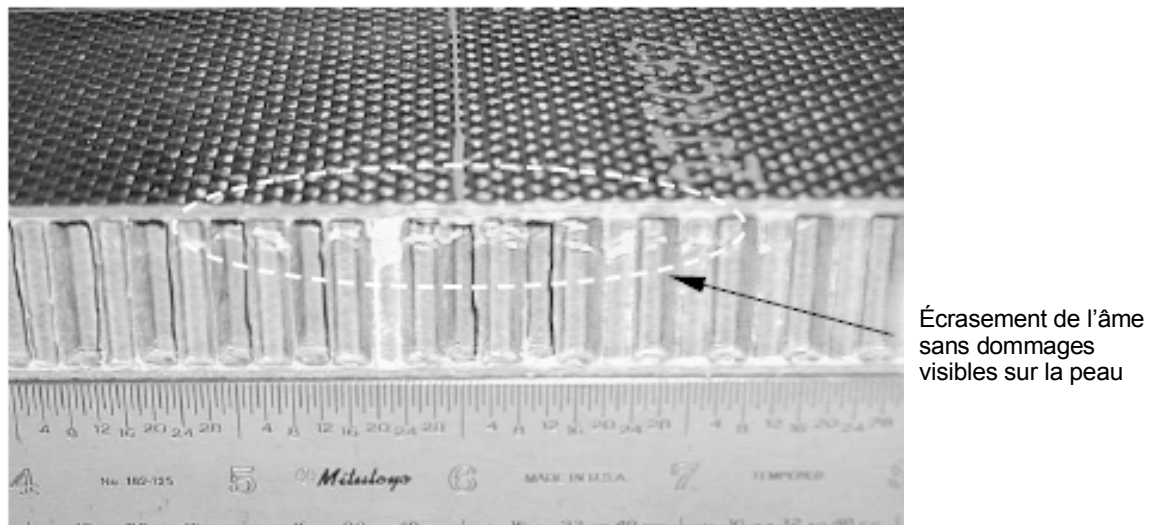


Figure III-9-45. Écrasement de l'âme sans dommages visibles sur la peau

Joint collés

9.8.51 Sous leur forme la plus simple, les structures assemblées par collage comprennent deux composites (supports) qui sont liés par un adhésif ou qui sont co-durcis (deux composites non durcis sont durcis ensemble de sorte que la charge est transférée par la couche matricielle, qui est maintenant commune). La Figure III-9-46 montre les types de joints collés les plus courants. Le collage est la méthode d'assemblage la plus naturelle pour les composites parce que l'adhésif peut être chimiquement semblable à la matrice du composite²⁸. Le co-durcissement est une méthode de collage souvent employée parce qu'elle permet de construire des structures hautement intégrées de géométrie complexe^{28,29,30,31}.

9.8.52 Par rapport aux joints mécaniques, les joints collés présentent l'avantage de transférer les charges sur une grande surface, de sceller le joint et de résister à la corrosion. Les éléments composites collés doivent cependant être méticuleusement préparés et soigneusement alignés pour obtenir la résistance prévue. L'assurance qualité et la vérification des composites est une activité qui exige beaucoup de temps et une forte intensité technologique.

9.8.53 Le transfert de charge principal entre les éléments collés illustré à la Figure III-9-46 se produit en cisaillement par l'intermédiaire de la couche adhésive²⁸. La Figure III-9-47 montre la répartition non uniforme de la contrainte de cisaillement d'un joint à double face équilibré³², les contraintes de cisaillement étant plus élevées sur les bords³³. Lorsque la charge augmente encore plus, les bords de l'adhésif subissent une déformation plastique vers l'intérieur pour supporter ce niveau de charge. Les joints à simple recouvrement présentent des répartitions de contraintes de cisaillement semblables en forme de cannelure ; dans ce cas, cependant, les charges de traction axiales des supports ne sont pas alignées l'une sur l'autre, ce qui produit un moment de flexion au joint. Les contraintes de pelage induites sont plus élevées sur les bords et réduisent la capacité des joints collés de transférer totalement les charges. Dans le cas des joints symétriques à double face, l'excentricité du chargement n'existe pas, mais quelques contraintes de pelage sont quand même produites le long du recouvrement.

Modes de rupture

9.8.54 Quatre modes de rupture sont normalement utilisés pour classer les ruptures des joints à recouvrement ; trois d'entre eux se produisent dans le support et un dans la couche adhésive. Ils sont illustrés²⁸ à la Figure III-9-48 pour des supports de même résistance. La Figure III-9-48(a) montre le délaminage du composite, dans lequel les contraintes de pelage arrachent la couche de fibres supérieures de la matrice. Cette rupture se produit lorsque la résistance à la traction de l'adhésif est supérieure à la résistance à la traction interlaminaire du composite. La Figure III-9-48(b) illustre un mode de rupture où les contraintes dans le plan exercées sur les fibres à l'interface du joint sont élevées, ce qui peut conduire à la rupture des fibres. En dernier lieu, la Figure III-9-48(c) montre une rupture interlaminaire due à des contraintes normales et des contraintes de pelage très élevées agissant à la concentration de contraintes. On rapporte que les modes de rupture représentés à la Figure III-9-48 se seraient aussi déjà produits dans l'ordre, avec une progression de la rupture allant de la rupture illustrée à la Figure III-9-48(a) à la rupture illustrée à la Figure III-9-48(c). Il est noté que si un des supports était plus rigide, la rupture se produirait sur le bord, dans le support moins rigide, de la manière indiquée ci-dessus^{30,33,34}.

29. ASM International, *ASM Handbook – Volume 21, Composites*, ASM International, 2001.

30. Dreger, D.R., "Design Guidelines for Joining Advanced Composites," *Machine Design*, mai 8, 1980, pp. 89–93.

31. Cosenza, F., "Mechanical Fasteners for Composites," *Materials Engineering*, August 1987, pp. 33–37.

32. Les supports des joints équilibrés ont la même rigidité en extension.

33. Hart-Smith, L.J., "Adhesive-Bonded Double-Lap Joints – Technical Report," Douglas Aircraft Company, Langley Research Center, janvier 1973a.

34. Hart-Smith, L.J., "Adhesive-Bonded Single-Lap Joints – Technical Report," Douglas Aircraft Company, Langley Research Center, janvier 1973b.

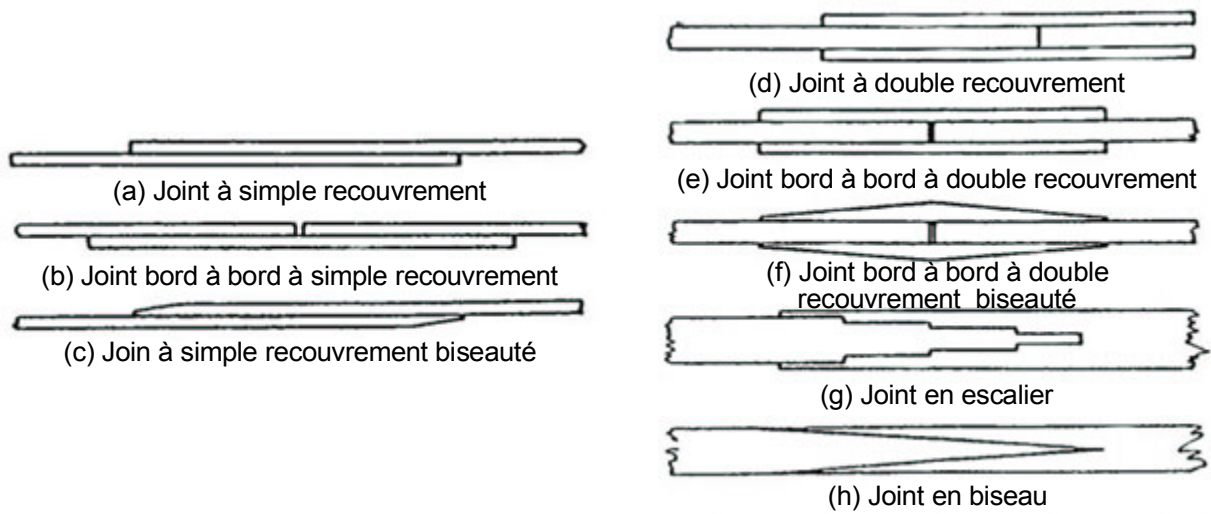


Figure III-9-46. Joints collés : de (a) à (c), joints à simple recouvrement, et de (d) à (h), joints à double recouvrement et leurs variantes

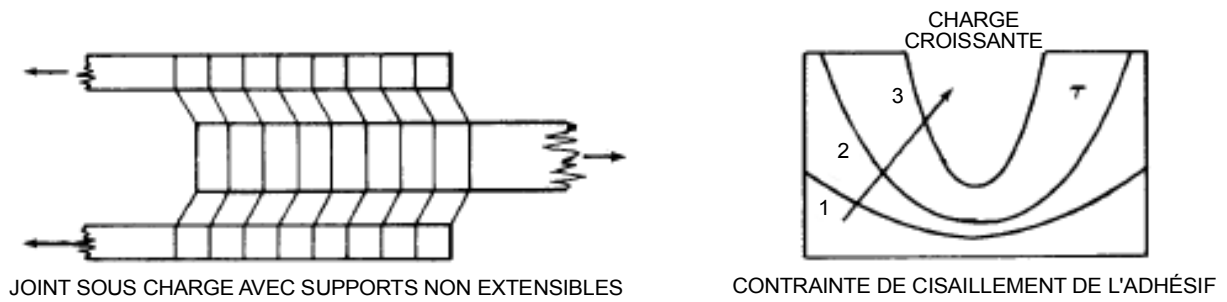


Figure III-9-47. Répartition des contraintes de cisaillement sous une charge croissante pour un adhésif capable de se déformer de manière plastique avant la rupture.

9.8.55 La rupture de la couche adhésive peut être réduite au minimum en construisant un recouvrement suffisamment long pour réduire les contraintes de cisaillement jusqu'à des niveaux admissibles^{28,35}. La rupture de ces couches peut produire des lancettes²⁹, comme le montre la Figure III-9-49. Ces lancettes se forment à un angle d'environ 45° lorsque les charges déforment l'adhésif²⁹ de manière permanente (Figure III-9-49). Si la charge est inversée (c'est-à-dire qu'elle passe avec le temps de traction à compression), l'orientation des lancettes sera inversée et il se formera un faciès de rupture en dents de scie²⁹. Lorsque la longueur du recouvrement est suffisante et la rupture s'amorce au milieu de l'adhésif, il faut examiner de près l'adhésif et les surfaces collées. Les enquêteurs doivent déterminer l'épaisseur, la porosité et la composition chimique de la couche adhésive et évaluer la préparation de la surface vu que tous ces éléments peuvent avoir une forte incidence sur la capacité des joints collés de supporter les charges.

9.8.56 L'intensité de la contrainte de pelage induite dépend considérablement de la géométrie et des caractéristiques des joints (biseauté, etc.). La Figure III-9-50 illustre ce point en montrant la répartition des contraintes de cisaillement et des contraintes de pelage dans un joint bord à bord à double recouvrement où l'extrémité gauche de la plaque de recouvrement est biseauté tandis que l'extrémité droite ne l'est pas^{28,35}. Plusieurs observations importantes peuvent être faites sur la répartition des contraintes de cisaillement et des contraintes de pelage. Le transfert de cisaillement a une répartition en cannelure des deux côtés de la plaque de recouvrement, les deux extrémités du côté droit de la plaque ayant en fait les mêmes crêtes maximales de contraintes de cisaillement. Cependant, le bord extérieur droit illustré à la Figure III-9-50 est le point de rupture le plus critique vu que les contraintes de pelage sont plus élevées à cet endroit^{28,35}. Le bord gauche du côté gauche de la plaque de recouvrement subit moins de contraintes de cisaillement à cause du biseutage et transfère une partie de la charge plus loin vers l'intérieur de la plaque. La zone de recouvrement subit plus de cisaillement et les contraintes de pelage sont compressives à cet endroit. En raison de cette répartition des contraintes, les ruptures des joints à double recouvrement équilibrés et à extrémités biseautées s'amorcent le plus souvent sur le bord intérieur du recouvrement des joints^{28,35} (Figure III-9-50). Les ruptures de joints à double recouvrement dont les extrémités ne sont pas biseautées commencent généralement sur les bords extérieurs. Les joints à double face non équilibrés³⁶ subissent les plus fortes déformations et contraintes de cisaillement au point le moins rigide du joint, amorçant la rupture dans le support le plus faible^{28,33-35}.

9.8.57 Il convient aussi de noter que la résistance du joint à simple recouvrement dépend beaucoup plus de la température que celle du joint à double recouvrement équilibré³⁰, vu que la résistance globale du joint à simple recouvrement est régie par une propriété matérielle de l'adhésif^{29,35}. Les joints à double face équilibrés dépendent beaucoup moins de la température parce que la capacité de charge de l'adhésif dépend de l'énergie de déformation absorbée par l'adhésif. L'énergie de déformation est normalement indépendante de la température parce qu'avec l'augmentation de la température, la résistance de l'adhésif au cisaillement diminue mais la déformation à la rupture augmente³³ (Figure III-9-51). Il s'agit clairement d'un autre avantage des joints à double face ; cependant, la plupart des structures d'aéronef sont hyperstatiques de sorte que les contraintes de compatibilité de déformation limitent la capacité du joint de s'étirer et de supporter pleinement les charges imposées.

9.8.58 Le joint à recouvrement en escalier et le joint en biseau sont des types de joints collés à haute résistance plus efficaces et permettent aussi une transition en douceur de la surface pour satisfaire aux exigences aérodynamiques (Figure III-9-46). Les joints en biseau optimaux exigent des angles de quelques degrés seulement, qui ne sont généralement pas réalisables en raison de contraintes de fabrication. Armstrong³⁷ note que les joints en biseau ont généralement un effilement de 1/50 sauf aux bords du panneau où un angle de 1/20 est parfois acceptable. Niu²⁸ signale que des ruptures peuvent se produire à l'extrémité du stratifié le plus rigide.

35. Hart-Smith, L.J., "Specimen Shows Thickness Where Adhesive Will Not Fail," *Adhesives Age*, avril 1987, 30(4), pp. 28–32.

36. Les joints à double face non équilibrés sont des joints où la rigidité combinée des deux supports qui transfèrent les efforts dans une direction n'est pas égale à la rigidité du support du milieu.

37. Armstrong, K., L. Bevan, et W. Cole, *Care and Repair of Advanced Composites*, Second Edition, SAE International, 2005.

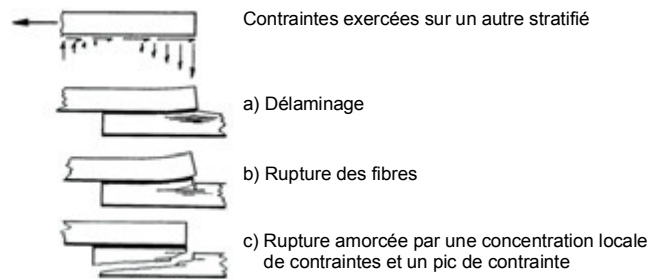


Figure III-9-48. Modes de rupture potentiels de joints collés à simple recouvrement

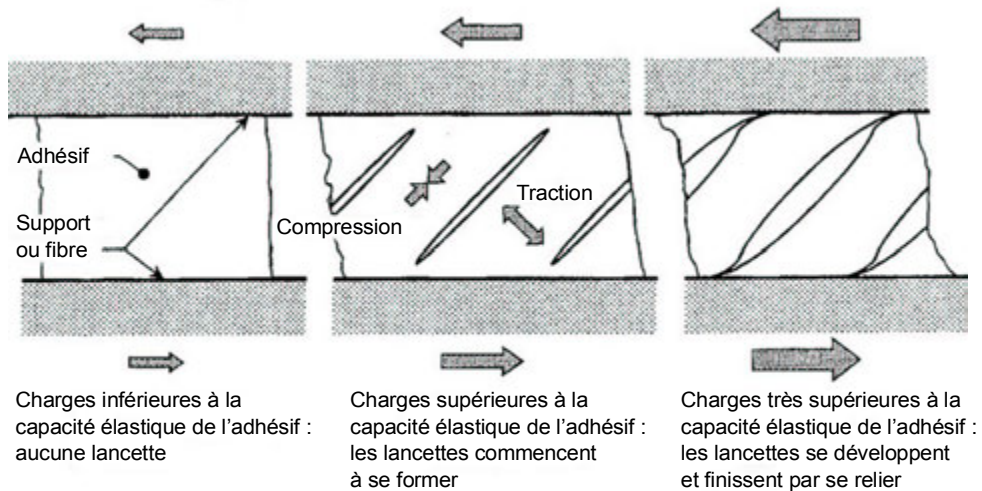


Figure III-9-49. Rupture en traction d'une couche adhésive avec formation de lancettes sous une charge de cisaillement monotone supérieure à l'élasticité admissible

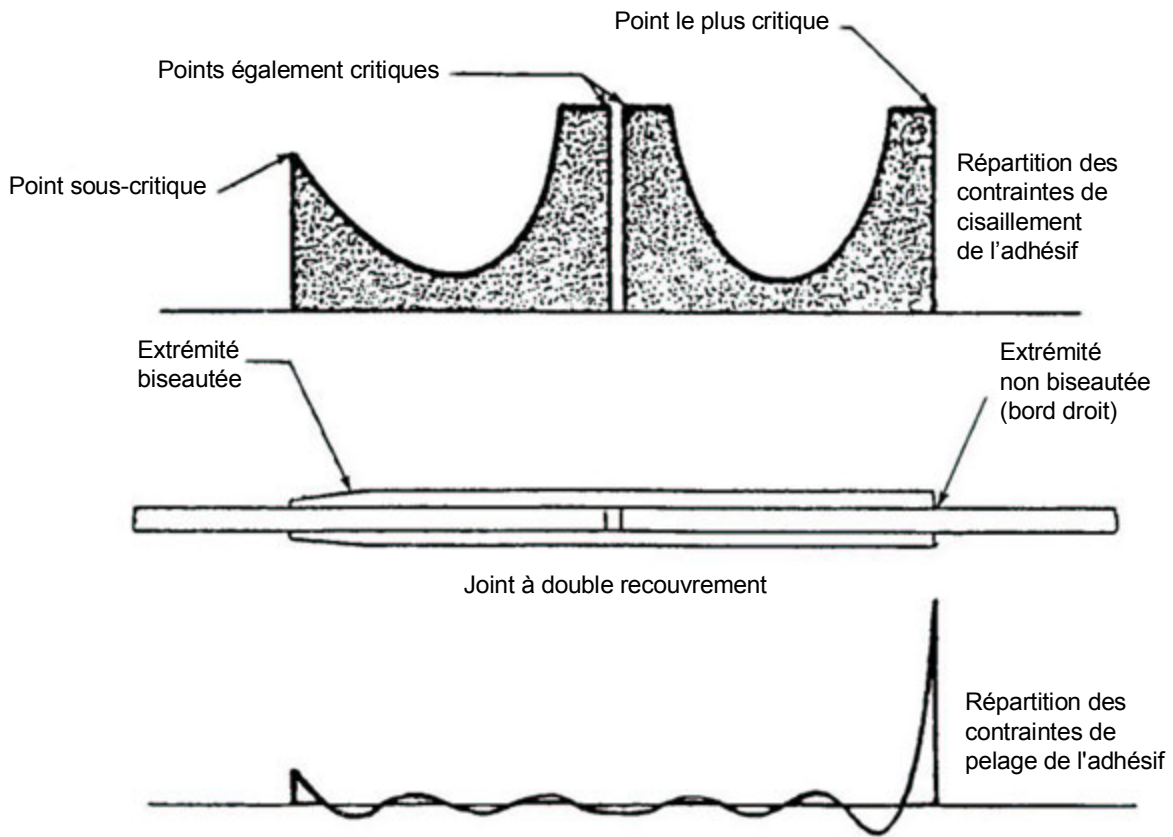


Figure III-9-50. Répartition des contraintes de cisaillement et de pelage dans un joint à double face

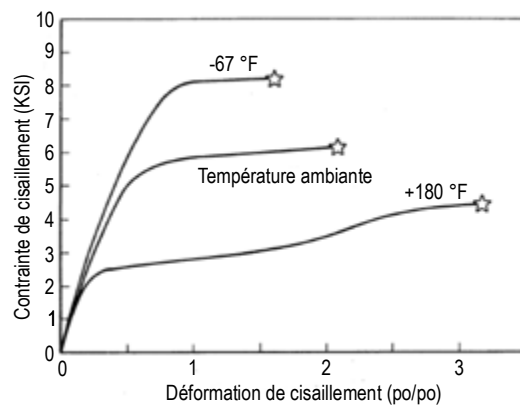


Figure III-9-51. Incidence de la température sur le lien contrainte-déformation d'un adhésif ductile

9.8.59 Le joint à recouvrement en escalier est un joint hybride entre un joint à double face et un joint en biseau, dans lequel chaque échelon se comporte comme un joint à double face. La complexité structurelle de ce joint exige une analyse détaillée pour déterminer les niveaux de charge qui ont pu être exercés. La répartition des contraintes de cisaillement suit celle d'un joint à double face, avec des crêtes de contrainte de cisaillement sur le bord de chaque échelon. Niu²⁸ signale que le dernier échelon du stratifié intérieur peut se rompre dans ce type de raccordement. Ces joints sont généralement utilisés dans des applications critiques à forte charge comme les joints d'emplanture d'aile²⁸ (Figure III-9-52).

Jointes mécaniques

9.8.60 Les jointes mécaniques des composites sont généralement moins efficaces que les jointes collés parce que la présence d'un trou et d'une fixation crée des contraintes supplémentaires indésirables qui ont une incidence préjudiciable sur l'intégrité structurelle. Les forces s'exercent sur une surface plus petite que dans le cas des jointes collés, ce qui exige dans certains cas d'ajouter des éléments supplémentaires dans les parties du joint. Les jointes mécaniques sont couramment employées pour raccorder des stratifiés composites épais. Ils sont aussi utilisés dans les jointes complexes où il est nécessaire de démonter la structure. Dans de nombreux cas, les éléments composites sont collés à des fixations métalliques et les parties métalliques sont raccordées mécaniquement²⁸. Cette configuration permet de transférer les charges plus localisées et multiaxiales au joint par l'intermédiaire des fixations métalliques. Ces fixations sont de préférence faites d'un alliage d'acier inoxydable ou de titane.

9.8.61 Les jointes mécaniques sont parfois avantageux dans les installations permanentes ou semi-permanentes lorsque le composite doit être joint à une surface non adhérente³¹. Les raccordements boulonnés sont relativement faciles à installer et à inspecter, et exigent peu de préparation de la surface par rapport aux structures collées^{30,38}. La Figure III-9-53 montre trois types de jointes mécaniques courants : joint à simple recouvrement, joint à double recouvrement et raccordement boulonné à plusieurs rangées²² (Figure III-9-53).

9.8.62 Les composites raccordés mécaniquement ont des problèmes de rupture spécifiques^{39,40}. Tout d'abord, les composites sont fragiles, ce qui les rend plus sensibles aux concentrations de contraintes que les métaux. Deuxièmement, l'interaction des boulons et des stratifiés est compliquée et dépend du volume de fibres, de la répartition de la matrice, de l'ordre d'empilement des stratifiés et de la répartition fibre-matrice exacte au trou. Tous ces éléments ont une incidence importante sur le mode de rupture du joint. La résistance des jointes des composites dépend aussi fortement du type de boulon ; les goupilles sont les moins efficaces tandis que les boulons avec rondelles ou les boulons à tête de dimensions appropriées et un pré-couple adéquat pour éviter le ragage des fibres augmentent la capacité de charge du joint³⁹.

9.8.63 Un point important des composites raccordés mécaniquement est leur comportement à la charge ultime²⁸. La Figure III-9-54 compare la répartition de la charge de cisaillement d'une fixation d'un joint métallique à quatre rangées de boulons avec un joint composite semblable. La charge de la fixation du joint métallique est uniforme dans tout le joint à la charge ultime parce que la déformation permanente des plaques aide à répartir les charges de la fixation. Les jointes composites ne peuvent pas obtenir cette répartition uniforme des contraintes à cause de leur manque de ductilité. Les fixations à rangées multiples sont donc moins courantes dans les structures composites que dans les structures métalliques.

38. Phillips, J.L., "Fastening Composite Structures with Huck Fasteners – Part 1," *Aircraft Engineering*, 58(11), Issue 693, novembre 1986, pp. 2–6.

39. Hart-Smith, L.J., "Bolted Joints in Graphite-Epoxy Composites," Douglas Aircraft Company, Inc., National Aeronautics and Space Administration, 1976.

40. Diplomarbeit, "Überarbeitung und Optimierung der Seastar Höhenleitwerksflosse: Vergleich einer GFK- und CFK Struktur," Design and Optimization of the Seastar's Pettinger, A.M., Optimization of the SEASTAR's Horizontal Stabilizer: A comparison between GFRP and CFRP, Diplomarbeit, Fachhochschule München, juillet 1991.

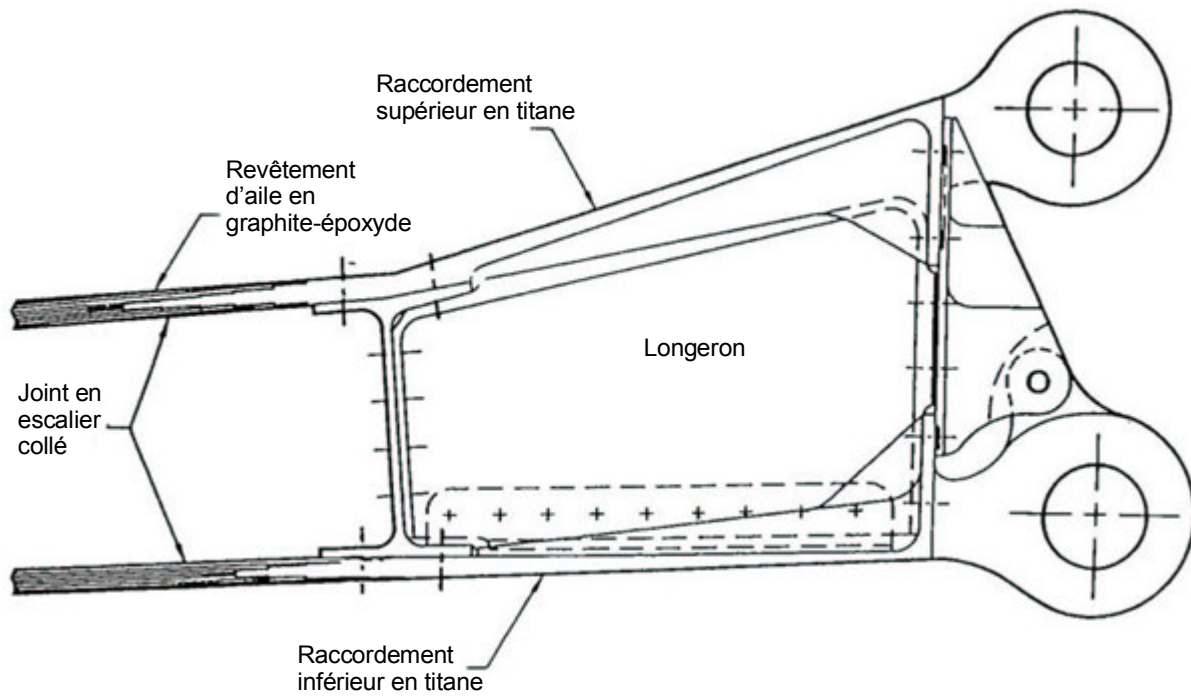


Figure III-9-52. Joints en escalier pour raccordement avec une pièce métallique au joint d'emplanture d'aile

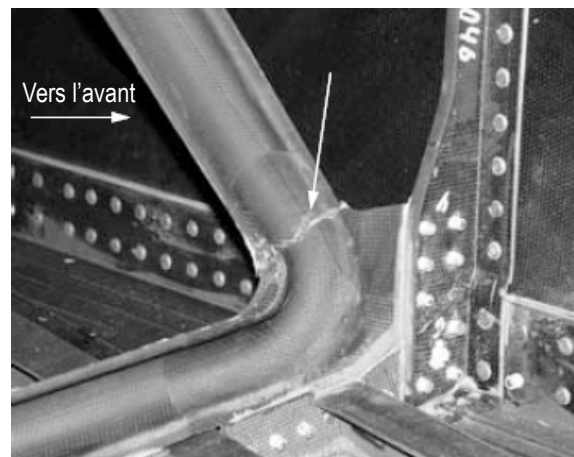
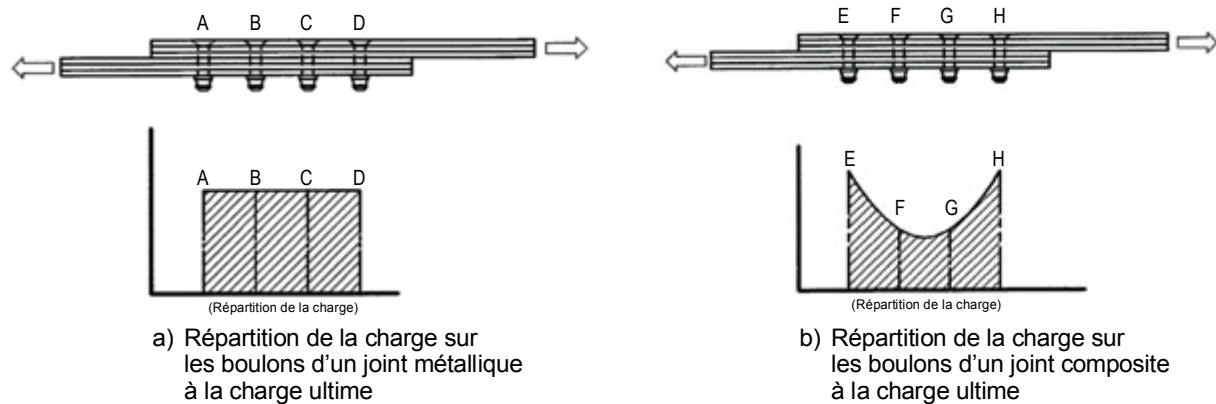


Figure III-9-53. Plusieurs éléments renforcés de composites de fibre de carbone de l'empennage vertical des A300-600 sont raccordés à l'aide de fixations à une ou deux rangées de boulons. La flèche blanche indique une rupture structurelle.



**Figure III-9-54. Comparaison de la répartition des charges :
a) joint métallique et b) joint composite**

9.8.64 Ce comportement rend les joints composites à rangées multiples très sensibles aux tolérances de fabrication³⁰. Les dimensions des trous percés dans les composites doivent être exactes, autrement un boulon supportera une charge considérablement supérieure. Ce problème n'est pas aussi préoccupant dans le cas des métaux vu que la déformation locale permanente compense rapidement les différences géométriques entre les fixations et l'élément métallique. Les fixations dans les structures composites doivent supporter toute la gamme de charges et peuvent amorcer une rupture.

9.8.65 L'installation des fixations peut aussi avoir des incidences importantes sur la rupture d'un joint en service. Il a été démontré que les fixations à ajustement serré augmentent la durée de vie du joint en provoquant un délaminage mineur autour du boulon mais sans endommager les fibres. Les fibres pontent la concentration de contraintes localisée, augmentant ainsi la durée de vie du joint. Par contre, si les fibres sont endommagées durant l'installation du boulon ou si le boulon est lâche, la durée de vie du joint est considérablement réduite^{28,39,41}.

Caractéristiques de rupture

9.8.66 Les principaux modes de rupture des joints mécaniques³⁹ sont illustrés à la Figure III-9-55 : rupture nette en traction au trou du boulon, rupture par cisaillement des plaques, rupture causée par la tête du boulon traversant le stratifié, rupture par clivage-traction (traction transversale), rupture par matage avec écrasement localisé du stratifié sur la face cachée de la pièce de fixation et rupture du boulon. La rupture nette par traction et la rupture par matage sont généralement les modes de rupture à plus haute résistance des joints composites de proportions optimales^{29,39,41}. La rupture par cisaillement des plaques³⁹ (Figure III-9-55) est généralement un mode de rupture à plus faible résistance que la rupture par matage et si la largeur de la bande est trop faible, le stratifié peut aussi se rompre par clivage-traction.

9.8.67 La Figure III-9-56 montre une rupture nette en traction²² de l'empennage vertical de l'A300-600 du vol 587 d'American Airlines. Les enquêteurs du NTSB ont aussi détecté des zones de rupture par matage. Dans ce cas particulier, le composite était renforcé par un manchon en métal. La Figure III-9-57 montre une rupture par matage³⁹ et la Figure III-9-58, une rupture par cisaillement des plaques³⁹.

41. Hart-Smith, L.J., "Mechanically-Fastened Joints For Advanced Composites – Phenomenological Considerations and Simple Analyses," Douglas Aircraft Company, 4th Conference on Fibrous Composites in Structural Design San Diego, pp. 543–574, 1978.

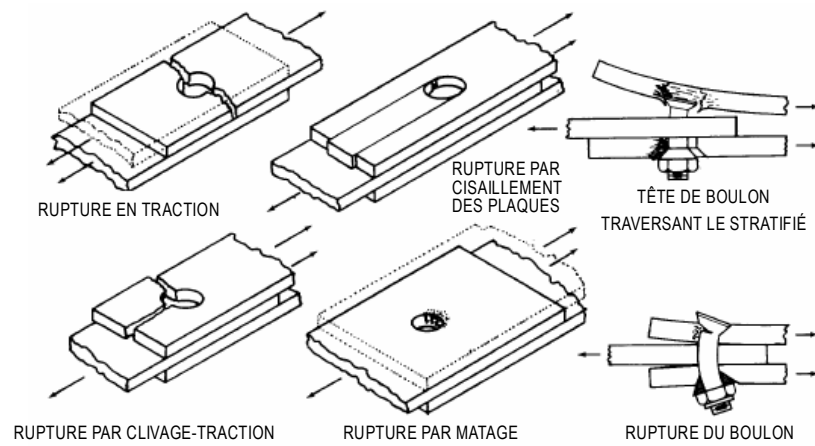


Figure III-9-55. Six modes courants de rupture des boulons

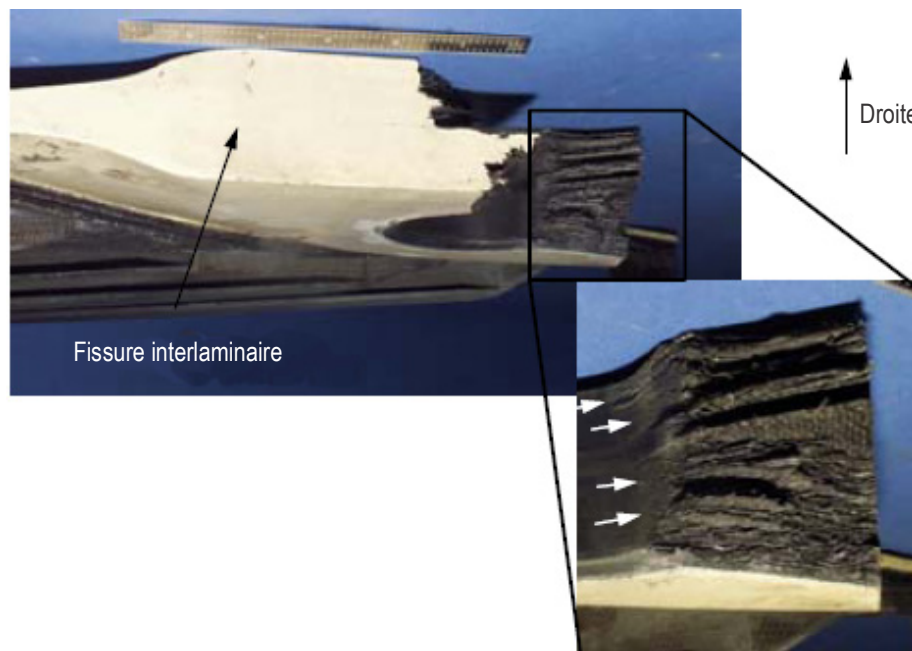


Figure III-9-56. Rupture nette de section par traction de la fixation arrière de l'A300-600. Les flèches blanches indiquent les dommages adjacents à la zone de rupture.

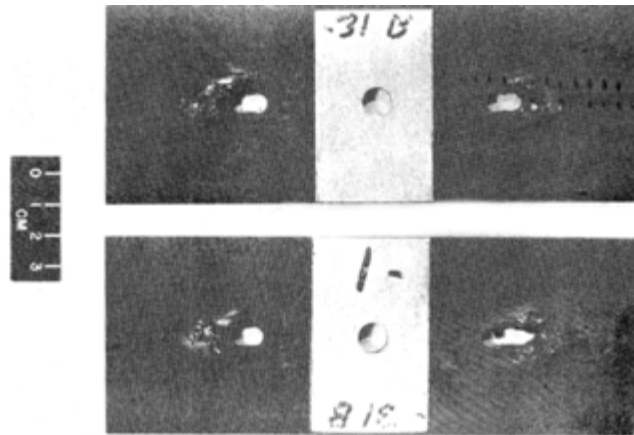


Figure III-9-57. Rupture substantielle par matage d'une éprouvette en composite carbone

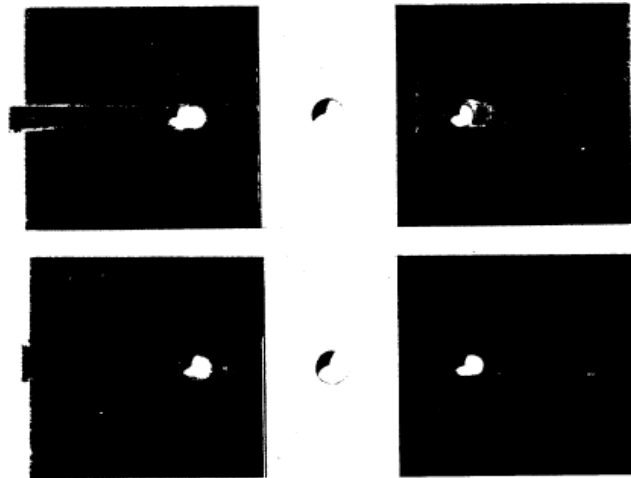


Figure III-9-58. Rupture par cisaillement des plaques d'une éprouvette en composite carbone

9.8.68 Le mode de rupture d'un joint mécanique dépend fortement de la superposition des éléments du joint. Une rupture par cisaillement des plaques peut se produire si le stratifié n'a pas une proportion suffisante de fibres à 90°. La rupture par clivage peut se produire dans les composites qui contiennent trop peu de couches transversales et s'aggrave avec une largeur de bande trop faible et des distances jusqu'aux bords trop courtes, auquel cas la rupture s'amorce sur le bord libre à quelque distance du trou³¹. Les concepteurs utilisent des agencements presque quasi-isotropes aux trous de boulons pour aider à éviter les ruptures par cisaillement des plaques et par clivage. Il peut être utile pour l'enquêteur de vérifier l'agencement utilisé par rapport à la conception.

Réparations

9.8.69 Les structures composites peuvent être endommagées durant la fabrication ou en service. Comme dans le cas des structures métalliques, de nombreux types de dommages causés aux composites peuvent être réparés afin de rétablir l'intégrité de la structure. Les éléments réparés utilisés en service peuvent par la suite faire partie d'une rupture structurelle ou peut-être conduire directement à cette rupture. Lorsqu'il examine une épave comportant des structures en composite, un enquêteur doit être capable de repérer la présence d'une réparation et de déterminer si cette réparation a joué un rôle dans l'accident. Les paragraphes qui suivent visent à aider les enquêteurs dans ce travail. On trouvera d'autres indications dans Armstrong³⁷.

9.8.70 Les réparations de composites peuvent être divisées en deux catégories : le rapiéçage et l'injection de résine. Les pièces utilisées pour le rapiéçage des composites sont semblables à celles qui sont employées pour les tissus ; la pièce a pour but d'empêcher que le dommage ne se propage. Outre ces points communs cependant, les pièces utilisées dans les structures composites sont souvent censées reproduire certaines fonctions de la structure originale, notamment la capacité de supporter les charges et la surviabilité environnementale pour le reste de la durée de vie théorique de la structure. Comme pour les structures métalliques, toutes les réparations doivent être faites conformément au manuel des réparations structurales du fabricant ou en utilisant des méthodes approuvés par les autorités de navigabilité. Si une réparation est située près d'une rupture structurelle qui a eu lieu avant l'accident, il convient de faire une enquête exhaustive sur la conception de la réparation.

9.8.71 Les pièces de réparation généralement employées dans les structures composites sont soit en métal, soit en composite et sont fixées mécaniquement ou collées à la structure. Le choix du matériau de la pièce et de la méthode de fixation dépend des dommages subis et des fonctions structurelles qui doivent être assurées. Les pièces métalliques et les fixations mécaniques sont généralement utilisées pour les structures épaisses qui supportent des charges importantes, tandis que les pièces composites collées sont utilisées pour les structures minces qui supportent des charges relativement mineures⁴². Malgré cette tendance générale, les pièces composites ne sont pas toutes collées et les pièces métalliques ne sont pas toutes fixées mécaniquement ; les pièces composites sont parfois fixées mécaniquement et les pièces métalliques sont parfois collées.

9.8.72 Après avoir déterminé les dommages et choisi la pièce, il faut procéder comme suit :

- a) enlever la partie endommagée de la structure ;
- b) remplir le vide avec un matériau de remplissage approprié ;
- c) boulonner ou coller la pièce à la structure.

Quelques exemples sont donnés ci-après pour illustrer les principaux éléments et les principales caractéristiques des pièces de réparation courantes.

42. Hoke, M.J., "Repair Applications, Quality Control, and Inspection," *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, pp. 893-898.

9.8.73 Prenons l'exemple d'un panneau sandwich qui a été perforé par impact⁴³, comme celui qui est illustré à la Figure III-9-59(a). Le dommage causé à la peau peut compromettre l'intégrité de la structure sandwich et sa capacité de supporter les charges. Les étapes de réparation indiquées ci-dessus sont appliquées. La partie endommagée de la peau et l'âme en nid d'abeilles sont retirées⁴³ [Figure III-9-59(b)]. Après avoir retiré la partie endommagée, un bouchon de remplissage est inséré pour remplacer l'âme⁴³, comme le matériau foncé que l'on peut voir au centre de la Figure III-9-59(c). En dernier lieu une pièce de réparation en composite est collée à la surface⁴³ [Figure III-9-59(d)]. Il faut ensuite égaliser les bords de la pièce et à traiter et peindre la surface. Le schéma de la Figure III-9-60 montre une vue en coupe de la réparation illustrée à la Figure III-9-59⁴³. Comme on peut le voir, le matériau de remplissage de l'âme et la pièce en composite collée visent à rétablir la ligne d'efforts dans la région endommagée.

9.8.74 La réparation des stratifiés composites suit une procédure semblable à celle qui vient d'être exposée pour les structures sandwich. La Figure III-9-61 et la Figure III-9-62 montrent deux pièces de réparation composites collées⁴². Dans ces cas, les plis composites constituent le matériau de remplissage et la pièce de réparation. L'interface angulaire lisse illustrée à la Figure III-9-61 est une interface en biseau, et celle de la Figure III-9-62 est une interface en escalier⁴². Les interfaces en biseau sont généralement employées lorsqu'il est nécessaire de transférer des charges relativement élevées à travers la zone réparée ou lorsque le contour de la surface doit être lisse^{37,43}.

9.8.75 La Figure III-9-63 montre un exemple de réparation utilisant une pièce⁴² fixée mécaniquement. Dans cet exemple, le stratifié composite endommagé est le revêtement d'une aile. La partie endommagée est retirée et une pièce de réparation en titane est fixée au stratifié à l'aide de boulons. Aucun matériau de remplissage structural n'est utilisé dans ce cas.

9.8.76 Les pièces de réparation métalliques sont généralement en aluminium ou en titane. Comme le contact entre l'aluminium et le carbone peut conduire à une corrosion, des pièces en titane ou une protection de surface en titane sont généralement employées comme pièces de réparation métalliques sur les composites carbone. La Figure III-9-64 montre une vue en coupe de la réparation illustrée à la Figure III-9-63, avec un matériau de remplissage de faible module⁴³. Comme on peut le voir, la pièce métallique vise à rétablir une ligne d'efforts autour de la zone endommagée. La plaque de renfort installée sur le côté non endommagé est généralement scindée pour réduire au minimum les changements de rigidité locaux indésirés de la structure.

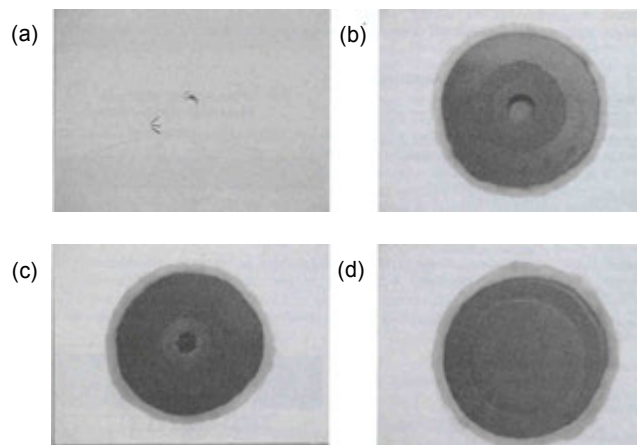


Figure III-9-59. (a) Perforation traversant la peau d'une structure sandwich. (b) Retrait de la partie endommagée de la structure. (c) Remplissage du vide créé par le retrait de la partie endommagée. (d) Pièce de réparation collée à la structure.

43. Heslehurst, R.B. et M.S. Forte, « Repair Engineering and Design Considerations », *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, pp. 885-892.

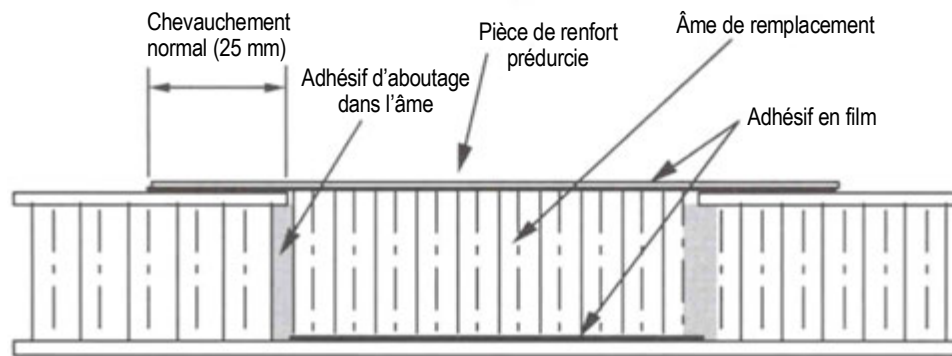


Figure III-9-60. Vue en coupe de la pièce de réparation collée sur une structure sandwich, semblable à la réparation illustrée à la Figure III-9-59

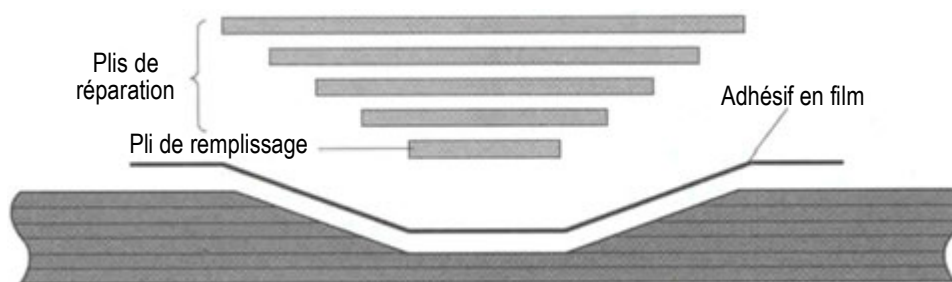


Figure III-9-61. Pièce de réparation collée sur un stratifié avec interface biseautée

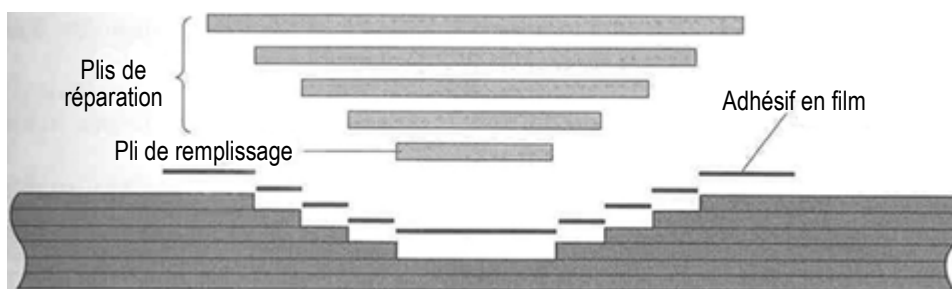


Figure III-9-62. Pièce de réparation collée sur un stratifié avec interface en escalier

9.8.77 De nombreuses pièces de réparation des surfaces structurales peuvent être rapidement repérées par un examen visuel. Les pièces fixées mécaniquement sont faciles à identifier, mais les pièces collées, particulièrement celles dans lesquelles la jonction entre le bord de la pièce et la structure réparée est lisse, peuvent être plus difficiles à détecter. Il est utile dans ces cas de consulter le dossier des réparations de la structure.

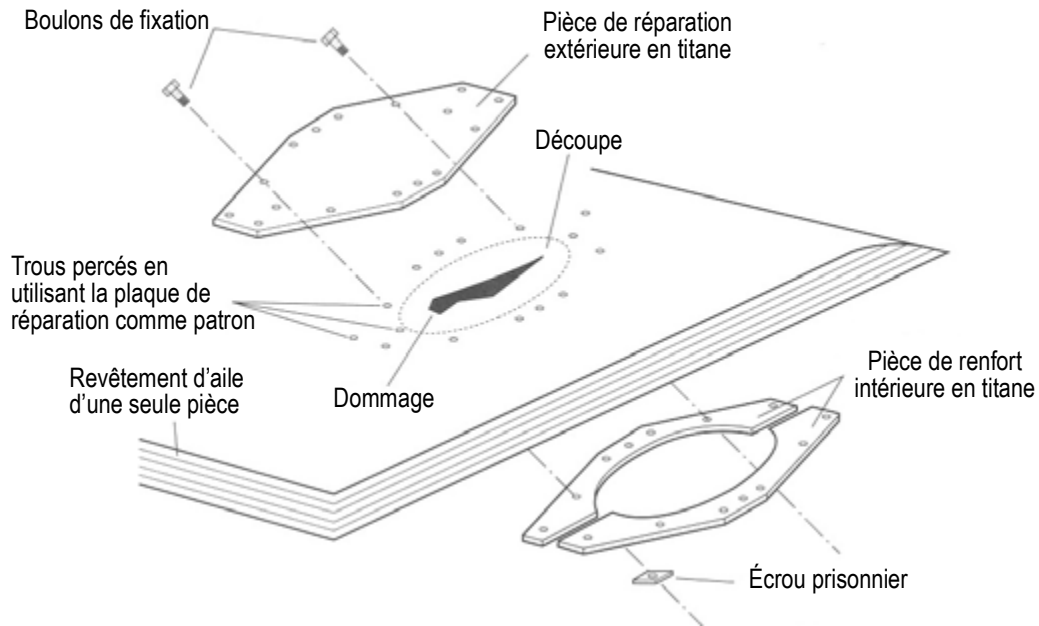


Figure III-9-63. Pièce de réparation fixée mécaniquement

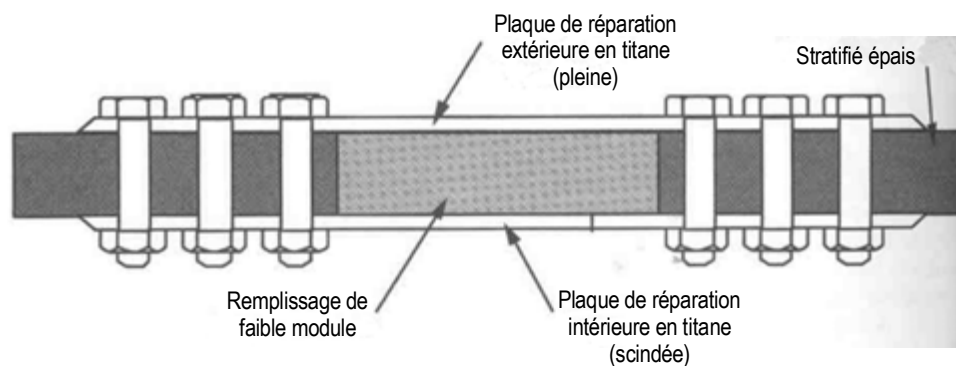


Figure III-9-64. Vue en coupe de la réparation d'un stratifié au moyen d'une pièce fixée mécaniquement, semblable à la réparation illustrée à la Figure III-9-63

9.8.78 L'injection de résine est une technique de réparation qui consiste à injecter une résine dans le composite pour remplir certains types de dommages comme les fissures, les vides, les interstices et les délaminages. L'injection de résine est généralement réservée aux réparations qui n'ont que peu ou pas d'incidences sur la structure vu que les composites tirent la plupart de leur résistance de leurs fibres. L'injection de résine crée des zones de haute teneur en résine sans renforcement et l'application de charges structurelles pourrait entraîner la rupture des zones riches en résine.

9.8.79 La Figure III-9-65 montre un exemple de réparation par injection de résine⁴². La partie droite de cette figure montre la peau supérieure d'une structure sandwich qui présente un délaminage. Comme il est indiqué plus haut, un délaminage est une décohésion et une séparation des plis d'un stratifié. Dans le cas illustré à la Figure III-9-65, une injection de résine est utilisée pour remplir le vide et coller les plis délaminés. Une fois que la zone délaminée est établie⁴⁴, la résine est injectée par un trou d'injection dans le stratifié. La résine doit couler entre le trou d'injection et une série de trous d'évent percés près du bord de la zone délaminée.

9.8.80 Les réparations par injection de résine peuvent être difficiles à déceler parce que toute trace laissée à la surface est poncée et peinte pour rétablir le fini uniforme de la surface. Un examen du dossier de réparations de la structure peut aider à repérer l'emplacement des réparations. Une radiographie et une coupe transversale des stratifiés peuvent aussi aider à repérer les zones riches en résine créées par les réparations.

Caractéristiques de rupture

9.8.81 Comme tous les éléments structurels, les réparations sont sujettes aux ruptures en service. Un défaut de conception, des erreurs de fabrication et d'installation ou des conditions d'utilisation imprévues peuvent causer la rupture d'une réparation qui, à son tour, peut causer la rupture de la structure qui l'entoure. Les modes de rupture que peuvent subir les pièces de réparation dépendent fortement de la méthode de fixation, c'est-à-dire adhésive ou mécanique. Le Tableau III-9-3 donne quelques exemples de ces modes de rupture. Les informations présentées ci-dessus sur les joints collés et les joints mécaniques peuvent très utiles pour les enquêtes sur les ruptures des pièces de réparation collées ou fixées mécaniquement.

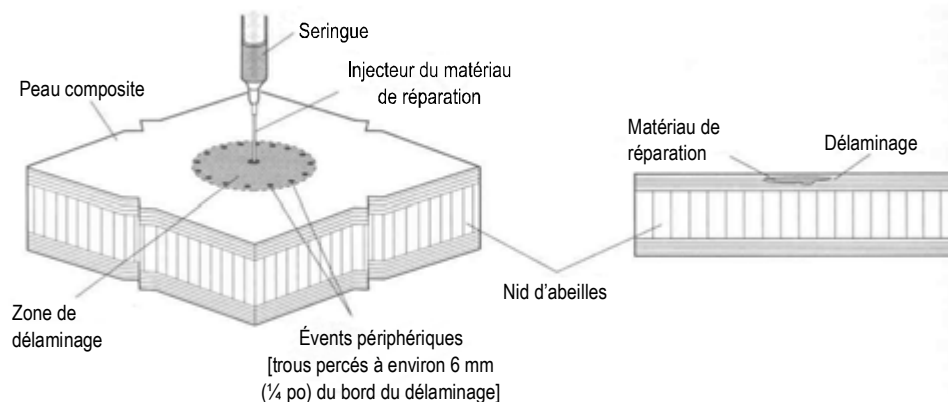


Figure III-9-65. Délaminage (à droite) réparé par injection de résine (à gauche)

44. La zone peut être identifiée à l'aide du test avec une pièce de monnaie ou par une inspection à l'aide de techniques non destructives comme les techniques ultrasoniques. On trouvera plus de renseignements sur les inspections non destructives dans les documents de référence cités dans la présente section.

Tableau III-9-3. Exemples de modes de rupture des pièces de réparation collées ou fixées mécaniquement

Pièces collées	Pièces fixées mécaniquement
Dégradation due à la température.	Les trous affaiblissent la structure adjacente.
Dégradation due à l'humidité.	Les trous provoquent des concentrations de contraintes.
Mauvaise préparation de la surface.	Mauvaise qualité de la surface de finition des trous.
Mauvais durcissement de l'adhésif.	Corrosion galvanique.
Le durcissement dégrade la structure adjacente.	Mauvais ajustement géométrique entre la structure et les éléments de réparation.
Mauvais ajustement géométrique entre la structure et les éléments de réparation.	

9.8.82 Les pièces de réparation collées présentent quelques caractéristiques qui pourraient contribuer à une rupture. Une de ces caractéristiques est la liaison créée durant l'installation de la pièce de réparation. La préparation de la surface est essentielle pour créer une bonne liaison. La surface doit être propre et suffisamment rugueuse et la liaison doit être complète, sans vides ni rides au point de jonction entre l'adhésif et les supports. Lorsqu'une pièce de réparation fait partie d'une rupture, l'examen des surfaces de contact entre l'adhésif et le support peut mettre au jour certaines de ces erreurs. La présence de débris aux points de jonction peut indiquer que les supports n'ont pas été nettoyés avant le collage. Des surfaces particulièrement lisses ou particulièrement rugueuses sur l'adhésif et le support peuvent indiquer que la rugosité des supports n'a pas été ajustée correctement avant le collage. Des changements brusques dans l'apparence de la surface adhésive peuvent indiquer la présence de rides ou de vides qui ont créé une zone sans liaison.

9.8.83 Une autre caractéristique des réparations collées qui les rend sensibles aux ruptures est le processus de durcissement de l'adhésif. Pour durcir correctement, les adhésifs structuraux doivent normalement être soumis à un processus précis d'application de température et de pression. Comme dans tout processus critique, si la procédure spécifiée n'est pas bien suivie, le résultat peut conduire à une rupture. Une autre cause moins évidente de rupture est la possibilité que le processus de durcissement altère les propriétés mécaniques des supports. Par exemple, les matériaux thermodurcissables ont en général une température de durcissement inférieure à celle des matériaux thermoplastiques. Si un adhésif thermoplastique est utilisé pour réparer des supports thermodurcissables, le processus de durcissement de la pièce de réparation collée pourrait dégrader les supports thermodurcissables et conduire à une rupture. Une façon de détecter ce type de rupture est de tester les propriétés mécaniques des supports près du plan de collage par rapport à leurs propriétés mécaniques loin du plan de collage. Le processus de durcissement peut aussi conduire à des ruptures de la liaison causées par l'humidité. La chaleur et la pression appliquées durant le processus peuvent forcer l'humidité des supports à s'échapper et à se fixer le long du plan de collage, affaiblissant ainsi la liaison et conduisant à une rupture. Une analyse de la teneur en humidité des supports près du plan de collage par rapport à leur teneur en humidité loin du plan de collage peut permettre de détecter ce type de rupture.

9.8.84 Les pièces de réparation fixées mécaniquement présentent aussi quelques caractéristiques qui pourraient contribuer à une rupture. Tout d'abord, les trous percés pour recevoir les fixations peuvent affaiblir de plusieurs manières la structure à réparer. Le perçage des trous enlève une partie du matériau, crée des concentrations de contraintes et forme de nouvelles surfaces qui peuvent présenter des défauts. Comme dans le cas des métaux, les surfaces libres des composites sont une porte ouverte aux imperfections, telles que des entailles ou des microfissures, qui peuvent se développer sous les efforts continus. Les surfaces libres des stratifiés présentent des risques supplémentaires parce qu'elles sont sujettes au délaminage. L'interaction des charges et de la géométrie dans les joints fixés mécaniquement à la structure peut être beaucoup plus complexe que celle de la structure elle-même. Il est possible notamment que la structure ne soit pas optimisée pour supporter les charges des boulons et peut donc être plus sensible aux modes de rupture des joints composites boulonnés décrits plus haut.

9.8.85 Les réparations par injection de résine peuvent aussi conduire à des ruptures. Par sa nature même, l'injection de résine crée une zone de haute teneur en résine. Vu que la matrice d'un stratifié type est relativement faible et flexible par rapport aux fibres, une zone riche en résine peut créer un environnement favorisant l'amorce d'une rupture. Un examen visuel des faciès de rupture d'une structure cassée peut aider à déceler les zones riches en résine. Les zones riches en résine associées aux réparations par injection de résine peuvent être identifiées en localisant le trou d'injection ou en examinant la structure autour de la résine : on trouvera généralement à côté de la résine injectée des plis déformés ou des fibres mal alignées résultant des dommages qui ont motivé la réparation. Les zones riches en résine, particulièrement entre les plis, sont sujettes aux ruptures par cisaillement, ce qui peut être indiqué par la présence de lancettes, comme il est expliqué plus haut et illustré à la Figure III-9-37.

9.9 ANALYSES EN LABORATOIRE

9.9.1 En plus des analyses d'éprouvettes en matériaux composites, quelques-uns des essais les plus souvent effectués en laboratoire sont : 1) les essais de pièces métalliques pour déceler la présence de fissures de fatigue, les défauts de soudage, les matériaux ayant des propriétés inférieures aux normes, les défauts de traitement thermique, les fissures de corrosion sous contrainte, les dimensions incorrectes, etc., et 2) les essais sur les dépôts, les éraflures, les entailles, etc., afin de déterminer la nature de la substance et le sens dans lequel les forces ont été appliquées.

9.9.2 Lorsqu'un laboratoire reçoit un échantillon, il peut le soumettre à divers essais selon les besoins. Un examen microscopique, des essais thermiques et des essais de résistance facilitent la détermination des causes dans le cas d'une rupture structurelle. Il est possible, au moyen d'essais de ce genre, d'identifier les fissures de fatigue ou de corrosion, les défauts de soudage, les défauts de traitement thermique, les matériaux ayant des propriétés inférieures aux normes, des dimensions incorrectes, etc. Les analyses chimiques d'échantillons de matériaux peuvent aussi être utiles, particulièrement pour l'identification des dépôts.

9.9.3 On procède souvent à des essais de résistance de la cellule de l'aéronef, ce qui implique la mesure des charges structurelles au moyen d'extensomètres disposés aux endroits appropriés pour les essais en vol ou les essais statistiques au sol. On peut également procéder à la recherche d'erreurs éventuelles des systèmes à l'aide de divers enregistreurs.

9.9.4 Lorsqu'on soupçonne que les dommages ont été causés par des circonstances exceptionnelles, telles que l'emploi d'un engin explosif, il est nécessaire de disposer de nombreux échantillons prélevés sur les débris : poussière, rembourrages, garnitures, dépôts, morceaux de papier, fils électriques, etc. Même le plus petit objet d'aspect ou de nature suspecte ne doit pas être négligé. Tous les échantillons doivent être placés dans des récipients propres soigneusement scellés, portant une étiquette remplie et datée.

9.10 FRACTOGRAPHIE

Généralités

9.10.1 L'examen et l'analyse des faciès de rupture, appelés analyses fractographiques ou plus généralement fractographie, permettent en général à l'enquêteur d'identifier le type et la cause d'une rupture. Cette technique repose sur le fait que l'identification précise de la topographie macroscopique et microscopique des faciès de rupture peut être utilisée pour établir avec certitude le mode de rupture (surcharge, fatigue, corrosion sous tension, etc.). Une fois le mode de rupture identifié, l'analyse des charges, de la géométrie, de la déformation, de l'environnement, etc., peut permettre de déduire la cause de la rupture et l'ordre dans lequel elle s'est produite.

Examen initial

9.10.2 Un examen initial à l'œil nu peut parfois permettre une analyse suffisamment précise pour identifier la cause de la rupture si l'élément brisé est suffisamment grand. En général, cependant, l'enquêteur sur le terrain utilise une loupe ayant un grossissement d'environ 10x. Cet instrument (ainsi qu'un appareil macrophotographique pour l'enregistrement permanent des détails) permettra en général à l'enquêteur sur le terrain d'identifier et de choisir les éléments ayant subi une rupture susceptible d'être une des causes principales de l'accident.

Examen en laboratoire

Stéréomicroscopie

9.10.3 Pour procéder à une analyse plus précise, les éléments suspects doivent être envoyés à un laboratoire, ou tout au moins au bureau des enquêtes, pour un examen plus approfondi. Un bon stéréomicroscope optique permettra de faire un macroexamen avec un grossissement de 50x et d'obtenir une photo couleur des détails révélés par l'examen. La possibilité de prendre une photo couleur est souvent très importante pour enregistrer les détails des produits de corrosion, des écailles de peinture ou des dépôts présents sur les faciès de rupture.

Microscope électronique à balayage

9.10.4 Pour de nombreux métaux utilisés en mécanique, l'analyse du mode de rupture exige un examen de la microtopographie de la rupture (forme de la surface de la rupture sur quelques millièmes de centimètre au lieu de quelques centimètres). Les microscopes optiques dont disposent généralement les laboratoires permettent d'examiner des surfaces planes avec des grossissements de 2 000 à 3 000x (ces microscopes sont très utilisés en métallographie, par exemple, car ils permettent à l'enquêteur d'examiner une section polie et attaquée par un réactif d'un morceau de métal prélevé dans l'élément incriminé, afin d'en identifier la structure et de déduire les méthodes de fabrication et de traitement thermique et de déceler les dommages éventuels ultérieurs dus à l'environnement). Malheureusement, les ruptures sont rarement planes et plus le grossissement est fort, plus la profondeur de champ est faible ; avec un grossissement de 1 000x, la quasi-totalité de la surface de la rupture sera donc floue et, par conséquent, il sera impossible de procéder à une véritable analyse de la rupture et d'en comprendre la fractographie.

9.10.5 Ce problème peut généralement être résolu en utilisant le microscope électronique à balayage (SEM). L'échantillon à examiner est placé sous vide mais cela ne pose en général aucun problème lorsqu'il s'agit d'échantillons inorganiques. Ce microscope fonctionne en explorant la surface de l'échantillon à l'aide d'un fin pinceau d'électrons et en recueillant les électrons émis par la surface. Le signal qui en résulte est utilisé pour moduler la brillance d'un faisceau qui balaie un écran au même rythme que le faisceau d'exploration de l'échantillon. L'image observée est très semblable à une image optique mais ce microscope présente une profondeur de champ de 300 à 500 fois supérieure à celle du microscope optique de même grossissement. Théoriquement, le grossissement peut être augmenté indéfiniment car c'est uniquement une question de rapport entre la surface balayée sur l'écran et la surface balayée par le faisceau d'exploration à la surface de l'échantillon. Comme la surface balayée sur l'échantillon peut être très faible, les examens à l'aide du SEM peuvent donner des grossissements de 5 à 50 000x. La plupart des analyses fractographiques peuvent être effectuées dans une gamme de grossissements allant de 100 à 10 000x.

Microscope électronique à transmission

9.10.6 Il est parfois nécessaire d'agrandir l'image de l'échantillon plus encore que ne le permet le SEM. Dans ce cas, l'enquêteur peut avoir recours au microscope électronique à transmission (TEM). Il est intéressant de noter que ce type de microscope est plus ancien que le microscope électronique à balayage, qui date des années 1960. Un des inconvénients des TEM est qu'ils n'utilisent pas l'échantillon lui-même mais une copie de l'échantillon et qu'ils ne peuvent couvrir qu'une très petite surface (environ 2 mm x 2 mm) qui peut donc ne pas être représentative et mener à des conclusions erronées. En pratique, on prend une empreinte de la rupture à l'aide de plastique moulable ; on retire le

plastique et on le « masque » avec une très mince couche de métal, puis on dissout la matière plastique et on fait passer un large faisceau d'électrons à travers la pellicule métallique (qui est la copie du faciès de rupture). L'image produite en recueillant les électrons qui traversent la pellicule métallique peut être interprétée pour déduire la microfractographie de l'échantillon (l'image ne ressemble pas à une image optique mais plutôt à une radiographie). Étant donné que ce microscope utilise des électrons au lieu de la lumière visible, la limite de son grossissement (comme dans le cas de la lumière) est la longueur d'onde des électrons, ce qui permet des grossissements pouvant aller jusqu'à 1 000 000x.

Conclusion

9.10.7 Dans la pratique, l'enquêteur dispose, pour déterminer la nature de la rupture, d'une gamme de moyens allant de l'œil nu au microscope électronique à transmission en passant par la loupe, le stéréomicroscope optique et le microscope électronique à balayage. Le grand avantage de toutes ces techniques est que l'échantillon n'est absolument pas endommagé (au moins lorsqu'il s'agit d'alliages utilisés en mécanique) et l'échantillon peut ainsi être de nouveau utilisé pour d'autres examens sous sa forme originale.

9.11 PROBLÈMES DES AÉRONEFS VIEILLISSANTS

Généralités

9.11.1 La durée de vie utile prévue d'un aéronef ou d'un élément de l'aéronef est souvent spécifiée dans la phase de conception en nombre d'heures totales d'exploitation ou de vol, en nombre total de vols ou peut-être en nombre de certains profils de mission. Que la structure ou ses éléments atteignent réellement ces nombres dépend des propriétés des matériaux de l'aéronef et de leur capacité de résister aux effets des utilisations réelles. Il convient de souligner que ces utilisations ne se limitent pas seulement au nombre d'heures de vol. Lorsque l'aéronef est en vol, les facteurs dynamiques (fatigue, vibrations aéroélastiques, vibrations et, à un moindre degré, fluage) sont les principaux déterminants de la durée de vie utile d'un élément ; lorsqu'il est au sol, la corrosion devient le principal problème.

Corrosion

9.11.2 La corrosion est parfois décrite comme la tentative de la nature de retourner un métal à son état naturel, c'est-à-dire à l'oxyde métallique d'où il a été tiré. Si une structure métallique n'est pas protégée, l'environnement dégradera l'intégrité chimique et physique du métal jusqu'à conduire à la rupture. C'est effectivement ce qui se produit, mais les enquêteurs ne doivent pas oublier que les agents corrosifs détériorent tous les types de matériaux. Les céramiques, comme les métaux, peuvent réagir aux gaz environnementaux, particulièrement aux températures élevées, et le matériau peut être détruit par la formation de divers composés. Les composites se corrodent si l'humidité s'infiltré jusqu'à la matrice époxyde et les polymères, en général, se dégradent lorsqu'ils sont exposés à l'oxygène à des hautes températures. Certains matériaux sont endommagés par des sources de corrosion moins courantes comme les radiations ou les bactéries.

9.11.3 La corrosion est un phénomène naturel et toujours présent et, comme la fatigue ou le fluage, elle est cumulative et irréversible. Dans les paragraphes qui suivent, on entendra par corrosion *la destruction d'un matériau par des moyens chimiques ou électrochimiques*.

Corrosion chimique

9.11.4 La corrosion chimique se produit lorsqu'un agent corrosif dissout un matériau et forme des produits de corrosion, par exemple, l'eau qui attaque le fer et qui produit la rouille. Le même effet peut être observé sur le revêtement d'un aéronef non peint exposé à l'oxygène. Une mince pellicule d'oxyde d'aluminium se forme rapidement. Cependant, une fois que cette pellicule est formée la corrosion s'arrête. Cette propriété fait que les alliages d'aluminium soient souvent considérés comme résistants à la corrosion mais, malheureusement, l'oxyde est poudreux et sa valeur comme couche protectrice est limitée.

9.11.5 La lixiviation sélective est une forme de corrosion dans laquelle un des éléments constituant de l'alliage est attaqué et dissous, par exemple, la dézincification du laiton contenant plus de 15 % de zinc. Le processus se produit à des hautes températures et le laiton devient poreux et faible.

9.11.6 Les polymères subissent aussi des attaques chimiques. Dans ce cas, ce sont des solvants qui se diffusent entre les chaînes moléculaires produisant des polymères plus mous et moins résistants. Des taux de diffusion élevés peuvent causer un gonflement qui peut conduire à une fissuration sous tension. Ce phénomène est parfois observé dans l'action de l'eau sur le nylon.

9.11.7 Un dernier exemple de cette forme de corrosion est probablement connu des pilotes et des mécaniciens. Il s'agit d'une décoloration rougeâtre et bleuâtre ou l'apparence ternie de certaines sections des tuyères ou des tuyères d'échappement. Connue sous le nom d'oxydation à haute température, cette réaction se produit généralement sans la présence d'humidité aqueuse.

Corrosion électrochimique

9.11.8 La corrosion électrochimique est la forme la plus courante d'attaque corrosive des métaux. Elle se produit en général lorsque les atomes du métal cèdent des électrons et forment des ions. Cette action a pour effet la consommation progressive du métal et la formation d'un produit de corrosion.

9.11.9 Le processus survient le plus fréquemment dans un milieu aqueux de presque n'importe quel liquide ou dans l'air humide, ce qui produit un courant électrique et l'effet résultant s'assimile à celui d'une pile.

9.11.10 Comme la pile, la cellule électrochimique comprend quatre éléments :

- a) l'*anode*, qui cède des électrons au circuit et se corrode ;
- b) la *cathode*, qui accepte les électrons du circuit ;
- c) un *électrolyte* liquide, qui fournit un chemin conducteur pour les ions métalliques de l'anode à la cathode ;
- d) une connexion électrique entre l'anode et la cathode pour transporter les électrons (généralement un contact métal-métal).

9.11.11 Ces quatre éléments sont illustrés à la Figure III-9-66. Ce sont les mêmes en corrosion électrochimique ou en électroplacage. L'élimination de l'un quelconque de ces quatre éléments met effectivement fin à l'un ou l'autre processus.

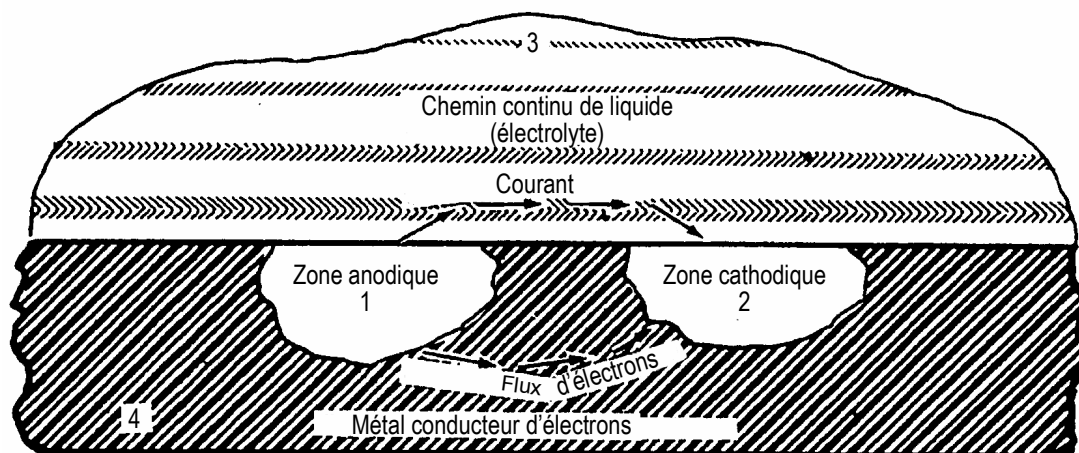


Figure III-9-66. Cellule électrochimique type

Attaque uniforme

9.11.12 Lorsqu'un métal est exposé à un agent corrosif qui agit comme un électrolyte, certaines zones de la surface peuvent être anodiques par rapport à d'autres zones. L'emplacement des zones anodiques et cathodiques se déplace et peut même s'inverser avec le temps. Comme les zones changent constamment, l'effet final est de causer une corrosion uniforme sur la surface du métal (Figure III-9-67).

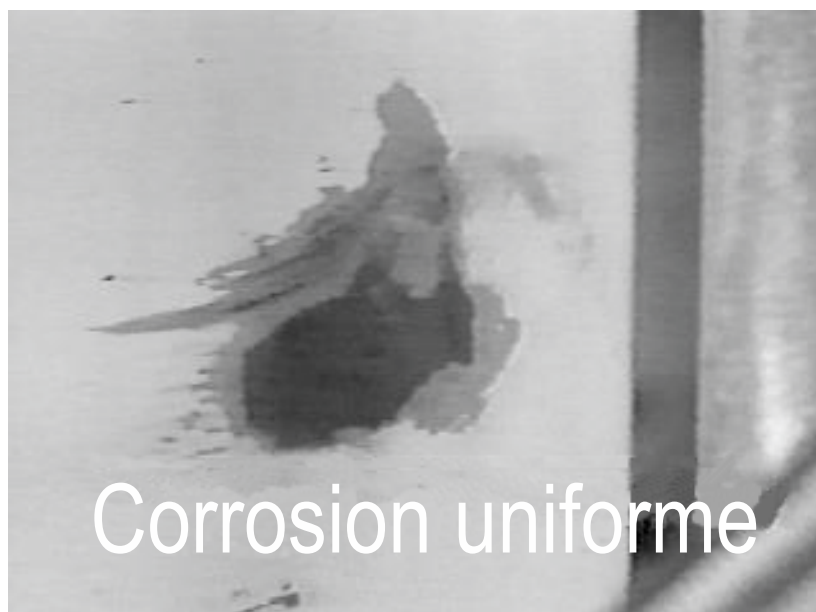


Figure III-9-67. Corrosion uniforme

Corrosion par piqûres

9.11.13 La piqûration est la forme la plus courante de corrosion des alliages d'aluminium et de magnésium. Elle commence généralement dans de très petites zones n'importe où sur les surfaces non protégées du métal et apparaissent d'abord comme des points blancs ou gris, puis comme un résidu poudreux (Figure III-9-68).

9.11.14 Les piqûres de la surface ne semblent pas graves, mais les dommages causés à l'intérieur du métal sont extrêmement importants par rapport aux dommages extérieurs. Une piqûre a généralement un bord net, bien défini, avec des parois orientées à peu près perpendiculairement à la surface. Elle peut pénétrer profondément dans le métal et la rupture peut survenir avant que les effets à la surface ne révèlent l'étendue des dommages.

9.11.15 Les solutions aqueuses, acides, alcalines et salines agissent toutes comme des électrolytes dans la piqûration.

Corrosion galvanique

9.11.16 La corrosion galvanique peut se produire lorsque deux métaux différents sont connectés électriquement et qu'ils sont soumis au même élément corrosif. Ce processus est souvent appelé corrosion de métaux dissemblables. Dans ce cas, un métal joue le rôle d'anode, qui cède des électrons de valence au métal moins actif, la cathode, créant une réaction typique de cellule électrochimique.

9.11.17 La corrosion galvanique est présente dans les structures d'aéronef où deux métaux sont en contact et où l'interface est exposée à l'eau ou à d'autres fluides. L'acier et l'aluminium ou le cuivre et l'aluminium nus sont des exemples de combinaisons qui peuvent subir une corrosion galvanique. L'action galvanique est visible au point de corrosion localisée de l'anode (métal actif) près de la jonction entre les deux métaux. Une troisième combinaison, entre le magnésium et l'acier, est illustrée à la Figure III-9-69.

9.11.18 L'activité entre des combinaisons de métaux différents peut être évaluée qualitativement à partir d'une série galvanique de métaux. En général, plus les deux métaux sont éloignés l'un de l'autre dans la série, plus ils seront actifs une fois combinés.

Corrosion caverneuse

9.11.19 Si l'humidité s'infiltré dans des fissures ou dans les joints de structures, elle peut causer une forme de corrosion dite caverneuse ou corrosion de cellule de concentration d'oxygène, qui désigne la cellule électrolytique formée par l'humidité à la surface du métal. L'humidité protège le métal de l'oxygène et crée un déséquilibre dans la quantité d'oxygène disponible pour le métal au-dessus de l'humidité. Cette différence de concentration amène l'extrémité de la fissure à agir comme une anode pour le métal de base environnant.

Corrosion intergranulaire

9.11.20 La corrosion intergranulaire survient lorsqu'il se produit une activité de corrosion galvanique au niveau microscopique. Dans ce cas, les grains d'un alliage dans lequel le traitement ou une précipitation ultérieure d'un métal constituant modifie les joints des grains et les rend chimiquement différents de l'intérieur (par ex., ions de cuivre dans un alliage d'aluminium de la série 2024). Si un électrolyte atteint ces grains, il se produit une action galvanique qui fissure et affaiblit l'alliage. La corrosion feuilletante des alliages d'aluminium et la sensibilisation des aciers inoxydables sont des formes de corrosion intergranulaire (Figures III-9-70 et III-9-71).

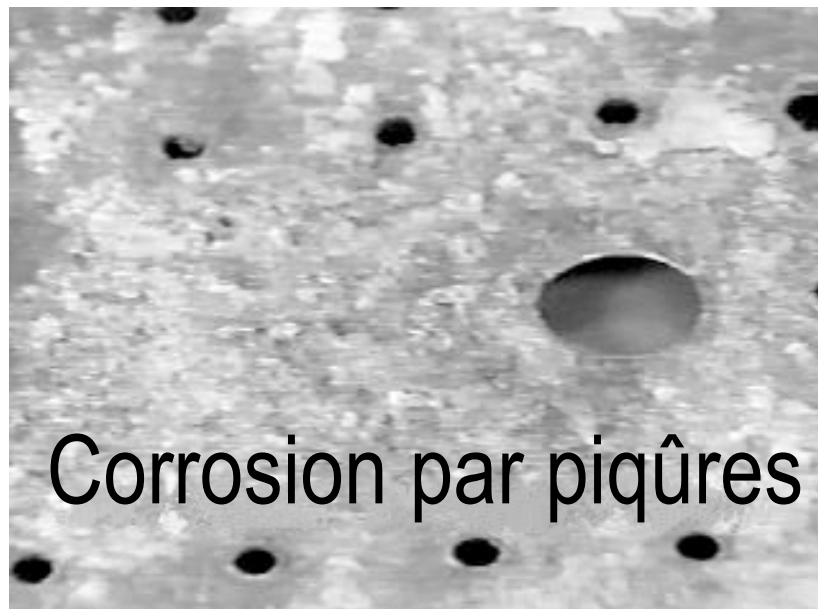


Figure III-9-68. Corrosion par piqûres

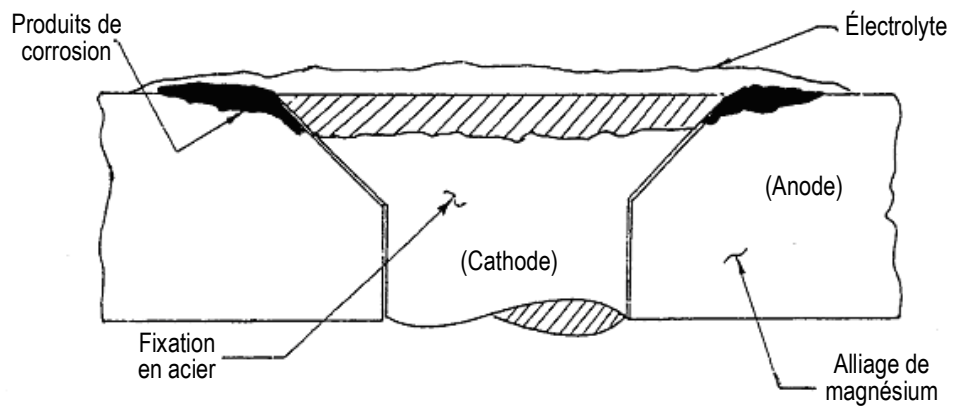


Figure III-9-69. Cellule de corrosion galvanique formée par une fixation en acier dans un alliage de magnésium

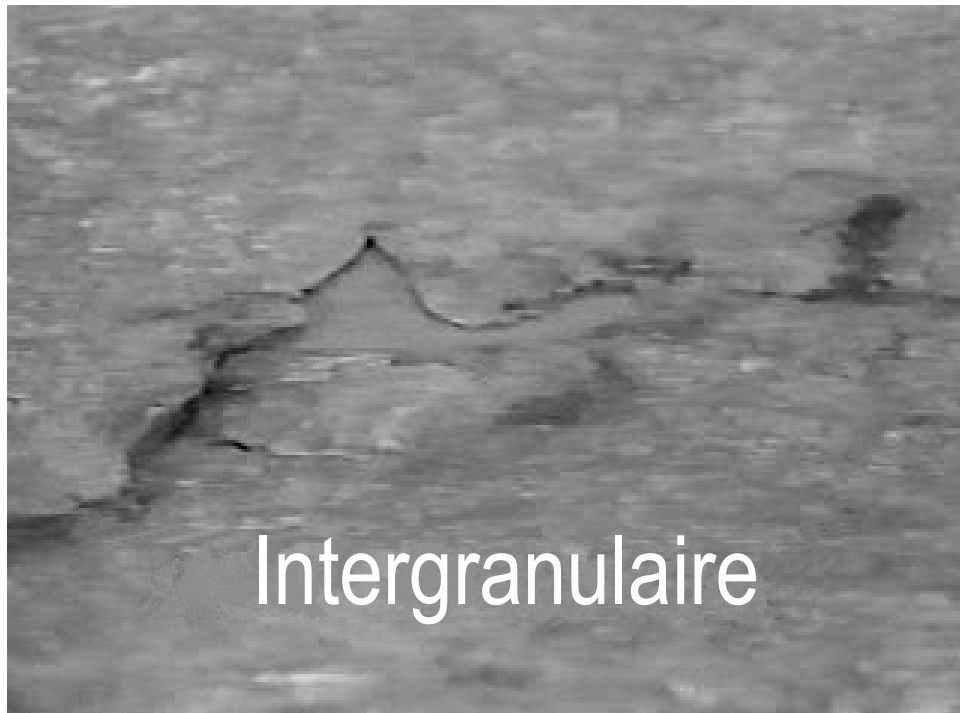


Figure III-9-70. Rupture finale associée à une corrosion intergranulaire

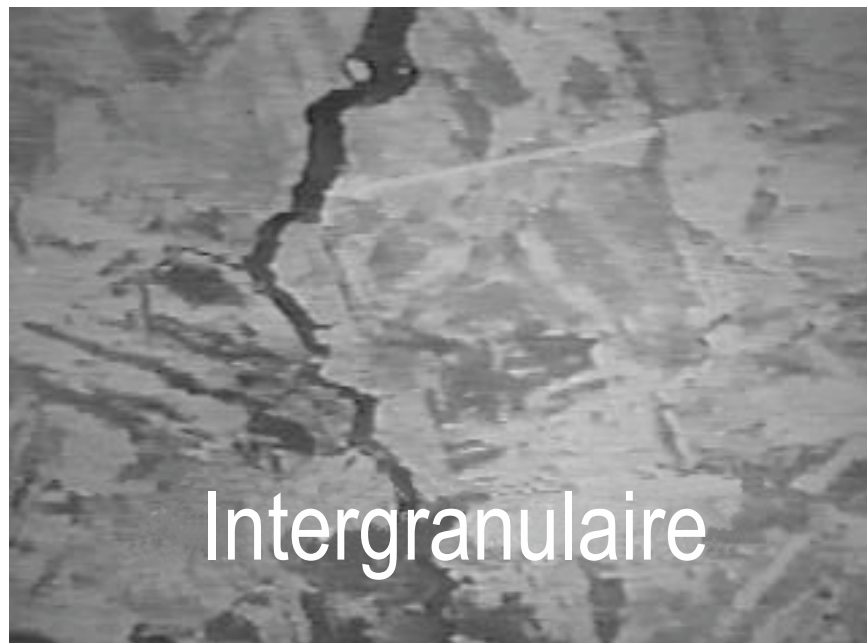


Figure III-9-71. Photomicrographie de la structure des grains d'un métal endommagé par la corrosion intergranulaire

Corrosion feuilletante

9.11.21 La corrosion feuilletante est une forme de corrosion intergranulaire dans laquelle la corrosion attaque l'intérieur du métal dans des plans parallèles à la surface. Elle est souvent appelée fragmentation longitudinale des structures en alliage d'aluminium laminé ou extrudé. Le processus de fabrication rend les grains plus longs et plus directionnels et si des agents corrosifs atteignent un bord où les joints de grains sont plus exposés, la pénétration dans le métal peut être importante.

9.11.22 La forme allongée des grains freine le mouvement de la corrosion vers la surface et l'oriente plutôt le long d'un plan parallèle. La corrosion des joints de grains allongés produit un oxyde d'aluminium d'un gris pâle. À mesure qu'il se propage, le produit de corrosion provoque d'abord un gonflement puis une fissure entre les grains. Le métal semble ensuite se séparer et s'exfolier comme s'il était composé de couches (Figure III-9-72).

Sensibilisation

9.11.23 Les vrais aciers inoxydables contiennent un minimum de 12 % de chrome et peuvent en contenir jusqu'à 30 %. À 12 %, la teneur en chrome est suffisante pour former un mince film d'oxyde sur la surface. Ce film donne aux aciers une bonne résistance à la corrosion, d'où le terme « inoxydable ».

9.11.24 Cependant, les aciers inoxydables contiennent aussi environ 0,08 % de carbone. En général la présence du carbone ne pose pas problème, mais si l'acier de type 304 est chauffé à une température entre 455 et 788° C (850 et 1 450° F), le carbone se combine au chrome pour former du carbure de chrome. Les carbures se forment dans les joints de grains et appauvrissent les zones limites du chrome. Les limites perdent ainsi leur film protecteur d'oxyde de chrome et la corrosion intergranulaire se produit en présence d'eau légèrement acide. Cet effet s'appelle « sensibilisation ». Un acier sensibilisé est un acier où se produit une corrosion intergranulaire par précipitation du carbure de chrome le long des joints de grains.

Corrosion filiforme

9.11.25 La corrosion filiforme a la forme de filaments distribués aléatoirement souvent comparés aux traces laissées par les insectes foreurs sous l'écorce des arbres. Elle peut se produire sur la surface des revêtements métalliques, sous des couches protectrices comme la peinture à base de polyuréthane, et dans les matrices époxydes de certains composites.

9.11.26 Bien qu'elle ne soit pas très destructrice par elle-même, la corrosion filiforme peut faciliter l'attaque par d'autres formes de corrosion. Dans les surfaces composites, elle peut conduire au délaminage de la couche composite (Figure III-9-73).

Fissuration par corrosion sous contrainte

9.11.27 Ce type de dommage est causé par les effets combinés d'une contrainte de traction et d'un milieu corrosif. La contrainte peut être une contrainte résiduelle conservée ou le résultat de charges de traction. Individuellement, le niveau de contrainte et les effets de la corrosion n'ont pas d'incidences graves, mais leur action synergique cause des ruptures à des niveaux de contrainte bien au-dessous de la limite d'élasticité du métal.

9.11.28 La fissuration par corrosion sous contrainte commence généralement par la dégradation de la couche protectrice de la surface du métal, ouvrant la porte à l'attaque corrosive. La corrosion électrochimique produit alors un réseau de minces fissures qui se ramifient abondamment le long des joints de grains (fissures secondaires qui se propagent de part et d'autre de la fissure principale). Les fissures se forment perpendiculairement à l'axe principal de la contrainte de traction, qui peut être une contrainte appliquée ou une contrainte résiduelle de la pièce. L'origine de la fissuration peut souvent être déterminée par la présence d'un produit corrosif. Cependant, le métal lui-même ne présentera que peu d'attaque uniforme.

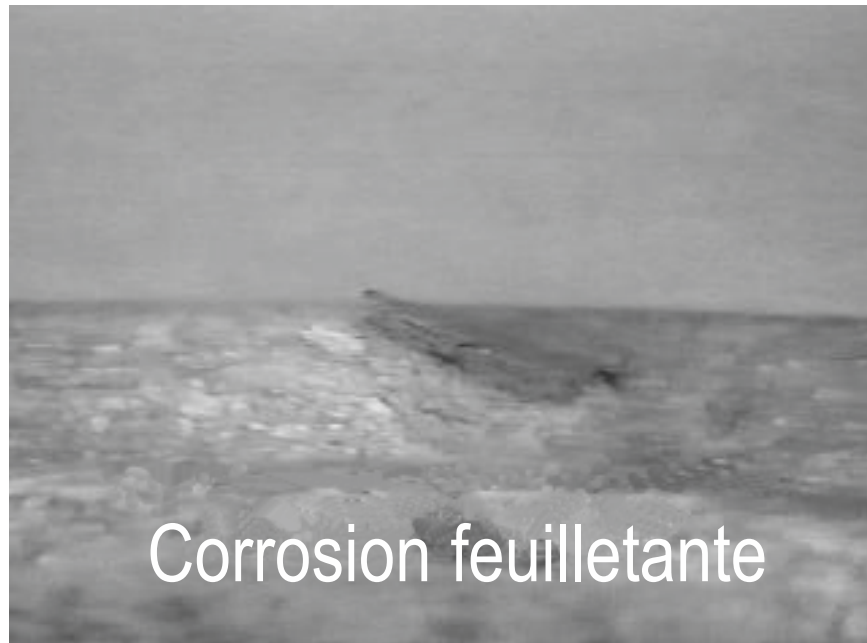


Figure III-9-72. Corrosion feuilletante

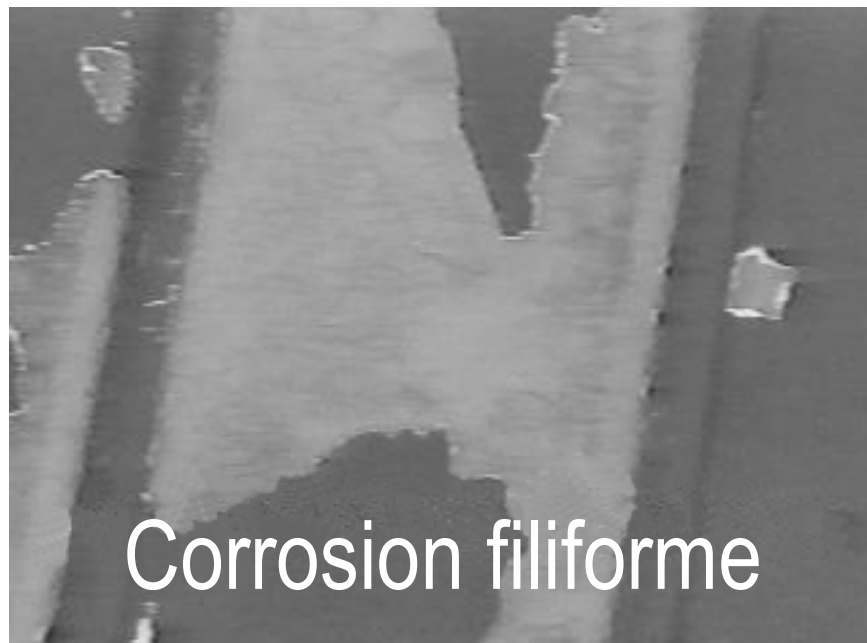


Figure III-9-73. La corrosion filiforme peut se produire dans les métaux et dans certains composites.

9.11.29 La rupture finale peut survenir soudainement sous forme de rupture fragile, même dans les métaux ductiles. En outre, la corrosion peut ressembler aux lignes d'arrêt de la fatigue et la fissuration peut être confondue avec la fragilisation par l'hydrogène. L'enquêteur devra donc peut-être s'en remettre à une analyse en laboratoire pour obtenir une réponse finale.

9.11.30 Les alliages à très haute résistance, les aciers trempés, les alliages d'aluminium et le titane sont sujets à la fissuration par corrosion sous contrainte (Figure III-9-74).

Corrosion-fatigue

9.11.31 Comme son nom l'indique, la corrosion-fatigue est le résultat de l'exposition simultanée d'un métal à un milieu corrosif et à la fatigue résultant de contraintes cycliques de traction. Une fois qu'elle a pénétré le revêtement protecteur, la piqûration peut créer des concentrateurs de contraintes et des contraintes cycliques qui peuvent amorcer une ou plusieurs fissures de fatigue.

9.11.32 Il est probable aussi que les fissures de fatigue se développeront en premier, créant un passage pour l'agent corrosif. Dans un cas comme dans l'autre, les effets de la corrosion à l'extrémité de la fissure accéléreront la propagation des fissures par rapport à un environnement sans corrosion. Ces effets combinés sont préoccupants parce qu'ils peuvent considérablement réduire à la fois la résistance à la fatigue et la durée de vie en fatigue de l'élément.

9.11.33 La tâche de l'enquêteur peut encore être compliquée par la tendance de l'agent corrosif à masquer le faciès de rupture et ses marques clés. Il faudra peut-être ici aussi faire une analyse en laboratoire (Figure III-9-75).

Corrosion par frottement

9.11.34 Le frottement par contact est une forme d'érosion causée par un frottement de faible amplitude entre des surfaces en contact subissant de fortes charges. L'usure qui s'ensuit enlève les couches durcies ou protectrices de la surface et expose le métal de base. L'oxygène ou d'autres agents corrosifs peuvent ensuite envahir et attaquer ce métal, causant la corrosion par frottement.

9.11.35 La partie mécanique de ce type de corrosion peut être identifiée par la rugosité et la décoloration de la surface. Les aciers présentent une décoloration rouge-brun ; les débris de frottement de l'aluminium sont généralement noirs et poudreux. Le frottement est aussi souvent associé à l'origine des fissures de fatigue. Une fois que le dommage par frottement s'est produit, la zone est susceptible d'être attaquée par des éléments corrosifs et d'être endommagée encore plus par la corrosion par frottement (Figures III-9-76 et III-9-77).

Fragilisation par l'hydrogène

9.11.36 Certains métaux et alliages, particulièrement les aciers à haute résistance, sont sensibles à la fissuration causée par la présence indésirable d'hydrogène dans la structure cristalline. Les atomes d'hydrogène peuvent être introduits durant le processus de fabrication (par exemple, l'électroplacage) ou ils peuvent provenir de l'eau présente dans l'atmosphère ou des solutions de lavage si le métal nu est exposé durant l'exploitation.

9.11.37 La fragilisation par l'hydrogène se produit souvent dans les composants des trains d'atterrissage, qui sont généralement des structures d'acier revêtues de cadmium. Avec le temps, l'hydrogène peut se collecter à l'interface entre l'élément en acier et sa couche de cadmium, où il s'étend et cause une fissuration catastrophique. Pour prévenir ce dommage, le train d'atterrissage et les éléments similaires doivent être cuits à environ 200 °C (400 °F) pendant plusieurs heures pour en expulser l'hydrogène.

9.11.38 Les fissures de fragilisation par l'hydrogène sont normalement intergranulaires et, par conséquent, hautement ramifiées. Le faciès de rupture ressemble à celui d'une rupture fragile et peut facilement être confondue avec une fissuration de corrosion sous contrainte.



Figure III-9-74. La fissuration par corrosion sous contrainte peut être identifiée par la présence de plusieurs fissures fines dans les alliages à haute résistance.

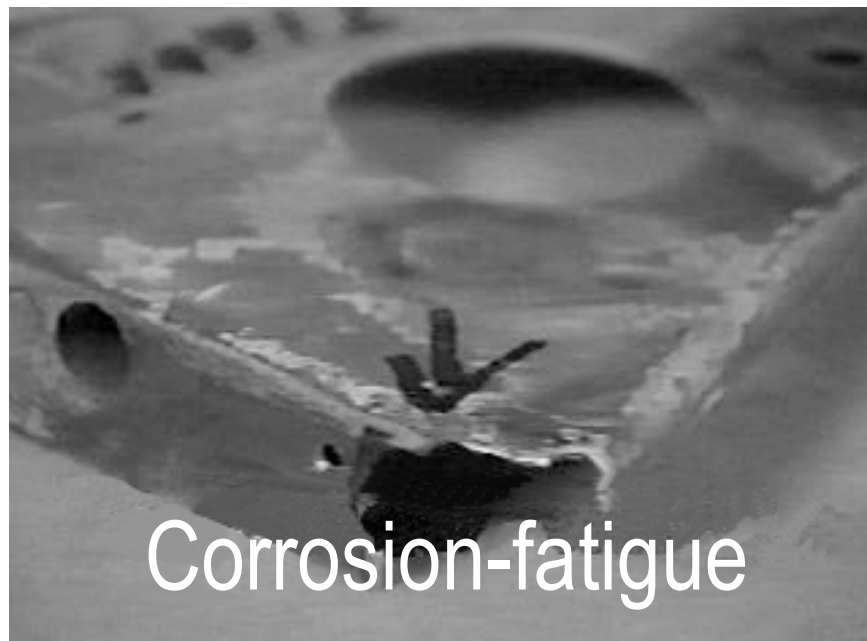


Figure III-9-75. La corrosion-fatigue est l'action combinée des processus de corrosion et de fatigue dans un métal.

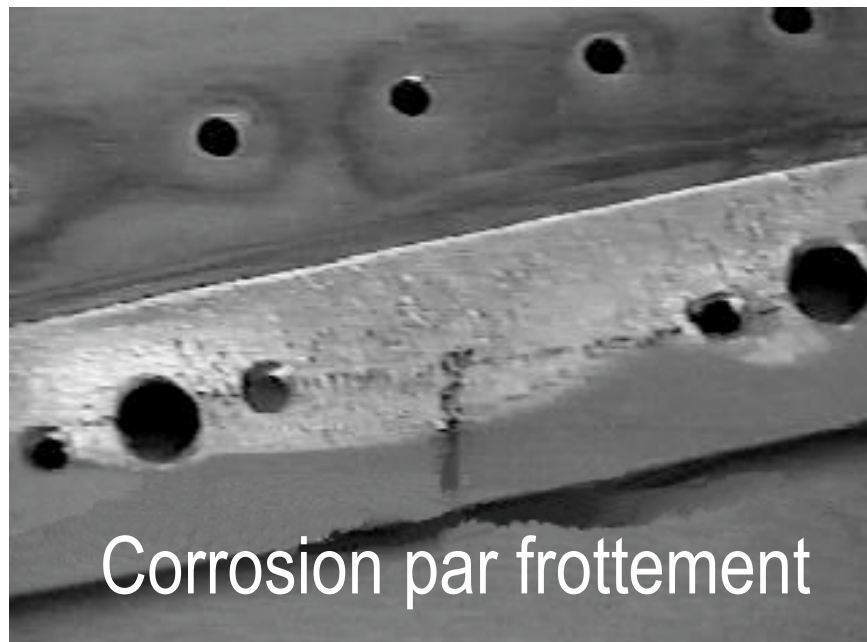


Figure III-9-76. Corrosion par frottement

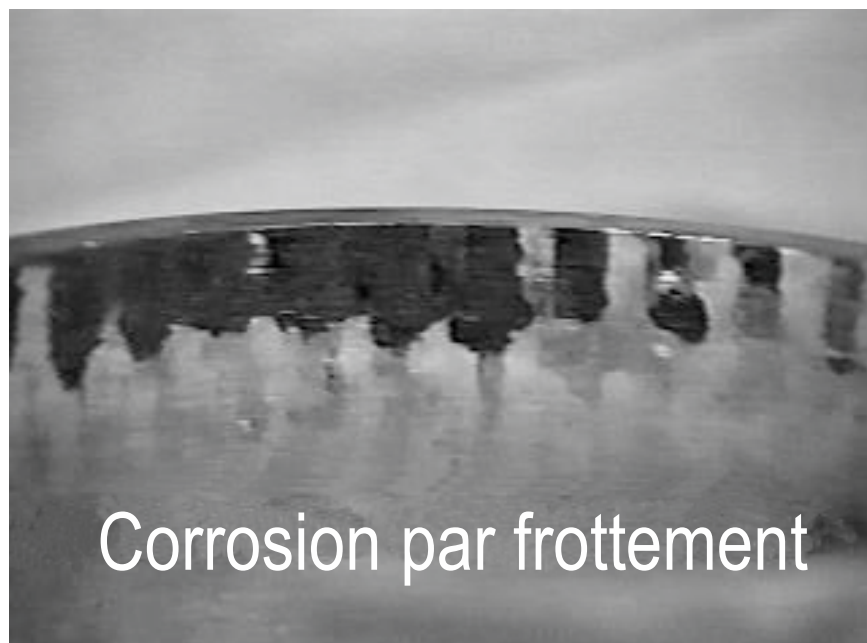


Figure III-9-77. Dommages causés par la corrosion par frottement.
Cette corrosion peut être considérée principalement comme
une usure mécanique combinée à une action corrosive.

Câblage de l'aéronef

9.11.39 À la suite du tragique accident du vol 800 de la TWA (1996) et du vol 111 de la Swissair (1998), une plus grande importance a été accordée aux défaillances du matériel électronique, particulièrement du câblage. Le câblage vieillit en même temps que la structure de l'aéronef, et l'isolant et le revêtement des câbles peuvent se fragiliser et se fissurer, exposant les fils de cuivre. Ces dommages ont pour conséquences la formation d'arcs, l'incendie, les courts-circuits et les perturbations électromagnétiques.

9.11.40 Les faisceaux de câbles peuvent subir des dommages mécaniques par frottement avec les éléments de la structure ou les faisceaux adjacents. À des hautes températures, les polymères des isolants sont sujets à la décomposition chimique. La présence d'agents corrosifs peut aussi causer d'autres dommages chimiques. Ces agents sont multiples : l'humidité toujours présente, le carburant, l'huile, le fluide hydraulique, les liquides utilisés dans l'office et les toilettes et même les liquides anticorrosion utilisés pour la protection des métaux.

Formation d'arcs

9.11.41 De nombreuses conditions peuvent conduire à une panne électrique, mais la plus grave est peut-être la formation d'arcs. L'arc est une décharge électrique qui se produit entre deux conducteurs électriques. Si un câble situé près de la structure est à nu, il y a risque de formation d'arcs et d'incendie.

9.11.42 Le personnel de sécurité cite quatre types d'arcs, ou de défauts de câbles, associés à un isolant endommagé :

- a) *Effilochage*. Formation d'arcs parce que l'isolant a été endommagé par usure ou frottement jusqu'à mettre le fil à nu, ouvrant ainsi un chemin pour la formation d'arcs.
- b) *Crépitement*. Il s'agit de production d'arcs de courte durée, de l'ordre de quelques millisecondes. La tension chute normalement à un niveau faible tandis que l'intensité du courant électrique est multipliée par 10 ou plus.
- c) *Cheminement d'arc en milieu humide*. Il s'agit d'une forme de crépitement causé et soutenu par un isolant endommagé par l'humidité. Le cheminement d'arc en milieu humide cause la carbonisation de l'isolant.
- d) *Cheminement d'arc en milieu sec*. Ce phénomène provoque la perte d'un faisceau de câbles au complet. Parce qu'il exige la présence de carbone libre, ce type de défaillance survient dans les matériaux isolants à haute teneur en carbone, comme le polyimide ou le Kapton.

Examen du câblage

9.11.43 L'inspection visuelle demeure la méthode la plus courante de vérification des faisceaux de câbles mais, vu qu'un gros porteur comprend plus de 200 km de câblage qui serpente dans la cellule, il est évident que de nombreuses sections de câblage ne seront pas inspectées. L'enquêteur peut faire appel à plusieurs techniques basées sur la réflectométrie déjà employées ou en développement :

- a) *Réflectométrie temporelle (TDR)*. Cette technique est employée lorsqu'on soupçonne un problème de câblage. Une impulsion rectangulaire est injectée dans le câble et l'impédance, la terminaison et la longueur du câble créent une signature unique sur le signal réfléchi. L'interprétation des résultats peut être difficile et doit être faite par un opérateur spécialisé.
- b) *Réflectométrie par analyse de l'onde stationnaire (SWR)*. La SWR est une méthode plus simple (et moins chère) que la TDR ; elle consiste à injecter une onde sinusoïdale dans un câble. Le signal

réfléchi est aussi sinusoïdal et les deux signaux se combinent pour former une onde stationnaire dans le câble. L'analyse des crêtes et des minimums de l'onde permet d'obtenir la longueur et la charge de terminaison du câble.

- c) *Réfectométrie fréquentielle (FDR)*. Cette technique utilise aussi des ondes sinusoïdales, mais mesure la différence de phase entre le signal incident et le signal réfléchi. Les défauts de la ligne produisent des résonances entre les signaux qui peuvent être interprétées par l'opérateur. Une fois complètement développé, ce système pourrait permettre de tester automatiquement les câbles avant le vol.

9.11.44 Étant donné les nombreux problèmes de câblage qui surviennent en vol, des travaux sont en cours pour mettre au point des systèmes filaires intelligents. Ces systèmes utiliseront des composants microminiaturisés pour assurer une surveillance constante des câbles avant et durant le vol. L'objectif ultime de ces systèmes est d'arriver à détecter les défaillances et à les corriger dès qu'elles se produisent.

9.11.45 Les nouveaux avions auront aussi en équipement standard des disjoncteurs anti-arc comme protection contre la menace que posent la formation d'arcs et les incendies. Munis d'une électronique sophistiquée, ces dispositifs peuvent distinguer les surcharges de courant normales des courants d'arc et répondre de manière appropriée dans chaque cas. Ils sont actuellement installés dans de nombreux avions plus anciens et sont configurés pour pouvoir être utilisés en concomitance avec les disjoncteurs thermosensibles ordinaires ou les remplacer.

9.12 PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE UTILE

Généralités

9.12.1 En raison de facteurs économiques surtout, de nombreux exploitants préfèrent remettre à neuf et conserver leurs avions plutôt que d'en acheter de nouveaux. Ce fait a été reconnu lors de l'adoption du programme mondial d'avions vieillissants à une conférence internationale tenue en 1988. Au moment de la tenue de cette conférence, le nombre d'avions ayant dépassé leur durée de vie théorique dépassait déjà 20 %. Ce nombre n'a pas cessé d'augmenter grâce à une meilleure analyse des facteurs de vieillissement, de meilleures techniques d'inspection et d'une meilleure conscientisation des exploitants et des spécialistes de la maintenance.

9.12.2 Les travaux actuels pour prolonger la durée de vie utile des avions sont principalement axés sur le rôle destructif de la fatigue, la principale cause de ruptures structurelles, et de la corrosion, l'aspect le plus coûteux du maintien de l'intégrité structurelle.

Procédures de prolongation de la durée de vie utile

Méthode axée sur la durée de vie sûre — Fatigue

9.12.3 Cette méthode prévoit des calendriers de remplacement en service des éléments sur la base d'essais de fatigue en laboratoire et de facteurs de sécurité modifiés. Lorsque l'élément atteint sa date de remplacement, sa durée de vie sûre est considérée comme expirée et il est retiré même s'il ne présente pas de fissures de fatigue. Les faiblesses de cette méthode sont : 1) les essais en laboratoire ne tiennent pas compte de la présence de défauts de fabrication ni de défauts de maintenance, et 2) les calendriers de remplacement ne sont pas calculés statistiquement. Ce dernier cas entraîne le retrait prématuré d'éléments sûrs.

Méthode axée sur la sécurité intégrée — Fatigue

9.12.4 Cette approche se fonde sur l'intégration de plusieurs chemins de charge dans les composants critiques. Ce concept part du principe que s'il se produit une rupture de l'élément structurel porteur principal, il restera suffisamment d'intégrité dans les chemins adjacents pour poursuivre le vol jusqu'à l'atterrissage. Bien qu'elle soit appliquée dans la conception de nombreux éléments, cette méthode ne prévoit pas les dommages multisites, dans lesquels les petites fissures qui se produisent dans les trous de fixation se conjuguent pour causer la rupture.

Méthode axée sur la tolérance aux dommages — Fatigue

9.12.5 Cette méthode est celle qui reçoit le plus d'attention actuellement. Contrairement à d'autres méthodes, la tolérance aux dommages part de l'hypothèse qu'il existe une fissure ou un défaut minuscule dans le matériau et elle utilise les techniques de la mécanique des ruptures pour calculer le temps qu'il faut à une fissure pour atteindre une longueur critique. Ces calculs sont ensuite utilisés pour déterminer les intervalles d'inspection de sécurité. En pratique, la détection d'une fissure durant une inspection entraîne le remplacement de l'élément.

9.12.6 Cette méthode prolonge la durée de vie de l'élément parce qu'elle n'exige pas son remplacement à moins qu'elle ne soit endommagée et qu'elle permet de réduire les facteurs de sécurité à la conception. L'application de la tolérance aux dommages pour définir les intervalles d'inspection d'un aéronef requiert toutefois une analyse exhaustive de son profil d'utilisation.

Évaluation de la corrosion

9.12.7 Il n'existe malheureusement aucune méthode actuellement pour déterminer le moment où s'amorce la corrosion ni les temps de propagation.

9.12.8 Même si les dommages causés par la corrosion peuvent mettre la vie en danger, dans la plupart des cas ils ne conduisent pas à des ruptures structurelles critiques. Cependant, comme il est indiqué plus haut, c'est le facteur le plus coûteux du maintien de la sécurité des aéronefs vieillissants.

9.12.9 Les moyens de contrôle de la corrosion comprennent normalement l'inspection visuelle et des techniques d'évaluation non destructives pour détecter les zones touchées par la corrosion. La fréquence des inspections est en partie déterminée par l'environnement opérationnel de l'aéronef : opérations à haute ou à basse altitude, air salin ou sec, mis dans un hangar ou laissé sur l'aire de stationnement, etc. Dans l'ensemble, il est essentiel que le personnel applique des pratiques préventives et les procédures de remplacement spécifiées par le fabricant.

Chapitre 10

ENQUÊTE SUR LES COLLISIONS EN VOL

10.1 INTRODUCTION

10.1.1 Les collisions en vol sont un type classique d'accidents d'aviation auxquels les enquêteurs professionnels devront continuer à faire face. Même si les progrès technologiques ont pu réduire les risques de ce type d'accident, ils n'ont pas réussi à les éliminer complètement et il est probable que les enquêteurs d'accidents d'aviation continueront à enquêter sur ces accidents dans le futur.

10.1.2 Dans de nombreuses collisions en vol survenues par le passé en conditions de vol à vue, les enquêtes avaient généralement pour conclusion que les équipages de conduite des deux aéronefs n'avaient pas vu l'autre aéronef et avaient été incapables de l'éviter, mais une analyse exhaustive des faits de l'accident aurait peut-être mené à des conclusions tout à fait différentes. À moins qu'il ne soit établi qu'un membre de l'équipage de conduite était physiquement capable de voir ou de détecter l'autre aéronef et qu'il y avait suffisamment de temps pour réagir à la situation, cette conclusion est inexacte. En recueillant soigneusement tous les indices et en analysant systématiquement les données, l'enquêteur peut généralement déterminer les angles de collision. Une fois que les données sont établies, l'enquêteur peut calculer avec précision ce que chaque membre de l'équipage de conduite pouvait voir depuis le poste de pilotage. Ces renseignements servent aussi de base scientifique à l'enquêteur pour recommander des améliorations de la sécurité.

10.2 SOURCES D'INFORMATION

10.2.1 L'enquêteur doit déterminer les vitesses vraies et les caps relatifs des deux aéronefs impliqués dans la collision. Plusieurs sources d'information permettent d'obtenir ces données : les enregistreurs de bord, les données du système de surveillance ATS (notamment les données radar), les indices matériels, les déclarations des témoins et les plans de vol. La plus précise de ces sources est l'enregistreur des données de vol. Si de bonnes données sont tirées des enregistreurs de chaque aéronef, il est relativement facile de déterminer l'angle de collision étant donné que les caps et les vitesses anémométriques sont connus pour les deux aéronefs. Même si un seul aéronef est équipé d'un enregistreur de bord, il est possible d'obtenir la moitié des données nécessaires.

10.2.2 Lorsqu'elles sont disponibles, les données enregistrées du système de surveillance ATS peuvent fournir des informations chronologiques sur la trajectoire des deux aéronefs. Elles permettent de déterminer la position des aéronefs à intervalles réguliers et donc de calculer la trajectoire et la vitesse sol. Si les vents présents aux altitudes de vol sont connus, la vitesse sol et la trajectoire peuvent être ajustées pour calculer la vitesse vraie et le cap. La combinaison des données du système de surveillance ATS et des indices matériels fournis par l'épave permet de déterminer les trajectoires des aéronefs qui ont mené à la collision ainsi que les manœuvres d'évitement qui auraient pu être effectuées par l'un ou l'autre équipage de conduite. Par exemple, si les données du système de surveillance ATS indiquent un certain angle conduisant à la collision mais que les indices matériels révèlent un angle de collision considérablement différent, il est possible qu'un des deux équipages ou les deux aient essayé d'exécuter des manœuvres d'évitement. La combinaison des données du système de surveillance ATS et des indices matériels donne une image plus précise des événements qui ont précédé la collision.

10.2.3 Les déclarations des témoins peuvent être utiles si les témoins ont réellement vu les avions entrer en collision. Malheureusement, de nombreux témoins interrogés après une collision en vol n'ont pas de fait vu la collision mais ont entendu le bruit de la collision et ont vu les avions tomber. Ces renseignements n'aident pas l'enquêteur. Les meilleurs témoignages peuvent venir des membres d'équipage ayant survécu à l'accident. La plupart du temps, les membres d'équipage de conduite diront que l'autre aéronef leur est apparu si soudainement devant le pare-brise qu'ils n'ont pas eu le temps de réagir. Cependant, s'ils ont vu l'autre aéronef plus tôt dans la suite des événements qui ont mené à la collision, ils pourront peut-être décrire les manœuvres d'évitement exécutées. Ils pourront peut-être aussi se rappeler des niveaux de vol, des caps et des vitesses anémométriques de l'aéronef avant la collision. S'ils sont installés à bord des aéronefs, l'ACAS (TCAS) et les enregistreurs de conversations dans le poste de pilotage peuvent aussi fournir des informations sur la détection et les manœuvres d'évitement.

10.2.4 Le plan de vol peut être utile pour l'enquête. Il peut s'agir du plan de vol déposé auprès d'un organisme gouvernemental ou du plan de vol du transporteur aérien. Il est aussi possible d'obtenir les déclarations de personnes qui peuvent expliquer comment l'équipage avait prévu d'effectuer le vol ou comment il avait l'habitude de réaliser des vols similaires. Même s'ils ne sont pas concluants, ces renseignements peuvent donner des idées générales sur le vol ou même une plage de vitesses anémométriques qui pourront être utiles plus tard.

10.2.5 Les indices matériels fournis par l'épave sont particulièrement utiles pour l'enquête lorsque les aéronefs ne sont pas équipés d'enregistreurs de bord. Les rayures, les entailles faites par les hélices ou d'autres marques peuvent permettre à l'enquêteur de déterminer l'angle réel de collision au moment de l'accident. Combinées à d'autres renseignements, les données des systèmes de surveillance ATS et les déclarations des témoins permettront d'élaborer un scénario plus complet de l'accident. Comme les données des enregistreurs de bord et des systèmes de surveillance ATS sont traitées ailleurs dans le manuel, le présent chapitre se limitera à exposer les techniques à appliquer pour utiliser les indices matériels tirés de l'épave.

10.3 UTILISATION DES INDICES MATÉRIELS

10.3.1 Lorsque deux aéronefs se heurtent, il se produit toujours des rayures ou d'autres marques qui représentent la combinaison des vecteurs des deux aéronefs. Malheureusement, d'autres dommages comme les charges aérodynamiques, l'impact avec le sol et l'incendie peuvent masquer ces indices et il peut être très difficile ou impossible de les déceler. Lorsqu'une bonne rayure est repérée, il est tentant d'utiliser cette marque comme si elle représentait la trajectoire de vol de l'autre aéronef, mais ce ne sera pas exact à moins qu'un des deux aéronefs ait été stationnaire ou qu'il ait dépassé l'autre en venant de l'arrière, ou que les deux aéronefs aient volé l'un vers l'autre. Comme le montre la Figure III-10-1, une rayure est dans la plupart des cas le résultat d'une combinaison des mouvements de deux corps qui se déplacent et elle ne représente pas la trajectoire de vol d'un des deux aéronefs.

10.3.2 L'angle de collision est l'angle formé par la trajectoire de vol de chaque aéronef (Figure III-10-2). Plus précisément, l'angle de collision est l'angle entre le cap de chaque aéronef. Cet angle est celui qui est le plus couramment cité par les enquêteurs mais les deux autres angles du triangle, les angles de convergence, sont généralement plus utiles. L'angle de convergence montre la différence visuelle entre le cap de l'aéronef et l'aéronef qui se rapproche. Autrement dit, l'angle de convergence est le gisement de l'autre aéronef ou à quelle distance à gauche ou à droite (en haut ou en bas) le pilote doit regarder pour voir l'autre aéronef. Si les vitesses et les caps des deux aéronefs restent constants, les deux angles de convergence demeureront aussi constants. Dans ce cas, l'aéronef convergent semblera immobile pour un observateur situé à bord de l'autre aéronef. Comme l'œil humain perçoit le mouvement relatif plus rapidement qu'un objet stationnaire, ce phénomène permet d'expliquer pourquoi les pilotes ne voient pas immédiatement que la trajectoire des aéronefs mène à une collision.

10.3.3 Il est important de noter que les angles de convergence doivent être basés sur les caps plutôt que sur les trajectoires afin d'établir une perspective visuelle valable pour chaque membre de l'équipage de conduite. Comme les rayures sont toujours parallèles entre elles et au vecteur de vitesse de rapprochement, elles seront toujours basées sur le cap de l'aéronef. Ces caps sont toujours un angle relatif entre les caps des deux aéronefs plutôt que leurs caps compas.

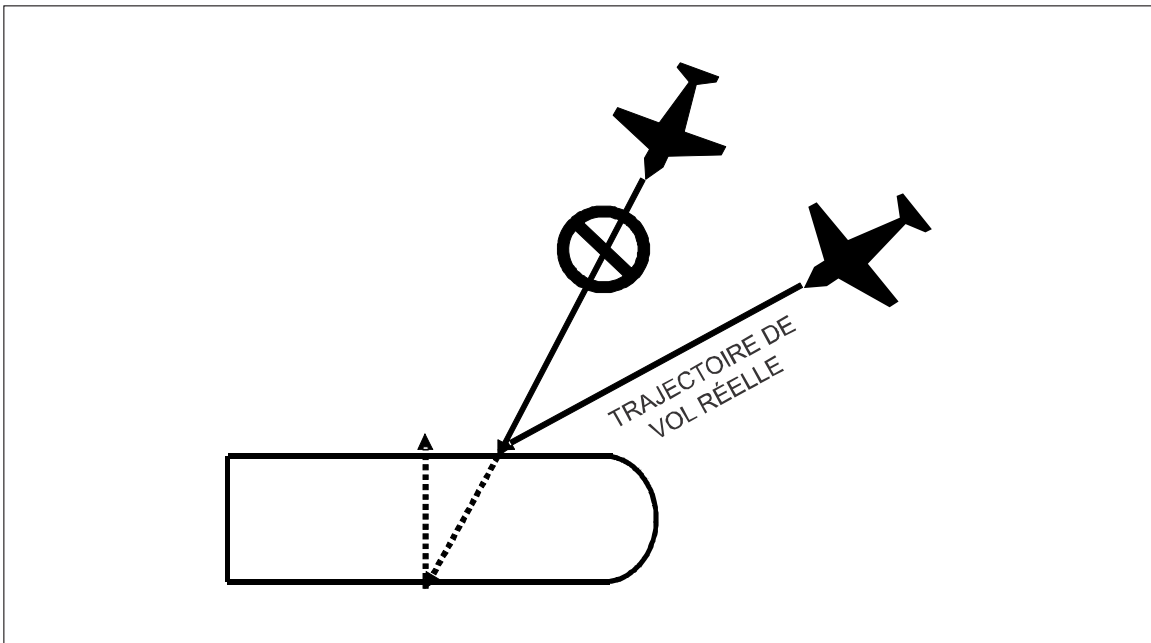


Figure III-10-1.

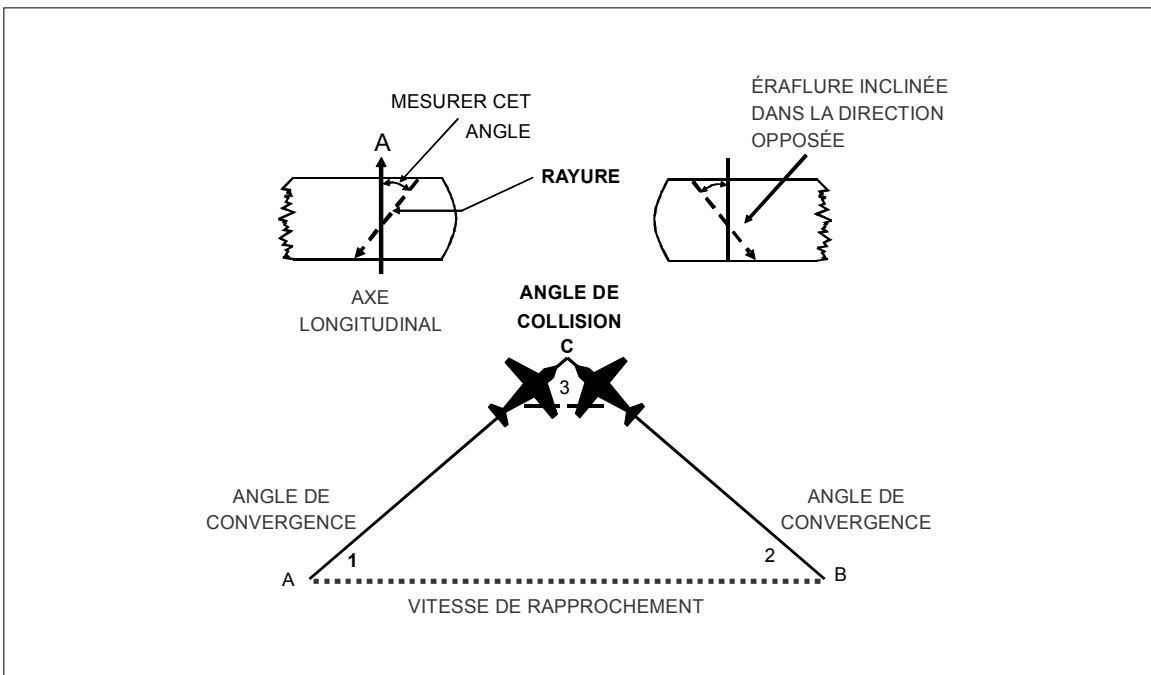


Figure III-10-2.

10.3.4 Une fois que les angles de convergence ont été déterminés, il est possible de reproduire la vue depuis le poste de pilotage avec une bonne précision. Une analyse de visibilité faite par ordinateur permettra d'obtenir un tracé graphique de ce que le pilote ou les pilotes pouvaient voir depuis le poste de pilotage. La vue qu'avait le pilote peut aussi être évaluée manuellement en reconstituant la hauteur et l'emplacement du siège du pilote dans un aéronef similaire et en déterminant ce qui est visible à l'angle de convergence. Si ce point se trouvait à l'intérieur des limites du pare-brise et qu'il n'y avait aucune interférence extérieure (le soleil, par exemple), il est possible que le pilote ait pu voir l'autre aéronef en un point quelconque de la séquence de l'accident. Si ce point est masqué par une structure, il faut alors calculer le moment où les dimensions de l'autre aéronef deviennent supérieures aux dimensions relatives de la structure puis, à l'aide de la vitesse de rapprochement, de calculer le temps jusqu'à l'impact. Lorsqu'ils sont combinés au temps alloué pour que l'équipage identifie la cible et réagisse, les calculs montrent si l'équipage a même eu la possibilité d'éviter la collision. De même, si la position relative de l'aéronef convergent était à un endroit qui n'est pas normalement balayé du regard, il n'est pas raisonnable de s'attendre à ce que l'équipage ait pu voir l'autre aéronef. Bien entendu, ces calculs sont plus exacts lorsque les deux aéronefs suivent une trajectoire de vol constante pendant un certain temps avant l'impact. En consacrant le temps nécessaire pour obtenir les bonnes informations, l'enquêteur pourra mieux comprendre les circonstances réelles de l'accident, même lorsque les trajectoires de vol changent.

10.3.5 Dans le cas de collisions de gros aéronefs, les simulateurs modernes peuvent recréer l'accident avec des conditions météorologiques représentatives, les caractéristiques de convergence des aéronefs, les opérations exécutées dans le poste de pilotage et le guidage du contrôle de la circulation aérienne. Il est aussi possible d'analyser les conditions réelles du vol et du poste de pilotage pour déterminer si l'équipage de conduite avait les possibilités internes ou externes d'identifier et d'éviter la collision. La reconstitution de quasi-collisions en vol peut en fait être plus utile que l'enquête après l'accident. Vu la complexité de la gestion du poste de pilotage qui exige une plus grande attention de la part du pilote et les capacités de plus en plus précises de navigation par satellite des aéronefs, l'équipage de conduite passe moins de temps à regarder à l'extérieur vu qu'il n'y a plus le caractère aléatoire des aides de navigation basées au sol. Dans un contexte où l'espace aérien de région terminale et en route devient de plus en plus encombré, il est crucial de se conformer aux procédures et d'utiliser l'équipement de renforcement de la surveillance.

10.4 REPÉRER ET MESURER LES RAYURES UTILES

10.4.1 Un des aspects essentiels de l'utilisation d'indices matériels est le choix des rayures. Les bonnes marques sont toujours droites et l'idéal c'est qu'elles contiennent des traces de peinture de l'autre aéronef. Repérer une rayure sur une surface horizontale pour déterminer la convergence horizontale et une rayure sur une surface verticale pour calculer l'angle de collision dans le plan vertical. Bien qu'il soit possible d'utiliser des rayures situées sur d'autres surfaces ou même sur des surfaces courbes et de les convertir à une marque équivalente sur la surface appropriée, les marques situées sur les surfaces horizontales et verticales sont les plus faciles à utiliser. Ces marques peuvent être mesurées par rapport aux lignes de rivets qui correspondent à l'axe longitudinal, directement sur les lieux de l'accident ou plus tard à partir de photos. Lorsque les mesures sont calculées à partir de photos, il est essentiel que la photo soit prise perpendiculairement à la surface qui contient les marques et que ces marques soient au centre de la photo pour éviter d'introduire des erreurs de parallaxe ou des distorsions dans les mesures (Figures III-10-3 et III-10-4).

10.4.2 Il est préférable d'utiliser les marques de rayures sur les points de contact initial des deux aéronefs, mais ce n'est pas toujours nécessaire. Lorsque les deux aéronefs ne modifient pas sensiblement leurs trajectoires de vol pendant l'impact, les rayures faites plus tard durant la collision sont acceptables. Cependant, plus la collision est directe, plus il est important d'utiliser les marques du contact initial.

10.4.3 Le changement de direction d'un aéronef en vol est fonction de deux variables : la force appliquée et le moment où cette force est appliquée. Plus l'impact (force) est direct ou plus le contact (temps) est long, plus il est important d'utiliser des marques faites au début de la séquence de collision. Même si théoriquement tout contact avec un autre aéronef durant une collision en vol change la direction des deux aéronefs après l'impact initial, ce changement est négligeable dans beaucoup de collisions. Même pour les aéronefs plus lents, la durée du contact entre les deux

aéronefs se mesure en millisecondes. Par conséquent, la direction d'un aéronef pendant la création des rayures n'est sensiblement modifiée que lorsqu'une très grande force est appliquée, par exemple dans une collision frontale, ou lorsque le temps d'interaction entre les aéronefs est plus long, par exemple lorsqu'un aéronef dépasse lentement l'autre aéronef. Les vents modifient à différents degrés le cap et la trajectoire des aéronefs.

10.4.4 Une fois la rayure repérée, il faut en déterminer la direction et mesurer l'angle qu'elle forme avec l'axe longitudinal de l'aéronef. Si une rayure horizontale est mesurée par rapport à l'axe transversal ou si une rayure verticale est mesurée par rapport à l'axe vertical, il est facile de calculer l'angle formé avec l'axe longitudinal. Lorsqu'il examine l'épave, l'enquêteur peut se limiter à trouver des rayures utiles et à les mesurer avec précision par rapport à un axe horizontal, transversal ou vertical de l'aéronef, selon le cas. Les angles de collision et de convergence peuvent être calculés plus tard.

10.4.5 L'intersection entre une rayure et l'axe longitudinal forme quatre angles de mesure possibles, mais comme les angles opposés sont égaux et que le total des angles d'un côté de la rayure est toujours de 180° , même si le « mauvais » angle est mesuré sur la scène de l'accident, le bon angle peut être déterminé plus tard. Bien que l'utilisation du « mauvais » angle permette souvent d'obtenir la bonne réponse mathématique en utilisant les fonctions sinus, il est quand même préférable d'employer le bon angle pour effectuer les mesures. La pente des rayures et leur direction, observées perpendiculairement à la surface rayée, déterminent l'angle à mesurer. Les lignes directrices indiquées ci-dessous résument les règles à suivre pour déterminer l'angle à mesurer ainsi que la signification de la direction et de la pente des marques par rapport à l'axe longitudinal. Ces lignes directrices s'appliquent aux marques horizontales et verticales, mais elles sont données séparément pour faciliter la compréhension.



Figure III-10-3. Rayures sur une surface horizontale photographiées à la verticale.
Noter les lignes droites.



Figure III-10-4. Surface verticale d'un fuselage photographiée de côté. Noter les rayures droites et l'angle relativement faible formé par rapport à l'axe longitudinal, indiquant qu'il y a eu peu de mouvement vertical relatif dans cette collision.

Surfaces horizontales

- 10.4.6
- 1) Si les rayures relevées sur chaque aéronef sont inclinées dans des directions opposées par rapport à l'axe longitudinal, il faut mesurer, sur chaque aéronef, le plus petit angle entre l'axe longitudinal et la rayure (n° 1 dans la Figure III-10-5).
 - 2) Si les rayures de chaque aéronef sont inclinées dans des directions opposées, comme sur le n° 2 de la Figure III-10-5, chaque rayure va de l'avant vers l'arrière. Le plus petit angle entre l'axe longitudinal et la rayure indique le gisement au moment de l'impact.
 - 3) Si les rayures sont inclinées dans la même direction, un des aéronefs a rejoint l'autre et l'aéronef le plus lent est celui pour lequel l'angle entre l'axe longitudinal et la rayure est le plus grand. L'aéronef le plus rapide est celui pour lequel l'angle est le plus petit (n° 3 dans la Figure III-10-5).
 - 4) Si les rayures sont inclinées dans la même direction, une des rayures a été faite de l'arrière vers l'avant. L'aéronef présentant cette rayure est l'aéronef le plus lent. L'aéronef le plus lent est toujours celui pour lequel l'angle des rayures est le plus grand (n° 3 dans la Figure III-10-5).
 - 5) Si l'angle des rayures est le même sur les deux aéronefs, les vitesses des deux aéronefs sont les mêmes.

Surfaces verticales

10.4.7 Les principes d'interprétation des rayures pour déterminer le mouvement vertical sont les mêmes que ceux qui s'appliquent au mouvement horizontal sauf que les rayures utilisées sont sur une surface verticale au lieu d'une surface horizontale. Les rayures sont quand même mesurées par rapport à l'axe longitudinal de l'aéronef.

- 1) Si les rayures sont inclinées dans des directions opposées et sont généralement dirigées du bas vers le haut, les aéronefs se sont heurtés dans une assiette relative de cabré l'un par rapport à l'autre (Figure III-10-6). Inversement, si les rayures sont inclinées dans des directions opposées et sont généralement dirigées du haut vers le bas, les aéronefs se sont heurtés dans une assiette relative de piqué l'un par rapport à l'autre. Dans les deux cas, il faut mesurer, sur chaque aéronef, le plus petit angle entre l'axe longitudinal et les rayures (Figure III-10-6).
- 2) Si les rayures vont de haut en bas sur un aéronef et de bas en haut sur l'autre aéronef et qu'elles sont inclinées dans la même direction, l'un des aéronefs a rejoint l'autre et l'aéronef le plus lent est celui pour lequel l'angle entre l'axe longitudinal et la rayure est le plus grand. L'aéronef le plus rapide est celui pour lequel l'angle est le plus petit (Figure III-10-7).
- 3) Si les rayures de l'aéronef le plus lent sont dirigées du bas vers le haut, cet aéronef se trouvait au-dessus de l'autre. Inversement, si les rayures de l'aéronef le plus lent vont du haut vers le bas, cet aéronef était au-dessous de l'autre (Figure III-10-7).

10.5 MÉTHODES DE CALCUL DE L'ANGLE DE COLLISION

10.5.1 Il y a plusieurs façons de déterminer les angles de collision et de convergence d'une collision en vol. La méthode la plus élémentaire consiste à tracer la trajectoire et la vitesse de chaque aéronef sur du papier graphique. Si ces quatre valeurs sont connues, elles peuvent être tracées et les angles qu'elles forment peuvent être mesurés. L'avantage de cette méthode pour certaines personnes est qu'elle ne requiert aucune formule mathématique ; l'inconvénient cependant est qu'il faut connaître la vitesse et la direction des deux aéronefs.

10.5.2 Les fonctions trigonométriques permettent à l'enquêteur de déterminer les angles de collision et de convergence en utilisant la règle des sinus et la règle des cosinus lorsque seulement trois des quatre valeurs sont connues. Cette méthode est illustrée à la Figure III-10-8. Elle permet aussi d'estimer des valeurs raisonnables lorsque seulement deux des quatre valeurs sont connues, comme le montre la Figure III-10-10.

10.5.3 Les techniques traitées dans le présent chapitre se limitent à déterminer les angles horizontaux de convergence et de collision séparément des angles verticaux de convergence et de collision. Même si les deux calculs peuvent se faire simultanément, il est plus simple de les faire séparément : trouver d'abord l'angle de convergence horizontal puis l'angle de convergence vertical. Les deux angles peuvent ensuite être combinés pour décrire un angle de convergence de X degrés sur le plan horizontal et de Y degrés sur le plan vertical.

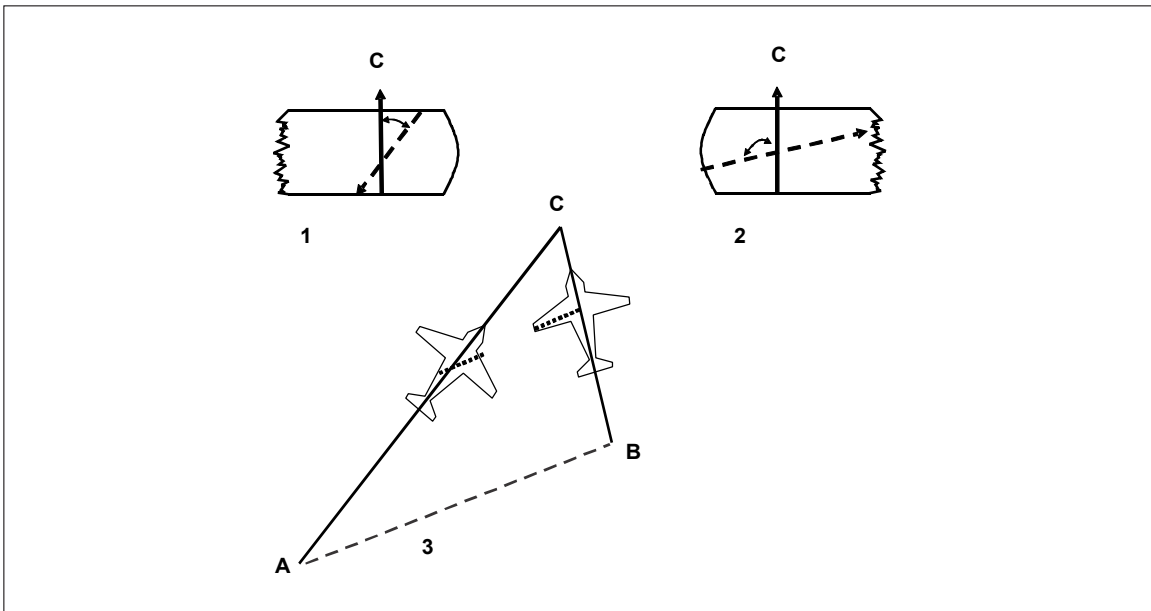


Figure III-10-5.

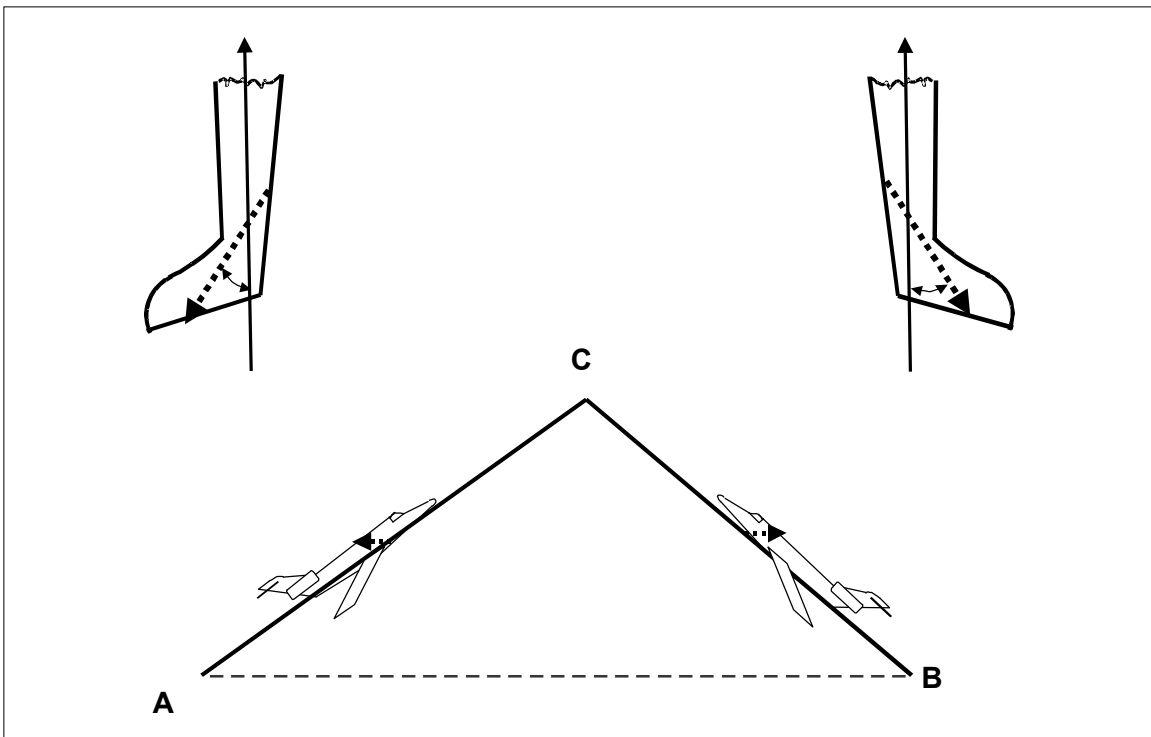


Figure III-10-6.

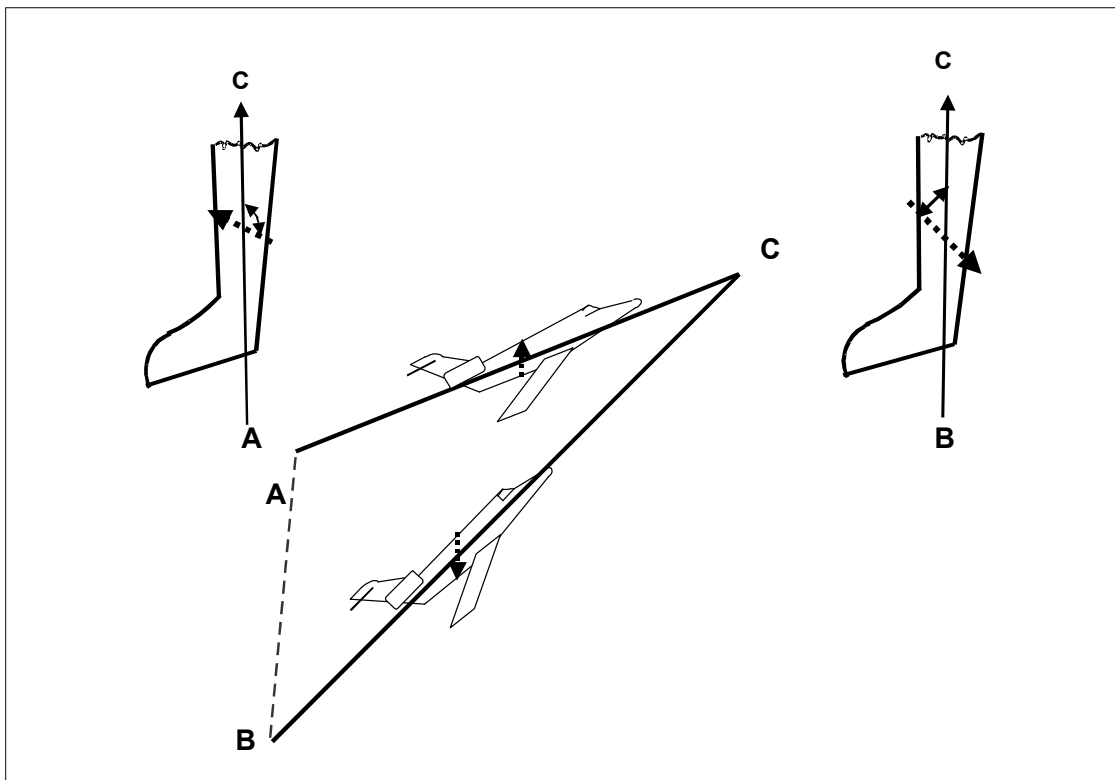


Figure III-10-7.

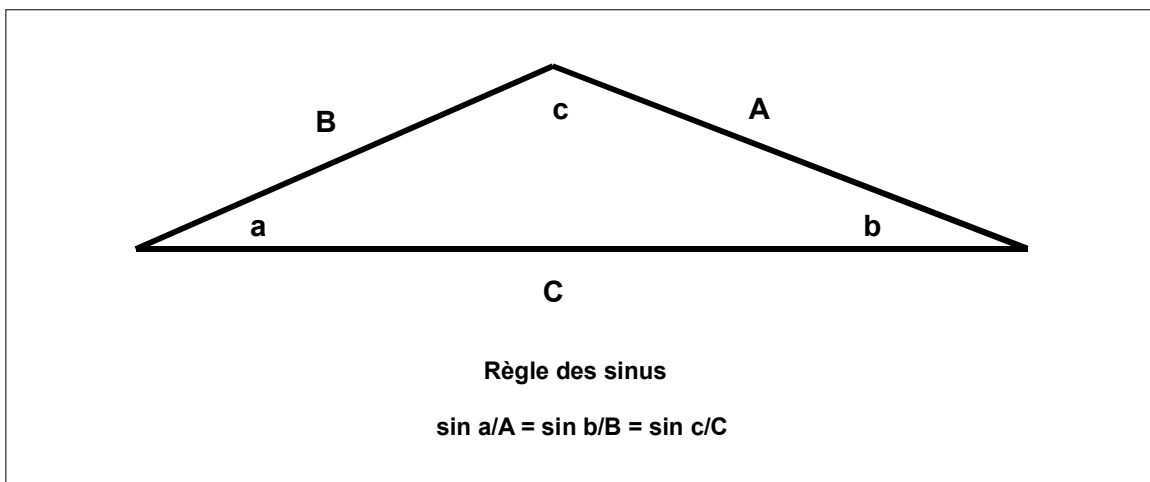


Figure III-10-8.

10.6 DÉTERMINATION DES ANGLES DE COLLISION ET DE CONVERGENCE DANS DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Scénario 1 : Les deux aéronefs présentent des rayures fiables

10.6.1 Lorsque les deux aéronefs présentent des rayures fiables, il est facile de déterminer l'angle de collision. Vu que les angles des rayures sont les mêmes que les angles de convergence respectifs, il suffit de soustraire les deux angles des rayures de 180° pour obtenir l'angle de collision. Selon la vitesse des deux aéronefs, il est possible que ce calcul soit suffisant étant donné que les deux angles de convergence sont les seules données nécessaires pour déterminer ce que pouvaient potentiellement voir les deux équipages de conduite. Pour les aéronefs plus rapides, il faudra quand même déterminer la vitesse des deux aéronefs pour calculer la vitesse de rapprochement.

10.6.2 Prenons un exemple simple : deux petits aéronefs entrent en collision au-dessus d'une zone métropolitaine durant un vol de nuit en VFR. Un aéronef s'écrase dans un centre commercial et le second est capable d'effectuer un atterrissage d'urgence à un aéroport voisin. Les deux aéronefs présentent de bonnes rayures. Un a une rayure allant du bord d'attaque au bord de fuite de l'aile droite et formant un angle de 37° avec l'axe longitudinal. L'autre aéronef a une rayure allant du bord d'attaque au bord de fuite de l'aile gauche et formant un angle de 34° . Vu que ces angles sont les mêmes que les angles de convergence, l'angle de collision est facile à calculer. Il suffit de soustraire la somme des angles des rayures (angles de convergence) de 180° pour obtenir un angle de collision de 109° , comme le montre la Figure III-10-9.

Scénario 2 : Un seul des aéronefs présente une bonne rayure et la vitesse des deux aéronefs peut être déterminée ou estimée

10.6.3 Lorsqu'un angle de convergence et les deux vitesses anémométriques sont connus ou lorsque deux angles de convergence et une vitesse anémométrique sont connus, la valeur recherchée peut être obtenue à l'aide de la règle des sinus. Lorsqu'on ne connaît qu'un angle de convergence et qu'une vitesse, il est quand même possible de calculer une plage de valeurs pour l'angle de convergence manquant. Même si l'utilisation d'une valeur estimée introduit une certaine erreur dans les résultats, une plage de vitesses probables peut être employée et la plage de valeurs des angles probables de collision fournira des renseignements utiles à l'enquête. Comme l'exemple de collision de deux aéronefs de l'aviation générale illustré à la Figure III-10-10, la différence n'est que d'environ 4° pour une variation de 10 % de la vitesse anémométrique. Il est préférable d'avoir des données plus précises, mais cette plage est quand même très utile pour l'étude de visibilité.

Aucun des deux aéronefs ne présente de rayures fiables

10.6.4 Parfois les dommages causés par l'impact ou le feu éliminent toute possibilité de trouver des rayures fiables sur l'un ou l'autre des aéronefs et il peut être nécessaire dans ce cas d'utiliser des marques « équivalentes ». S'il est possible de déterminer à partir de l'épave la direction des dommages du deuxième aéronef, ils peuvent être utilisés comme indication approximative d'une marque « équivalente ». Cette technique donne des renseignements sur l'angle de collision entre les deux aéronefs. Même si cette méthode est moins précise, il se peut qu'elle soit la seule option disponible.

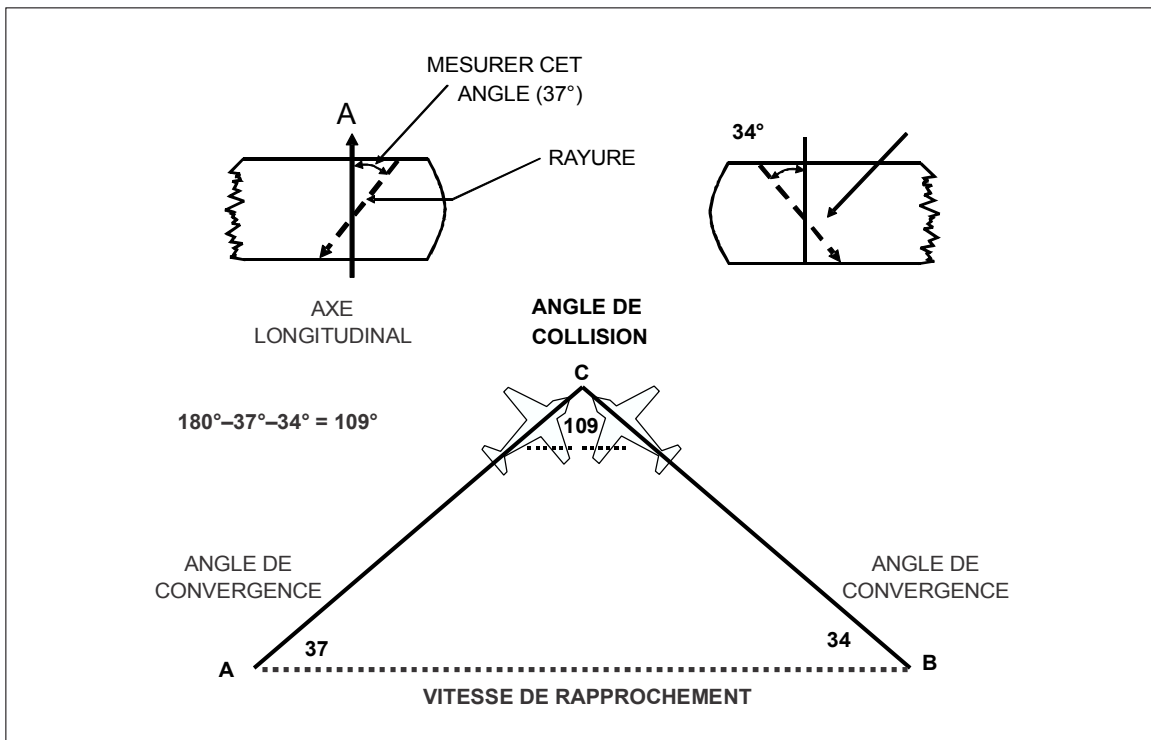


Figure III-10-9.

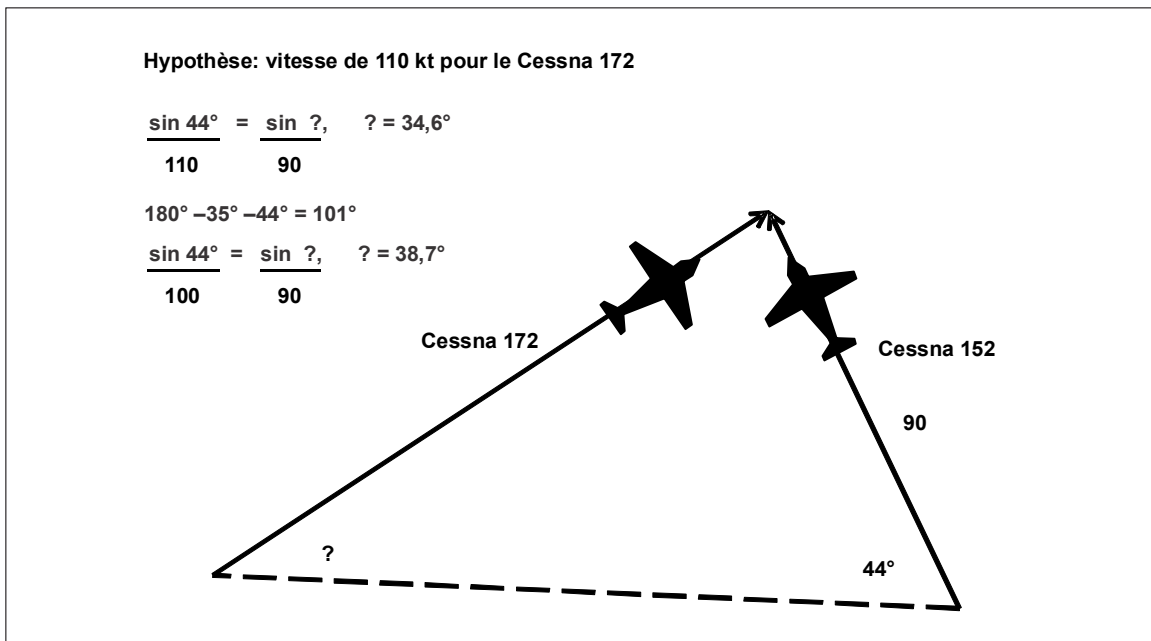


Figure III-10-10.

Entailles causées par l'hélice

10.6.5 Lorsqu'un des deux aéronefs ou les deux ont des hélices, on peut utiliser les entailles causées par les hélices pour calculer les angles de collision et de convergence. Les entailles multiples seront à peu près parallèles. La vitesse des pales change selon la puissance de l'hélice et le matériau entaillé, mais leur incidence sur les calculs de l'angle de collision est négligeable. Même lorsque la pente des diverses entailles change considérablement ou qu'elles sont de longueur différente, l'enquêteur peut connecter les points milieu des entailles complètes pour former une rayure équivalente vu que le point milieu est l'endroit où une pale d'hélice se trouvait chaque fois à la verticale. Il n'est ainsi pas nécessaire de tenir compte de la pente des entailles et il est plus facile de calculer l'angle de convergence. Cette marque équivalente est utilisée de la même manière qu'une rayure normale pour calculer l'angle de convergence. La distance entre les entailles est représentative de la vitesse de rapprochement et le changement de vitesse de l'hélice a certes une incidence sur la vitesse de rapprochement (Figure III-10-11).

Utilisation d'une seule entaille faite par l'hélice pour trouver l'angle de collision

10.6.6 On peut obtenir une bonne estimation de l'angle de collision lorsqu'il n'y a qu'une seule marque d'hélice dans l'épave. Les calculs ou les estimations de vitesse des deux aéronefs et la vitesse de l'extrémité des pales de l'hélice doivent être inclus dans les calculs. Il est aussi essentiel d'établir la direction de l'extrémité de la pale lorsqu'elle a fait l'entaille. L'enquêteur doit examiner soigneusement la déformation de la zone située près de l'entaille pour déterminer la direction dans laquelle se déplaçait la pale lorsqu'elle a fait l'entaille.



Figure III-10-11. On peut obtenir une marque équivalente à une rayure en reliant les points milieu des entailles faites par les hélices.

10.6.7 En utilisant le diamètre de l'hélice, le sens de rotation de l'hélice et sa vitesse de rotation, on peut calculer la vitesse de l'extrémité de la pale à l'aide de fonctions trigonométriques standard (Figure III-10-12). Comme l'hélice assure toujours une poussée à un angle de 90° par rapport à l'axe longitudinal de l'aéronef, on peut utiliser le carré du vecteur hélice et le carré du vecteur vitesse de l'aéronef pour obtenir le carré du vecteur combiné, ce qui représente l'extrémité de la pale se déplaçant dans l'espace. En combinant le déplacement de l'extrémité de la pale dans l'espace avec le mouvement du second aéronef on peut obtenir l'angle de collision entre l'extrémité de la pale et le second aéronef. On peut ensuite, par simple géométrie, déterminer l'angle de collision entre les deux aéronefs, comme le montre la Figure III-10-12. Dans cet exemple particulier, il est nécessaire d'utiliser la règle des cosinus pour obtenir la vitesse de rapprochement.

10.7 RÉSUMÉ

10.7.1 Le présent chapitre donne un aperçu du processus d'enquête sur les collisions en vol. Les enregistreurs de bord, les données des systèmes de surveillance ATS, les déclarations des témoins et les indices matériels fournissent tous des renseignements utiles pour l'enquête. Les enregistreurs de bord, lorsqu'ils sont disponibles, contiennent les meilleures informations. Lorsqu'elles sont disponibles, les données des systèmes de surveillance ATS peuvent fournir de bonnes données chronologiques sur les trajectoires des deux aéronefs et les indices matériels peuvent donner des renseignements précis sur les caps relatifs des deux aéronefs au moment de la collision. Les déclarations des témoins et les plans de vol peuvent aussi aider à déterminer les directions générales des trajectoires de vol, mais ils doivent être utilisés avec prudence.

10.7.2 Les épaves des aéronefs qui sont entrés en collision en vol peuvent fournir des renseignements uniques et des informations utiles pour le processus d'enquête. Lorsque les enregistreurs de bord ne sont pas disponibles pour un aéronef ou les deux, les indices matériels peuvent être utilisés par eux-mêmes ou combinés aux données des systèmes de surveillance ATS pour déterminer ce qui s'est produit. La détection de rayures fiables et leur mesure par rapport à l'axe longitudinal de l'aéronef sont des techniques essentielles que doit connaître l'enquêteur durant l'examen des lieux de l'accident. Une fois prises, ces mesures peuvent être comparées aux renseignements donnés dans le présent chapitre pour analyser la signification des marques.

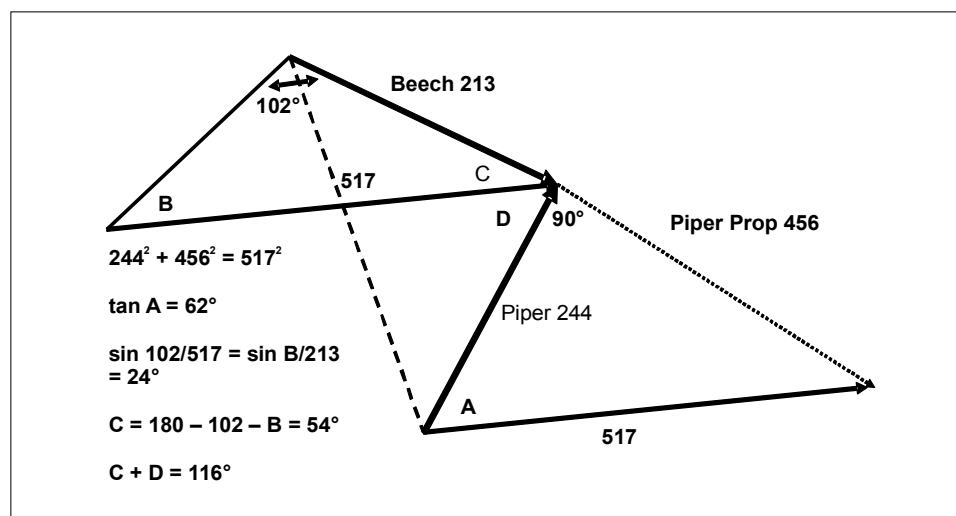


Figure III-10-12.

10.7.3 Les résultats des calculs des collisions en vol sont essentiels pour formuler des recommandations qui aideront à prévenir des accidents similaires. Ils permettent de valider la reconstitution de la trajectoire de vol et de ce que pouvaient voir les équipages de conduite. Ils peuvent aussi être reliés aux avertissements des systèmes automatiques, au contrôle de la circulation aérienne et à de nombreux autres éléments afin de mieux comprendre les conditions auxquelles ont dû faire face les équipages de conduite et les contrôleurs de la circulation aérienne au moment où s'est produit l'accident ou l'incident de collision en vol faisant l'objet de l'enquête.

Chapitre 11

ENQUÊTE SUR LA PROPAGATION DES INCENDIES

11.1 OBJECTIF

11.1.1 L'enquête sur les incendies d'aéronef peut être très difficile parce qu'un grand nombre d'indices peuvent être masqués ou dégradés par l'impact avec le sol, les incendies consécutifs à l'impact, les procédures de lutte contre l'incendie et l'enlèvement de l'épave. Il est donc important de photographier et de noter les conditions existantes le plus rapidement possible et de protéger les éléments de l'aéronef qui présentent des marques d'un incendie survenu avant l'écrasement. L'enquêteur peut ainsi mieux déterminer s'il s'est produit un incendie en vol, l'étendue de l'incendie, la source d'inflammation et comment éviter ces dangers à l'avenir.

11.1.2 L'équipe d'enquête sur les incendies devra faire appel aux experts en éléments structurels et en systèmes pour déterminer les modes de rupture et la séquence de propagation de l'incendie. Les quantités de plus en plus importantes de métaux et de composites à haute résistance et légers compliquent aussi les techniques traditionnelles d'enquête.

11.2 COMPÉTENCES DE L'ENQUÊTEUR

11.2.1 L'enquêteur sur les incendies à bord des aéronefs doit comprendre la combustion et comment les divers matériaux utilisés dans l'aéronef réagissent au feu. La combustion des matériaux de l'aéronef ou les dommages causés par la chaleur produite par l'incendie peuvent laisser un résultat caractéristique prévisible qui indique la relation entre le temps et la température, relation qui sera examinée plus loin. En outre, le volume de carburant présent au moment de l'écrasement peut causer un incendie au sol qui peut masquer les indices nécessaires pour effectuer une évaluation. L'enquêteur doit non seulement bien connaître les incendies en vol mais comprendre aussi les incendies au sol. Il peut ainsi distinguer les incendies qui ont causé l'accident et ceux qui se sont produits après l'impact.

11.2.2 Les preuves d'un incendie en vol seront masquées par un incendie après impact et les opérations de lutte contre l'incendie avant que l'enquêteur n'arrive sur les lieux de l'accident. L'enquêteur doit s'attendre à voir des éléments tordus, brisés, pliés et couverts de suie qui ressemblent peu aux mêmes éléments non endommagés. Les éléments dispersés à l'extérieur du cratère d'impact peuvent être soumis à des dommages mineurs causés par la suie mais ils peuvent être utiles pour déterminer la présence ou l'absence d'un incendie en vol. L'angle d'impact dictera la répartition des débris autour du lieu de l'accident. Les explosions secondaires consécutives à l'impact projeteront aussi d'autres éléments au loin.

11.2.3 Jusque-là, le processus d'enquête sur les incendies est le même que n'importe quel autre processus d'enquête. Cependant, le processus change et la caractérisation de l'incendie devient un point important de l'enquête. S'est-il produit une « grande explosion » ou l'aéronef s'est-il écrasé avec une traînée de feu ou de fumée ? La présence d'un incendie important est un indice d'un feu alimenté par le carburant ou les fluides hydrauliques. La source du combustible qui brûle pourrait être une fuite de carburant dans la zone du moteur ou une explosion du réservoir de carburant ou des vapeurs qui s'en dégagent. Le fluide hydraulique peut aussi être une source de combustible. C'est ici que la connaissance de l'inflammabilité des fluides entre en jeu. Les fluides commerciaux à base d'ester phosphorique tels que Skydrol sont difficilement inflammables, mais les fluides à base d'huiles minérales sous forme de jets pulvérisés sont très inflammables.

11.2.4 Lorsqu'il commence l'enquête, l'enquêteur sur les incendies doit d'abord recueillir tous les faits qui peuvent décrire l'événement. Il ne faut pas compter sur les données des enregistreurs de bord résistants à l'impact au début de l'enquête. Les récits des témoins doivent être examinés et il ne faut pas oublier que les témoins qui observent une explosion ou une rupture en vol le font habituellement après avoir entendu les sons liés à l'événement. Les sons indiqués par les témoins peuvent être comparés à d'autres sons connus. Il faut aussi examiner les accidents ou incidents durant des vols précédents et l'historique des problèmes de la cellule en cause.

11.3 INTRODUCTION AU PROCESSUS DE COMBUSTION

11.3.1 Il est donc évident qu'une compréhension de base du processus de combustion est nécessaire pour mener l'enquête. Un incendie a besoin de trois éléments : un combustible, de l'air et une source d'inflammation. Le combustible doit toutefois être sous forme de vapeur pour le processus de combustion : les liquides et les solides ne brûlent pas. Les propriétés chimiques du combustible, décrites plus loin, sont importantes pour déterminer la probabilité qu'un produit ait contribué à l'incendie.

11.3.2 Les propriétés clés des fluides (carburants/huiles) telles que la tension de vapeur et le point d'éclair indiquent à l'enquêteur à quelle température la concentration de vapeur au-dessus du liquide devient inflammable. La température d'inflammation spontanée (AIT) du fluide établit la température à laquelle le contact du fluide avec une surface chaude pourrait enflammer le fluide. Ce ne sont que deux des définitions importantes pour l'enquêteur ; d'autres figurent en appendice au présent chapitre. Lorsqu'un incendie alimenté par un fluide éclate en vol, le processus de combustion et l'importante libération d'énergie qui l'accompagne créent des conditions qui peuvent causer des dommages aux matériaux qui ne se produiraient pas dans un incendie au sol. Le filage de cuivre par exemple peut fondre dans un incendie en vol mais rester intact dans un incendie au sol.

11.3.3 Les incendies qui se produisent à l'intérieur de la cabine ou dans la soute sont généralement liés à des matériaux solides. Ces matériaux solides, tels que l'isolant du câblage électrique, les absorbants acoustiques, les revêtements intérieurs en plastique, etc. doivent être soumis à une source de chaleur ou de flamme pour convertir le matériau à l'état de vapeur qui brûlera ensuite. Le processus est similaire à celui de la combustion du bois. Il est difficile de brûler une bûche ; il faut donc utiliser du papier journal ou des copeaux de bois pour amorcer le feu. Ces papiers et ces copeaux ont une grande surface exposée à l'air et peu de masse pour absorber la chaleur. L'énergie (chaleur) dégagée par ce petit feu finit par amorcer la combustion des bûches plus grosses. À mesure que le feu brûle la bûche, l'apport en air diminue et l'intensité du feu diminue ; il faut alors remuer les tisons pour enlever la couche carbonisée, exposer la surface intacte et laisser entrer l'air. Le processus de combustion d'un incendie à l'intérieur de la cabine s'amorce lentement et ne se développe que lorsque l'énergie de sortie dépasse l'énergie d'entrée.

11.3.4 La température de fusion d'une substance est le point où le matériau passe de l'état solide à l'état liquide, donc l'étape qui précède l'état gazeux requis pour la combustion. La température d'inflammation des solides est basée sur des copeaux ou de fines particules du matériau. Par exemple, la laine d'acier peut facilement brûler tandis qu'un tube d'acier (solide) ne sera pas endommagé. Le Tableau III-11-1 montre la réaction de certains matériaux solides à la chaleur.

11.3.5 Il faut donc comprendre les différences d'intensité et de propagation des incendies en vol : les incendies alimentés par le carburant de l'aéronef se développent rapidement et sont très intenses, et sont différents des feux couvants alimentés par les solides des cabines ou des conteneurs de fret.

Tableau III-11-1. Réaction des matériaux solides à la chaleur

Matériau	Réaction	Température	
		°C	°F
Paraffine	Fusion	54	129
Chlorure de polyvinyle	Fusion	85	185
Polystyrène	Déformation	99	210
Méthacrylate de méthyle	Déformation	99	210
Élastomère de styrène	Déformation	104	220
Mélamine	Décomposition	130 – 204	266 – 400
Laminés de papier de résines phénoliques	Délaminage	121	250
Nylon (polyamide)	Déformation	149 – 182	300 – 360
Cellulose	Décomposition	204	400
Caoutchouc silicone	Ramollissement	218	425
Zinc	Fusion	419	786
Soudure à l'argent	Fusion	630 – 788	1165 – 1450
Émail	Écaillage	650 – 760	1200 – 1400
Verre	Ramollissement	760 – 870	1400 – 1600
Glaçure ou porcelaine isolante	Fusion	1232	2250

11.4 INCENDIES ET EXPLOSIONS LIÉS AU CARBURANT

11.4.1 L'enveloppe d'inflammabilité du carburant définit la gamme de mélanges carburant-air qui peuvent intervenir dans un incendie. Le Tableau III-11-2 résume les propriétés des carburants. L'enveloppe d'inflammabilité est normalement utilisée pour évaluer le potentiel d'explosion d'un réservoir de carburant ou pour déterminer si le carburant qui fuit dépasserait son point d'éclair et serait donc inflammable. Cette gamme de mélanges carburant-air est fondée sur des essais expérimentaux et des calculs théoriques. À la limite inférieure d'inflammabilité, le processus de combustion est contrôlé par la quantité d'air (oxygène) disponible. L'excès de carburant définit la limite supérieure d'inflammabilité. Si le rapport carburant-air est correct, tout le carburant est consommé avec une libération maximale d'énergie. La Figure III-11-1 montre la température d'inflammation prévue en fonction des mélanges.

Tableau III-11-2. Propriétés des carburants¹

Carburant	Poids mol. (liquide)	Densité à 70 °F (eau=1)	Point ébul. 90 %		C _{st} ² dans l'air % vol.	Chaleur nette de la combustion		Point d'éclair		AIT minimale		Limites d'inflammabilité ³	
			°C	°F		Btu/lb	cal/g	°C	°F	°C	°F	Infér. % vol.	Supér. % vol.
Carburants d'aviation													
JP-4	125 ⁴	0,76	220	428	2,4	18 710	10 395	-18	0	230	446	1,3	8,2
JP-5	169	0,81	238	460	1,1	18 440	10 245	66	150	225	437	0,6	4,5
JP-6	147	0,84	260	500	1,3	18 620	10 345	38	100	230	446	0,7	4,8
JP-7		0,79	232	450	1,1	18 800	10 445	>60	140	241	465	0,6	4,5
JP-8	164	0,82	250	482	1,1	18 400	10 225	46	115	225	437	0,6	4,7
Jet A		0,82	250	482		18 590	10 328	>40	105	225	437	semblable	à JP-8
Jet B		0,76	220	428		18 780	10 435	<-18	0	230	446	semblable	à JP-4
TS (thermiquement stable)		0,78	222	432		18 400	10 225	>43	109				
Kérosène (type)		0,8	254	490	1,3	18 600	10 335	52	125	230	446	0,7	4,8
Essence 100/130		0,7	116	240	2,4	19 000	10 555	-45	-49	440	824	1,3	7,1
Essence 115/145		0,7	120	248	2,2	19 000	10 555	-45	-49	470	878	1,2	7,1
Gazole (octane 60)		0,8	325	617						225	437		
Carburants pour missiles													
JP-9	138	0,95	260	500		18 090	10 050	23	73	250	482		
JP-10	136	0,94				18 100	10 055	53	127	245	473		
RJ-4		0,93				18 140	10 075	71	160	329	624		
RJ-5		1,08				17 760	9 865	104	219	234	453		
RJ-6		1,02				17 700	9 830	61	142	232	450		

1. Tiré du document AFAPL-TR-85-2057 d'août 1985.

2. Valeurs calculées par $C_{st} = L_{25}/0,55$; C_{st} est la concentration de carburant stoechiométrique pour la combustion complète.

3. Limites à 25 °C (77 °F) ou au-dessus du point d'éclair.

4. Poids moléculaire = 78 à 70 °F pour la vapeur fractionnée.

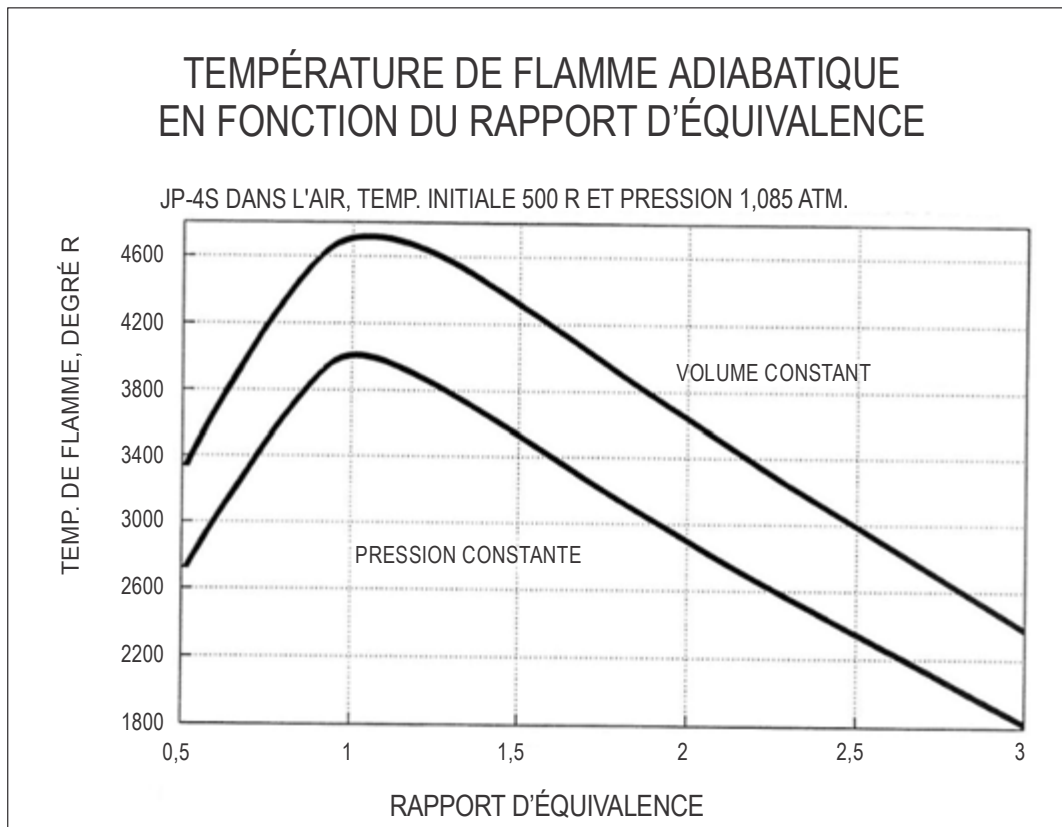


Figure III-11-1. Effets de l'enveloppe d'inflammabilité

11.4.2 Lorsque les processus de combustion ont lieu dans un réservoir de carburant fermé contenant des mélanges de vapeurs similaires à ceux qui sont indiqués plus haut, la libération d'énergie se traduit par une augmentation de la température à mesure que les gaz chauds sont produits. Si le réservoir est doté d'instruments, les transducteurs de pression enregistreront des hausses de pression, le maximum étant de 7 à 8 fois la pression initiale.

11.4.3 À mesure que l'altitude augmente, la pression de l'air diminue et la pression maximale de combustion en haute altitude diminue proportionnellement. Si l'augmentation de la pression à l'intérieur du réservoir dépasse la capacité du réservoir, le réservoir cède ; c'est l'explosion. La plupart des réservoirs de carburant d'aviation cèdent à moins de 20 lb/po² ; une explosion dans un réservoir de carburant aurait donc des résultats catastrophiques.

11.4.4 Toute la vapeur de carburant serait rapidement consommée dans une explosion ne laissant que peu ou pas de résidu de combustion incomplète. L'intérieur des surfaces du réservoir seraient propres et la rapidité (des secondes) du processus de combustion ne laisserait aucune décoloration ni dommage sur les surfaces du réservoir ou le câblage. C'est un exemple de la relation temps-température. Comme les forces explosives poussent contre les parois du réservoir, le mode de rupture du réservoir serait une rupture en traction. Les bords du faciès de rupture devraient le confirmer. Les réservoirs de carburant peuvent être entourés de structures légères et, même si le réservoir n'éclate pas, les structures légères pourraient se détacher de l'aéronef et ne pas se trouver dans la zone d'impact principale.

11.5 INCENDIES AU SOL

11.5.1 Les incendies au sol sont courants dans la plupart des accidents d'aviation et la source de combustible est le carburant. Le Tableau III-11-3 compare les incendies en vol avec les incendies au sol. Les incendies en vol peuvent atteindre des températures de 1 370 à 1 650 °C (2 500 à 3 000 °F), le carburant se mélangeant avec les grands volumes d'air à l'extérieur. Dans quelques cas rares, où le mélange est homogène, les températures peuvent atteindre 1 930 °C (3 500 °F). Les incendies au sol sont gouvernés par un processus de combustion par diffusion semblable à la combustion d'une chandelle où l'air (oxygène) doit être aspiré dans le feu. Ces incendies sont riches en carburant et produisent des nuages de fumée gris ou noirs et beaucoup de suie. La suie recouvre presque tout ce qui se trouve sur le site de l'accident. La suie, qui est du carburant partiellement brûlé, n'adhère à aucune surface dont la température est supérieure à 370 °C (700 °F) et cette relation temps-température peut aider l'enquêteur. La présence de forts vents localisés ou l'effet de cheminée (aspiration d'air) peuvent laisser des surfaces brûlées propres qui semblent hors contexte. Les flammes des feux en nappes ont une température de l'ordre de 650 à 980 °C (1 200 à 1 800 °F). Ces températures peuvent fondre l'aluminium mais non des métaux comme le cuivre. Lorsque l'aluminium fond, il se forme un oxyde de couleur terne sur la surface. Cet oxyde d'aluminium a une température de fusion plus élevée.

Tableau III-11-3. Comparaison de dommages types causés par les incendies

Indice	En vol	Au sol
Mécanisme	Mélange préalable carburant-air	Flamme de diffusion
Température des flammes, °C (°F)	1 370 à 1 650 (2 500 à 3 000)	760 à 980 (1 400 à 1 800)
Hauteur des flammes	Varie	Deux fois le diamètre de la nappe
Schéma de progression de l'incendie	Suit les filets d'air	Aléatoire
Aluminium en fusion	Projections, suivent les filets d'air	Globules, suivent la gravité
Suie	Traînée suivant la zone d'incendie	Aléatoirement sur les surfaces < 700 °F
Éraflures sur la surface de l'aéronef	Sur la suie	Sous la suie
Faciès de rupture	Propres	Couverts de suie
Éléments tordus	Brûlés/suie	Suie sur les surfaces extérieures
Éléments hors de la zone d'impact	Brûlés/suie	Propres

11.6 SOURCES D'INFLAMMATION

11.6.1 Les sources d'inflammation dans les aéronefs sont normalement de nature thermique ou électrique. Cependant, si des marchandises sont incorrectement identifiées sur les colis, il pourrait aussi y avoir des sources d'inflammation chimiques associées aux marchandises dangereuses (Annexe 18 et Doc 9284, *Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses*).

Sources d'inflammation thermique

11.6.2 Les sources d'inflammation thermique sont normalement associées aux surfaces extérieures des moteurs, aux circuits de prélèvement d'air, aux systèmes d'échappement des moteurs ou aux groupes auxiliaires de puissance. Le contact du carburant ou de l'huile avec une de ces surfaces chaudes peut amorcer un incendie. L'évolution des

réacteurs a réduit les risques d'inflammation par contact avec les surfaces chaudes des chambres de combustion et le carénage et la conception des moteurs ont permis de porter à moins de 370 °C (700 °F) les températures des surfaces exposées. Cette température est importante. Même si elle est au-dessus de l'AIT du carburant, soit 230 °C (450 °F), les données d'essais en laboratoire et de nacelles à l'échelle ont montré que, dans un flux d'air, le carburant en contact avec une surface dont la température est inférieure à 370 °C (700 °F) ne s'enflamme pas. La ventilation des compartiments moteurs fait partie de la conception de la nacelle. Les petits avions privés ont des collecteurs d'échappement non protégés qui peuvent être une source d'inflammation.

11.6.3 Le circuit de prélèvement d'air transporte l'air chaud dans une série de gaines isolées munies de commandes et de colliers. Des connexions et des commandes isolées mal entretenues peuvent porter la température des surfaces exposées à plus de 230 °C (450 °F). Si un fluide est piégé à cet endroit, sans circulation d'air, une inflammation spontanée du carburant est possible. Une fuite d'air de prélèvement peut aussi endommager les écrous de raccordement, qui se desserrent et causent une fuite de carburant. La force d'une fuite d'air de prélèvement peut aussi ronger l'isolant du câblage électrique et mettre les conducteurs à nu.

11.6.4 Des pompes carburant surchauffées, la chaleur provenant de roulements carbone usés et des roues de compresseur qui frottent ont toutes été des sources d'inflammation menant à l'explosion de réservoirs de carburant. L'inflammation électrique cependant n'a pas été une source d'inflammation dans les réservoirs de carburant.

Sources d'inflammation électrique

11.6.5 Le vieillissement des flottes de tous les types d'aéronefs augmente les risques de défaillance des câblages. Les nombreuses inspections, les travaux de maintenance et les modifications apportées augmentent aussi la possibilité que l'usure par frottement des câbles conduise à la formation d'arcs et à l'incendie. L'usure par frottement est l'une des principales causes des incendies électriques. L'enquêteur doit savoir ce qui se produit lorsqu'un fil électrique se brise. En l'absence de courant, la rupture est nette et présente une surface concave-convexe typique avec striction. Lorsqu'un courant passe, un arc se forme au point de rupture. La chaleur localisée produit des globules ou perles sphériques à l'extrémité des brins. La formation d'arcs entraîne aussi une recristallisation des brins. Le fil qui était auparavant souple est maintenant un fil rigide. Le frottement avec la structure de l'aéronef causera des piqûres et le noircissement de la zone où s'est produit l'arc. L'analyse en laboratoire peut confirmer qu'il y a transfert de métal (cuivre). Le produit tension-courant de l'arc constitue une source thermique de fusion des fils. Un court-circuit de 20 A sur un système de 28 V se traduit par une puissance de 560 W qui se dissipe autour de l'endroit où se produit l'arc. Cette énergie enflamme l'isolant et les autres matériaux. Dans la plupart des accidents il faut deux défaillances pour provoquer un incendie, mais un arc électrique produit à la fois la source d'inflammation et le combustible. La formation d'un arc électrique sur un circuit hydraulique, par exemple, crée un trou d'épingle par lequel s'échappe un fin brouillard qui s'enflamme au contact de l'arc.

11.6.6 L'arc peut être en courant alternatif (CA) ou en courant continu (CC). L'arc CA est considéré comme le plus grave parce que les disjoncteurs de l'aéronef peuvent tolérer un courant beaucoup plus intense pendant un court moment et l'onde sinusoïdale du CA forme un arc chaque fois qu'elle traverse le point zéro.

11.6.7 Un incendie extérieur au câble brûle d'abord l'isolant et le conducteur garde un aspect net et brillant, sauf si l'isolant est complètement brûlé. Lorsqu'un câble brûle sous l'effet d'un courant d'une intensité excessive, il brûle de l'intérieur vers l'extérieur et le conducteur noircit et s'oxyde, parfois sans causer de dommage à l'enveloppe extérieure.

11.6.8 L'examen des ampoules électriques aidera à déterminer si un circuit donné était sous tension au moment de l'impact. Si le filament est chaud au moment de l'impact, il s'allonge et se déforme sensiblement ; s'il est froid au moment de l'impact, il se brise mais garde sa forme et sa disposition originales. Si le verre de l'ampoule se brise et le filament est exposé à l'air, le filament présente les mêmes indices mais il s'oxyde et change rapidement de couleur.

11.7 EFFETS DE L'INCENDIE SUR LES MÉTAUX

11.7.1 Le feu a pour effet de diminuer la résistance des alliages métalliques qui y sont exposés. L'alliage 7075 T6, par exemple, perd 10 % de sa résistance lorsqu'il est chauffé pendant 30 minutes à 205 °C (400 °F). Il faut évaluer avec prudence la perte de résistance en fonction de l'exposition au feu. Cette exposition peut être localisée et la masse de métal peut absorber la chaleur avant qu'il ne se produise un changement quelconque dans la pièce. Il convient de consulter un laboratoire de métallurgie pour toute question concernant les pertes de résistance.

11.7.2 L'acier inoxydable commence à se décolorer entre 425 et 480 °C (800 et 900 °F), passant d'une couleur beige au bleu clair, au bleu vif, puis au noir. L'enquêteur doit vérifier les deux faces des pièces en acier inoxydable : la face qui n'a pas été exposée à la chaleur est d'un bleu plus clair et la surface de la partie chauffée a un diamètre plus faible que sur l'autre face.

11.7.3 Il est difficile de lire la relation temps-température du titane. Le titane passe du beige au bleu clair, au bleu foncé puis au gris lorsqu'il est chauffé, mais certains changements de couleur sont possibles lorsqu'il est maintenu à une température spécifique pendant une période de temps déterminée. L'exposition du titane à une température de 315 °C (600 °F) pendant 260 minutes produit le même changement de couleur qu'une exposition à une température de 540 °C (1 000 °F) pendant 15 minutes. L'affinité du titane pour les gaz augmente avec la température ; des écailles commencent à se former vers 595 °C (1 100 °F) et leur épaisseur augmente avec le temps d'exposition à cette température, il prend une couleur bleuâtre à 595 °C (1 100 °F). Entre 650 et 815 °C (1 200 et 1 500 °F), il prend une couleur grise ou jaunâtre. À 880 °C (1 620 °F), le métal passe de la forme alpha à la forme bêta et le taux d'oxydation augmente.

11.7.4 Les feux de titane en vol sont normalement associés aux turbomachines. Le moteur, qui fonctionne à des pressions plus élevées, fournit l'oxygène nécessaire à la combustion des oxydes de titane. Le titane fondu réagit avec l'oxygène pour former un oxyde (TiO_2) qui se stabilise autour de 3 095 °C (5 600 °F). L'air enrichi d'oxygène crée la haute pression requise pour maintenir l'incendie. Les feux de titane ne se produisent pas aux pressions atmosphériques. Un feu de titane dans un moteur brûle le carter de titane en nid d'abeilles, mais la structure plus grande et plus lourde n'est pas endommagée. Lorsque ce type d'incendie se produit, il faut consulter le motoriste pour avoir l'historique des moteurs de la série.

11.8 STRUCTURES COMPOSITES

Les composites sont de plus en plus couramment utilisés dans la construction des avions. Ils sont constitués de couches de fibres collées à l'aide de résines thermodurcissables. Les fibres sont disposées en couches appliquées à des angles différents pour obtenir la résistance souhaitée. Il existe des combinaisons de fibre de verre-époxyde, de carbone-époxyde et de carbone-bismaleimide. Lorsqu'elle est exposée au feu, la résine se consume. Les résines époxydes se décomposent aux environs de 260 °C (500 °F), mais les nouvelles résines ont une température de décomposition plus élevée. La combustion des composites est plus évidente aux bords de fuite où les fibres qui restent battent l'air. Les dommages causés aux composites par le feu peuvent ne pas être apparents et l'effet de fenêtrage peut être le seul indice présent. Cet effet se produit lorsque la suie recouvre complètement la partie supérieure d'un obstacle, tel qu'une nervure, tout en laissant un espace près du côté inférieur. Dans un incendie au sol, les minces panneaux composites peuvent brûler en laissant la matrice, mais la pression d'une lance d'incendie peut détacher les matrices des surfaces verticales exposées. Les composites plus épais employés dans les structures principales ne devraient pas être endommagés par un incendie au sol. Il faut être prudent dans la manipulation des matériaux composites, car ils peuvent être dangereux pour la santé.

11.9 ÉVALUATION DES LIEUX DE L'ACCIDENT

11.9.1 L'enquêteur doit effectuer une évaluation générale des dommages causés par un incendie consécutif à l'impact. Cette évaluation l'aidera à découvrir si l'incendie au sol a endommagé les parties de l'aéronef soupçonnées d'avoir causé l'incendie en vol.

11.9.2 L'enquêteur doit s'attendre à trouver de l'aluminium fondu déposé en nappe sur le sol si l'incendie est important. Les minces revêtements d'aluminium fondent. Il est possible de trouver de minces glaces de hublots, sans les sections centrales, mais sans que les bords présentent des indices de fusion. Les contraintes thermiques de l'incendie en sont la cause. Les sections transversales plus épaisses peuvent demeurer intactes, mais présenter un affaissement. La capacité thermique des éléments plus gros leur donne une résistance à la fusion ; cette capacité crée aussi une surface chaude qui peut se refroidir lentement et donc brûler une partie de la suie de l'incendie au sol où les températures de surface sont inférieures à 370 °C (700 °F). Les décalcomanies détruites par le feu peuvent contribuer à la présence de traces discontinues inhabituelles.

11.9.3 Il est important d'avoir une vue d'ensemble de la disposition des débris. Repérer les pièces qui vont ensemble et évaluer les dommages sur les deux faces et sur les bords. Si les traces du feu continuent d'une section à l'autre, les dommages se sont probablement produits en vol. Si les ruptures des bords sont nettes, elles se sont produites en vol ou au moment de l'impact initial avec le sol. Un dépôt uniforme de suie dans les fissures indique une exposition à un incendie après impact. À noter que les dommages causés par le feu à l'intérieur de surfaces pliées seront protégés durant un incendie au sol. Tout dommage important situé à l'intérieur des surfaces protégées peut indiquer qu'il y a eu un incendie en vol. Vérifier les dommages extérieurs pour confirmer l'hypothèse. Repérer les pièces qui ont été projetées hors de la zone d'impact ; tout dommage causé par le feu à ces pièces a fort probablement été causé avant l'impact (voir la Figure III-11-2).

11.9.4 Les peintures des surfaces de l'aéronef subiront plusieurs changements de couleur selon la température d'exposition. Les Tableaux III-11-4 et III-11-5 montrent, respectivement, les effets de la température sur la peinture époxyde et sur l'apprêt de zinc. Une corrélation avec les dommages thermiques observés sur les lieux de l'accident peut aider à déterminer le moment où l'événement s'est produit.

Tableau III-11-4. Réaction de la peinture époxyde au feu

Température, °C (°F)	Indice
205 (400)	Ramollissement
315 (600)	Décoloration
425 – 455 (800 – 850)	Cloquage
480 – 510 (900 – 950)	Destruction

Tableau III-11-5. Réaction de l'apprêt de zinc au feu

Température, °C (°F)	Indice
230 (450)	Beige
260 (500)	Brun
315 (600)	Brun foncé
370 (700)	Noir
425 – 455 (800 – 850)	Cloquage

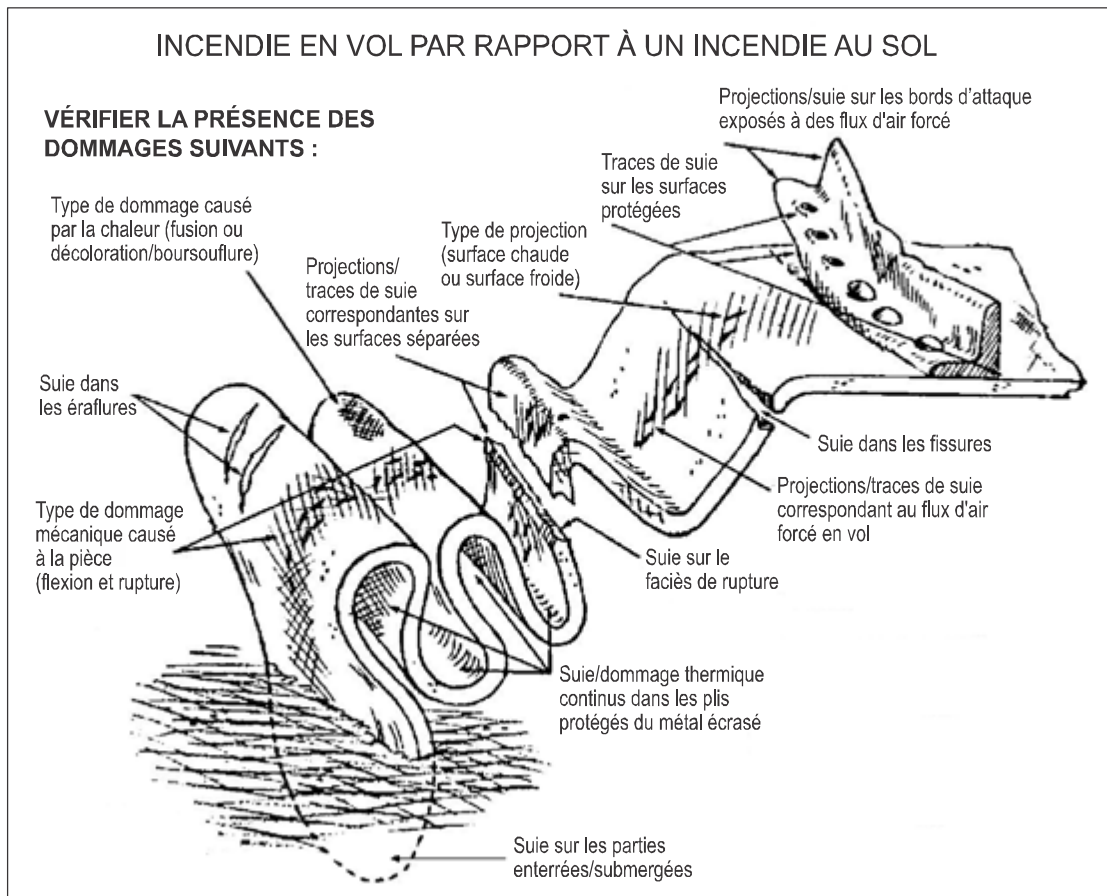


Figure III-11-2. Évaluation des dommages sur l'épave

11.9.5 La relation entre le temps et la température n'est pas toujours précise, mais elle peut aider à orienter l'enquête. Une exposition à une température élevée pendant quelques minutes peut donner une apparence similaire à une exposition à une température plus basse pendant plus longtemps. Une analyse en laboratoire peut être nécessaire. Le Tableau III-11-6 peut aider à confirmer l'intensité du feu observée.

Tableau III-11-6. Couleur du feu selon la température

Couleur	Température en °C (°F)
Légèrement rouge	500 – 550 (930 – 1 020)
Rouge	550 – 650 (1 020 – 1 200)
Orange	650 – 750 (1 200 – 1 380)
Jaune-orange	750 – 850 (1 380 – 1 560)
jaune	850 – 1 000 (1 560 – 1 830)
Blanc-jaune	1 000 – 1 200 (1 830 – 2 190)

11.9.6 Une fois que l'examen général du lieu de l'accident est terminé, comparer les photos disponibles avec les observations. L'enquêteur doit demander la prise de photos supplémentaires au besoin.

11.9.7 Il est très utile d'examiner un aéronef semblable pour mieux connaître les traînées normales des fluides ou de la saleté à l'intérieur comme à l'extérieur de l'aéronef. L'enquêteur doit vérifier les endroits où des résidus hydrauliques peuvent s'accumuler, car la suie peut s'y déposer. En vol, il devrait y avoir une trace d'écoulement caractéristique sur l'empennage, les ailes et la surface inférieure du fuselage. Les rivets et les parties en saillie situées en aval de l'écoulement d'air créent une zone de basse pression et laissent une zone non souillée sur la trace de suie. L'enquêteur doit rechercher ces indices sur le site de l'accident.

11.9.8 L'enquêteur qui a des doutes sur un système particulier devrait consulter un spécialiste de la maintenance pour l'aider à identifier les composants de ce système sur les lieux de l'accident. Les conduites hydrauliques du côté alimentations sont soit en acier inoxydable, soit en titane, et ne seront pas endommagées par l'incendie. Les conduites de retour à basse pression peuvent être en aluminium, comme le sont toutes les conduites des petits avions de l'aviation générale. Si les conduites en aluminium contiennent des fluides, les dommages causés par le feu peuvent être limités ; si elles sont vides, par suite de l'épuisement des systèmes, elles seront endommagées en moins de cinq minutes d'exposition au feu.

11.9.9 S'il y a eu un incendie en vol, quelle qu'en soit la durée, des dommages importants devraient apparaître autour de la zone touchée par l'incendie. L'aluminium fond et les gouttelettes sont projetées et se collent aux surfaces métalliques en aval de l'incendie. Les effets d'un incendie en vol sur les structures en aluminium ont généralement l'aspect de « poils de balai » ou de « barbe de plumes » : à l'impact, l'aluminium chaud commence à se séparer et à former des brins minces ou de fines strates, qui sont une autre preuve d'un incendie.

11.9.10 Dans la recherche des indices d'un incendie en vol, il ne faut pas négliger les pièces qui se trouvent en amont de la trajectoire de vol ni les pièces qui sont peut-être enfouies dans le cratère d'impact. Ces pièces ne devraient porter aucune marque d'incendie au sol.

11.9.11 L'enquête sur les lieux de l'accident devrait être suivie d'une reconstitution de l'aéronef dans un hangar. La reconstitution va de la disposition des éléments sur le plancher du hangar en laissant un espace entre les pièces jusqu'à la reconstitution sur un support, comme dans le cas de l'aéronef du vol TWA 800. C'est à cette étape que l'enquêteur peut rassembler les pièces qu'il soupçonne d'avoir contribué à l'accident. Il doit être préparé à amorcer cette phase de l'enquête sans savoir où a commencé l'incendie ni quelle est la source exacte d'inflammation. Le Chapitre 8 donne de plus amples renseignements sur la reconstitution de l'épave.

11.9.12 Après la reconstitution de l'aéronef, l'enquêteur doit chercher à déterminer si les traces d'incendie suivent la direction des filets d'air en vol. S'il n'y a pas de continuité dans les traces de part et d'autre des lignes de rupture, les traces observées ont été formées après la désintégration de l'aéronef.

11.9.13 Un incendie à l'intérieur de la cabine se développera lentement et les transcriptions des conversations de l'équipage de conduite avec la tour de contrôle devraient permettre à l'enquêteur de localiser l'origine de l'incendie. Les données des enregistreurs de bord indiqueront la séquence des événements. Il faut déterminer si la formation d'arcs ou la surcharge de circuits sont la source d'inflammation. Cette source peut être plus difficile à localiser dans le cas des feux de soute ; l'enquêteur doit alors établir, à partir du manifeste des marchandises ou des documents d'expédition et des renseignements tirés des débris, si les marchandises transportées contenaient des éléments qui pouvaient produire de la chaleur, réagir chimiquement ou avoir une composition acide.

11.9.14 Pour permettre d'évaluer, durant l'enquête de l'accident du vol 111 de Swissair, la température atteinte par les centaines de pièces endommagées par la chaleur, divers gabarits thermiques ou éprouvettes de référence de température ont été produits dans un laboratoire à atmosphère contrôlée. Ces éprouvettes se composaient d'échantillons représentatifs des matériaux utilisés dans la fabrication du MD-11, peints conformément aux directives originales du constructeur. Chaque éprouvette de température a été chauffée à une température fixe pendant un délai

précis. Les éprouvettes de référence ont été produites par paliers de 10 °C (50 °F) à des températures allant de 150 à 590 °C (300 à 1 100 °F) et des durées d'exposition de 10, 20 et 30 minutes. Toutes les éprouvettes présentaient un ternissement du fini de la peinture, qui indiquait la température de cuisson et de la durée d'exposition. L'effet d'une immersion dans l'eau de mer des échantillons ainsi chauffés a également été déterminé et l'effet sur le ternissement était négligeable à la plupart des températures. Des centaines de morceaux de la structure de l'avion et des gaines de conditionnement d'air présentaient des signes de dommages causés par la chaleur. Les morceaux récupérés ont été comparés aux éprouvettes de température fabriquées avec des matériaux identiques afin de pouvoir déterminer la température approximative et la durée d'exposition. Ces données ont servi à établir le profil thermique et la répartition de la température dans l'espace inoccupé de l'avion endommagé par l'incendie.

11.10 CONSEILS POUR L'ENQUÊTE SUR LA PROPAGATION DE L'INCENDIE

11.10.1 Une méthode permettant de déterminer si une pièce a été soumise à un incendie au sol consiste à noter l'emplacement de cette pièce par rapport à la zone évidente d'incendie au sol. Des morceaux de l'aéronef ou des gouttelettes de métal fondu peuvent s'être détachés en vol et retrouvés le long de la trajectoire de vol. D'autres morceaux peuvent avoir été projetés complètement en dehors de la zone d'incendie au moment de l'impact ou d'une explosion. Même des pièces retrouvées dans la zone d'incendie au sol peuvent ne porter aucune trace de cet incendie. Il arrive souvent que des débris soient enfouis sous une couche protectrice de terre aussi bien dans la zone de l'impact initial que dans la zone où l'aéronef s'est immobilisé. Parfois la zone de l'impact consiste juste en un cratère d'où l'épave doit être extraite, auquel cas l'incendie au sol est très limité sauf en cas d'explosion à l'impact, les morceaux de l'épave se trouvant protégés de l'incendie par la terre qui les recouvre. Lorsque l'impact se produit dans un marécage ou sur un plan d'eau, les débris peuvent être ensevelis ou submergés. À la suite des opérations de lutte contre l'incendie, certains débris peuvent être recouverts de mousse ou d'agents chimiques en poudre, ou être submergés par du carburant non brûlé.

11.10.2 La suie est entraînée par les filets d'air jusqu'au moment où elle frappe un objet auquel elle peut se fixer grâce aux huiles non brûlées qu'elle contient ou par attraction électrostatique. À noter que la suie ne se fixera pas à des surfaces dont la température est supérieure à 370 °C (700 °F). Par conséquent, les zones qui révèlent la plus forte intensité d'incendie peuvent ne contenir que peu ou pas de suie.

11.10.3 Il existe d'excellents ouvrages de référence qu'un enquêteur sur les incendies devrait avoir à portée de la main durant ses enquêtes :

- "Aircraft Mishap Fire Pattern Investigations", AFWAL-TR-85-2057, par Kutcha et Clodfelter
- "Aircraft Mishap Investigation Handbook for Electronic Hardware", WL-TR-4004, par Donald Galler, etc.
- "Guide for Fire and Explosion Investigations", NFPA 921.

— — — — —

Appendice au Chapitre 11

Glossaire de l'inflammabilité

Diffusion. Tendence d'un gaz ou d'une vapeur à se disperser dans un autre gaz ou une autre vapeur ou à se mélanger à cet autre gaz ou à cette autre vapeur.

Limite inférieure d'inflammabilité (LFL). Concentration minimale d'une vapeur permettant la propagation des flammes. Les flammes ne se propagent pas à des concentrations inférieures du mélange.

Limite supérieure d'inflammabilité (UFL). Concentration maximale d'une vapeur permettant la propagation des flammes. Les flammes ne se propagent pas à des concentrations supérieures du mélange.

Point d'éclair. Température minimale d'un liquide à laquelle il y a suffisamment de vapeurs pour former un mélange inflammable avec l'air qui se trouve près de la surface du liquide.

Propagation des flammes. Progression des flammes sur la surface d'un mélange vapeur-air inflammable à partir d'une seule source d'inflammation.

Stœchiométrique. Mélange idéal de combustible et d'air dans des proportions qui permettent une combustion complète du combustible, libérant ainsi un maximum d'énergie.

Stratification. Distribution non uniforme de vapeurs dans un contenant fermé. La masse moléculaire (chimique) des vapeurs, plus lourde que l'air, fait qu'elles ont tendance à se déposer. À une certaine distance au-dessus de la surface du liquide, les vapeurs deviennent inflammables dès que la température du liquide est supérieure au point d'éclair.

Température d'auto-inflammation. Température d'inflammation spontanée d'un gaz ou d'un mélange vapeur-air inflammable à partir de sa propre source de chaleur ou au contact d'une surface chaude et en l'absence d'étincelle ou de flamme.

Vitesse de régression. Vitesse de combustion verticale en fonction de la durée de combustion d'une nappe de liquide. Utile pour déterminer la durée d'un feu en nappe. La vitesse de régression des carburants d'aviation est de 0,76 à 1,01 cm/min (0,3 à 0,4 po/min).

Volatilité. Tendence ou capacité d'un liquide à se vaporiser. La volatilité augmente à mesure que le liquide est chauffé.

Chapitre 12

ENQUÊTE SUR LES GROUPES MOTOPROPULSEURS

12.1 GÉNÉRALITÉS

12.1.1 L'enquête sur les groupes motopropulseurs porte normalement sur les moteurs, les circuits de carburant et d'huile, les hélices et leurs mécanismes de commande, les tuyères d'éjection, les inverseurs de poussée (s'il y a lieu), les fuseaux et berceaux moteurs et, lorsque les moteurs sont placés dans des fuseaux séparés, les fixations des fuseaux moteurs à la cellule, les cloisons pare-feu et les capots, les mécanismes d'entraînement auxiliaires, les régulateurs des hélices à vitesse constante, les dispositifs d'antigivrage des moteurs et des hélices, les détecteurs et extincteurs d'incendie des moteurs et les commandes des moteurs.

12.1.2 Les défaillances et les dysfonctionnements des groupes motopropulseurs contribuent souvent aux accidents d'aviation. C'est pourquoi il est indispensable de procéder à un examen minutieux du groupe motopropulseur et de ses composants pour déterminer s'ils ont contribué à l'accident. Il faut soigneusement recueillir des échantillons de tous les fluides de l'aéronef et les quantités présentes dans les systèmes doivent être enregistrées le plus tôt possible car ils peuvent se contaminer ou fuir. La section 12.7 donne d'autres renseignements à ce sujet.

12.1.3 Dans la plupart des cas, il est impossible de procéder à un démontage complet, ou même partiel, d'un moteur alternatif ou d'une turbomachine sur les lieux de l'accident et, dans le cas des moteurs modernes complexes, il faut bien se garder de les démonter. Seuls les très petits moteurs simples peuvent être démontés et seulement en cas de nécessité absolue.

12.1.4 Il ne faut procéder sur les lieux de l'accident qu'à un examen superficiel en apportant une attention particulière aux commandes ou aux tuyauteries de carburant qui relie le moteur à la cellule. Il faut faire largement appel à la photographie ; les photos couleur sont utiles dans les cas où l'on soupçonne des fuites d'huile et/ou des incendies en vol. Les photos des marques laissées au sol par l'hélice et les photos des éléments d'admission et d'éjection des réacteurs peuvent fournir des informations sur le fonctionnement des moteurs au moment de l'impact. Ces éléments peuvent être facilement contaminés ou masqués et ils doivent être documentés rapidement.

12.1.5 Dans le cas des moteurs modernes complexes, il est très utile, et même nécessaire, que le Groupe des groupes motopropulseurs comprenne un représentant qualifié du motoriste, possédant de préférence l'expérience des méthodes et des techniques d'enquête sur les accidents d'aviation. Si c'est impossible, il convient de faire appel à un technicien compétent ayant une expérience considérable de l'entretien et de la révision du moteur en cause pour aider dans l'enquête.

12.1.6 Après une étude préliminaire sur les lieux de l'accident, il faut prendre les dispositions nécessaires pour faire transporter le ou les groupes motopropulseurs dans un laboratoire agréé afin de procéder aux essais et à un examen ou à un démontage détaillé. Ces essais et ces examens devraient être confiés dans la mesure du possible à un organisme de maintenance agréé.

12.1.7 Avant de démonter un moteur ou ses accessoires, il faut toujours envisager la possibilité de faire faire des essais au banc dans des conditions contrôlées. Ces essais doivent être effectués avec prudence afin d'éviter d'endommager davantage le moteur ou la cellule et de ne pas blesser le personnel effectuant les essais.

12.1.8 Avant qu'un moteur ne soit enlevé des lieux de l'accident, l'enquêteur doit s'assurer, dans la mesure où l'état de l'épave le permet, que le moteur était capable de fournir de la puissance. En plus de l'examen décrit plus haut, il importe également de s'assurer que le moteur était convenablement alimenté en carburant et en huile, que les robinets de carburant étaient convenablement réglés, que les tuyauteries n'étaient pas obstruées, que les réservoirs de carburant et d'huile étaient propres et que les tuyauteries et les mises à l'air libre n'étaient pas obstruées. Il faut s'assurer que les manettes des gaz étaient correctement montées et, dans le cas des moteurs alternatifs, vérifier le circuit d'allumage depuis les commutateurs jusqu'au distributeur. De nombreux accidents ont été provoqués par des filtres à carburant, des filtres hydrauliques ou des filtres à huile sales ou obstrués, provoquant une perte de puissance.

12.2 TURBINES À GAZ

12.2.1 Une turbine à gaz est normalement composée du système de propulsion complet, qui comprend le moteur (Figure III-12-1) ainsi que le système nacelle et pylône. Le système complet peut inclure les pompes, les commandes, les génératrices, les pare-feu et les détecteurs et extincteurs d'incendie associés au groupe motopropulseur.

12.2.2 Les systèmes de propulsion ont gagné en fiabilité, comme en complexité, avec le développement de grandes installations de réacteurs à double flux. Vu leur plus grande fiabilité, il y a moins de probabilités que ces moteurs soient la cause directe d'un accident, mais un dysfonctionnement mineur de ce système peut se conjuguer à l'erreur humaine dans la chaîne d'événements pour conduire à un accident. Il est donc important de tenir compte de toute anomalie du groupe motopropulseur et de l'incidence qu'elle a pu avoir sur les interventions de l'équipage de conduite dans l'accident sous enquête. Même s'il n'y a aucun indice particulier d'un dysfonctionnement, l'examen des groupes motopropulseurs eux-mêmes est souvent important pour déterminer l'ensemble des facteurs d'impact avec le sol, comme les angles de roulis et de tangage.

12.2.3 Dans la plupart des cas, un enquêteur spécialisé dans les turbines à gaz pourra déterminer l'état du groupe motopropulseur avant l'impact ainsi que les circonstances de l'orientation de l'aéronef dans un impact avec le sol. Cet examen est généralement fait sur les lieux de l'accident et doit toujours être documenté par des photos.

12.2.4 S'il y a des indices de dysfonctionnements ou d'anomalies, il faut prendre les dispositions nécessaires pour le transport des systèmes en cause, tels qu'ils sont assemblés, à un endroit approprié où ils pourront être démontés pour déterminer les causes du problème. Il est utile que des experts ayant de l'expérience dans les causes de ces anomalies soient présents au moment du démontage.

Organisation

12.2.5 Les enquêteurs sur les accidents impliquant des groupes motopropulseurs trouveront utile les listes de vérifications fournies plus loin ; elles leur permettront d'évaluer rapidement et plus systématiquement les systèmes de propulsion dans les accidents. Ces listes visent à aider les spécialistes des groupes motopropulseurs à organiser leur travail sur les lieux de l'accident et à orienter l'examen de points ou de scénarios particuliers.

Sur les lieux de l'accident

12.2.6 Si les conditions le permettent, l'enquêteur doit repérer les groupes motopropulseurs dès son arrivée sur les lieux de l'accident, évaluer la possibilité d'un incendie en vol, et vérifier la présence d'éléments de rotor non confinés et l'état visible de l'entrée et de la sortie des moteurs. Les enquêteurs doivent employer des méthodes standard pour évaluer les indices d'incendie (feux en nappe au sol ou incendies en vol). Ils doivent connaître le modèle de moteur et les sources possibles de fluides inflammables et travailler avec d'autres groupes d'enquête pour déterminer si des dommages consécutifs à un incendie ont été causés aux structures de l'aéronef.

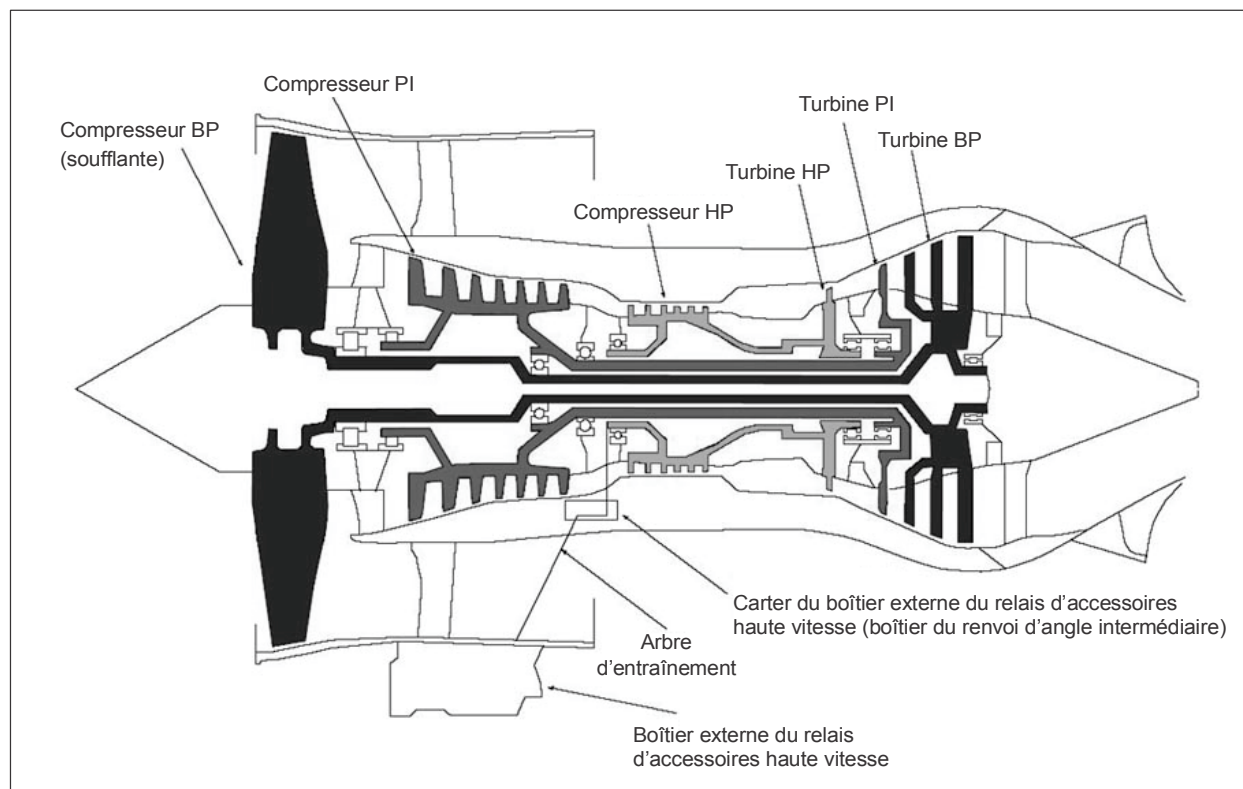


Figure III-12-1. Moteur type d'un gros avion de transport

12.2.7 Il est essentiel de déterminer s'il y a des éléments de rotor non confinés, car leur présence indique à la fois une perte de puissance en vol et une source possible d'incendie et/ou de dommages consécutifs. Cette partie de l'examen peut être courte si les carters des moteurs ne présentent pas de signes de rupture, mais elle doit être beaucoup plus détaillée si les carters se sont cassés sous les forces d'impact avec le sol. Dans ce cas, qui est courant, l'enquêteur doit utiliser son expérience personnelle de l'examen d'accidents précédents comportant des défaillances moteur non confinées et son expérience des enquêtes sur les incidents en service, et comparer l'accident avec les photos historiques qui peuvent être disponibles.

12.2.8 L'examen de l'étage d'entrée et de l'étage de sortie des moteurs doit se faire sur place pour évaluer la capacité de puissance et l'état des moteurs au moment de l'impact au sol. Cet examen doit être constamment révisé et actualisé à mesure que de nouveaux renseignements deviennent disponibles, notamment ceux fournis par d'autres groupes.

12.2.9 La raison pour laquelle il faut déterminer la capacité de puissance des moteurs est d'abord d'établir s'il s'est produit une perte inattendue de puissance. Des signes plus subtils peuvent indiquer un écart par rapport à la phase de vol et aux manœuvres attendues de l'équipage. Par exemple, si l'enquête pose comme hypothèse une faible puissance comme celle qui correspond à une approche normale, il est important de confirmer l'hypothèse par un examen des moteurs.

12.2.10 L'analyse et l'évaluation de la capacité de puissance doivent porter à la fois sur la puissance présente au moment de l'impact avec le sol ainsi que sur la capacité des moteurs de développer une puissance normale avant l'impact au sol. Des difficultés peuvent se présenter si l'écrasement des structures souples des nacelles contre la partie amont du moteur masque partiellement certaines parties des aubages.

12.2.11 Si les aubages ont été endommagés par l'ingestion de corps étrangers ou par une défaillance interne du moteur, l'évaluation peut être facile. Cependant, si ces dommages ne sont pas évidents, il faut déterminer si le carter moteur s'est écrasé contre les étages visibles du rotor et, le cas échéant, les dommages subis par les aubages. Des signes de dommage autour de la circonférence complète du rotor confirme généralement que les dommages se sont produits à haute puissance tandis que le flambage et l'écartement locaux des aubes dénotent qu'ils se sont produits à faible puissance.

12.2.12 Il faut être prudent lorsque les moteurs se détachent de l'aéronef au moment de l'impact, car leur culbutage est probable. Dans ce cas, les dommages causés par les carters aux rotors peuvent se produire à l'avant ou à l'arrière du moteur, ou aux deux extrémités, mais à des moments différents. Vu que les étages avant et arrière sont connectés par un arbre commun, un écrasement à haute puissance contre les étages amont peut gripper le moteur de sorte que les dommages causés aux étages aval semblent s'être produits à faible puissance.

12.2.13 Même si les moteurs ne sont pas en cause dans l'accident, certains indices donnés par les moteurs peuvent être utiles si l'on soupçonne une perte violente de contrôle de l'aéronef. Dans un tel scénario, il est possible que les moteurs, même s'ils fonctionnaient à la puissance normale, se soient violemment déplacés autour de leur axe et aient ainsi produit des charges gyroscopiques importantes sur les rotors de soufflantes de grand diamètre. Les indices de cette situation peuvent être trouvés sur les lieux de l'accident par l'examen des aubes et du carter moteur.

12.2.14 Même si les examens proposés peuvent être ou sont souvent effectués sur les lieux de l'accident par les enquêteurs sur les groupes motopropulseurs, il est important de souligner qu'une des plus grandes contributions d'un enquêteur est de trouver des éléments qui ne sont pas là où ils devraient être et de vérifier toutes les constatations jusqu'à orienter l'enquête vers la voie de recherche la plus simple.

Où commencer

12.2.15 Les listes suivantes contiennent les tâches principales que doit réaliser le spécialiste des groupes motopropulseurs dans les premières étapes de l'enquête. L'enquête sur les moteurs fait partie du plan général d'enquête et il est donc nécessaire d'assurer une coordination étroite avec les autres groupes. La première tâche de l'enquêteur des groupes motopropulseurs sur les lieux de l'accident est de dresser un inventaire des éléments du groupe motopropulseur, comme il est indiqué ci-dessous.

Éléments de base

- Quelle était la puissance de poussée commandée ?
- Quelle était la puissance de poussée produite ?
- Quels dysfonctionnements se sont produits ?
- Quelles directives ont été données à l'équipage ?

Plan général d'enquête

- a) Inventaire des éléments
- b) États de maintenance et registres de matériel
- c) Photographie
 - Photos sur les lieux de l'accident
 - Photos du démontage
- d) Examen sur le terrain
- e) Récupération
- f) Démontage en laboratoire

Inventaire des éléments du groupe motopropulseur

- Admission
- Nacelle (y compris l'inverseur s'il y a lieu)
- Soufflante
- Compresseurs
- Brûleur
- Turbines
- Échappement
- Éléments externes

Jusqu'où aller

12.2.16 Durant l'enquête, le spécialiste des groupes motopropulseurs vérifie normalement la présence de dysfonctionnements des moteurs selon les listes de contrôle indiquées ci-dessus. Après avoir répondu aux **questions de base**, l'enquêteur doit aussi aider les autres groupes, comme le Groupe des structures, à évaluer l'incidence des moteurs sur l'assiette d'impact avec le sol par rapport à leur axe longitudinal et latéral de montage sur l'aéronef. Si les examens révèlent un dysfonctionnement des moteurs, il est alors prudent d'organiser un plan de suivi des points e) et f) dans le cadre du **Plan général d'enquête**. S'il est estimé que le moteur fait partie de la chaîne causale de l'accident, les facteurs potentiels doivent aussi être examinés, par exemple :

Non-confinement :

- Y avait-il une source de fluide inflammable ?
 - Y avait-il une source d'inflammation ?
 - Y a-t-il eu un incendie ?
 - Des dommages ont-ils été indirectement causés à d'autres systèmes ?
- Tous ces points doivent être documentés et être accompagnés d'observations.*

Incendie en vol seulement :

- Y avait-il des matériaux inflammables ?
 - Y avait-il une source d'inflammation ?
 - Le système d'extinction d'incendie a-t-il été efficace ?
- Tous ces points doivent être documentés et être accompagnés d'observations.*

Perte de puissance :

- Y avait-il plus d'un moteur en cause ?
 - Quelles manœuvres les membres de l'équipage de conduite ont-ils effectuées ?
 - Si les interventions de l'équipage étaient inappropriées, quelle formation ont reçu les membres de l'équipage de conduite ?
- Tous ces points doivent être documentés et être accompagnés d'observations.*

Dommages externes

12.2.17 La première étape de l'inspection des lieux de l'accident, et la plus évidente, consiste à repérer les dommages visibles et à déterminer s'ils ont été causés par l'impact ou s'ils existaient avant de heurter le sol.

12.2.18 En général, les dommages causés par l'impact devraient être évidents pour l'enquêteur. L'impact entraîne l'écrasement des carters des moteurs vers l'intérieur ou le détachement d'accessoires, tandis qu'une défaillance en vol telle qu'une défaillance catastrophique d'un compresseur ou d'une turbine cause l'éjection de pièces du compresseur ou de la turbine, qui pénètrent la nacelle et/ou la partie adjacente de la cellule. Ces observations sont générales et préliminaires et aucune conclusion ne devrait être tirée à cette étape de l'enquête.

12.2.19 Ce qui est important pour l'ensemble de l'enquête sur l'accident c'est de comprendre et de préciser les différences entre les dommages causés aux différents groupes motopropulseurs de l'aéronef. Ces différences peuvent être liées aux causes de l'accident lui-même mais elles sont normalement liées à l'assiette en tangage et en roulis de l'aéronef au moment où il a heurté le sol (Figures III-12-2 et III-12-3).

Puissance développée à l'impact

12.2.20 Il est important de savoir si un moteur fournissait de la puissance au moment de l'impact, ce qui n'est pas toujours facile à déterminer, et il n'existe aucune formule simple ou rapide permettant de le faire sur les lieux de l'accident.

12.2.21 L'enquêteur doit être prêt à faire une première évaluation de la capacité de fonctionnement des moteurs dès le début de l'enquête. Cette évaluation est généralement très utile aux autres membres de l'enquête pour leur permettre d'orienter leurs recherches. Elle consiste à examiner les indices visibles à l'avant et à l'arrière des moteurs. Si les dommages subis par l'étage avant ou l'étage arrière d'un moteur (reliés par le même arbre d'entraînement) ont été causés à grande vitesse, il est très probable que les moteurs fonctionnaient au moment de l'impact. Cependant, la présence de dommages causés à faible vitesse à l'impact n'est pas un indice concluant et il faut procéder à un examen plus approfondi.

12.2.22 Dans certains cas, il est facile de déterminer si les moteurs fournissaient ou non de la puissance au moment de l'impact. La Figure III-12-4 montre un rotor de soufflante qui avait une grande énergie rotationnelle au moment de l'impact, tandis que la Figure III-12-5 montre un rotor de soufflante qui ne fonctionnait pas au moment de l'impact, mais qui tournait peut-être encore en moulinet. La Figure III-12-6 montre un rotor de soufflante qui a d'abord été endommagé à grande vitesse puis a subi des dommages à faible vitesse au moment de l'impact, mais ces photos montrent des cas évidents. Dans la plupart des cas, surtout si aucun membre d'équipage n'a survécu et si les enregistreurs de bord ne fournissent aucune indication de la puissance développée par les moteurs, il faut tenir compte de plusieurs facteurs et les étudier avant de pouvoir faire une estimation. Ces estimations ne peuvent être qu'approximatives et il n'existe pas de technique sûre permettant d'indiquer la puissance ou le régime exact d'un moteur parce que, s'il n'existe pas d'enregistreur, il faut prendre en considération un très grand nombre de variables inconnues. Il y a évidemment des cas où le carter du moteur n'est pas endommagé et où il n'y a donc ni déformation d'aubes ni trace de frottement du compresseur qui puissent servir d'indices à l'enquêteur. Par conséquent, l'absence de dommages visibles provoqués par la rotation ne constitue pas un indice évident d'une faible puissance. Il faut tenir compte des circonstances de l'impact, des manœuvres du pilote avant l'impact, du réglage des vannes de décharge, des positions des aubes variables, de la vitesse d'impact, de la nature du sol ou du plan d'eau sur lequel s'est produit l'accident, etc.

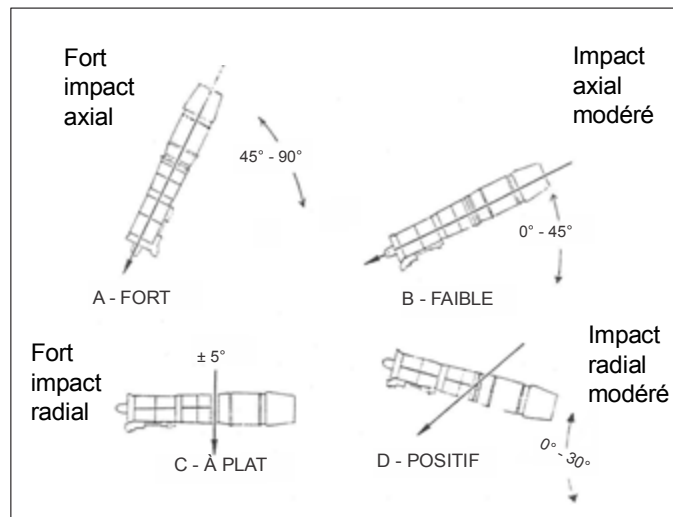


Figure III-12-2. Effets de l'angle d'impact

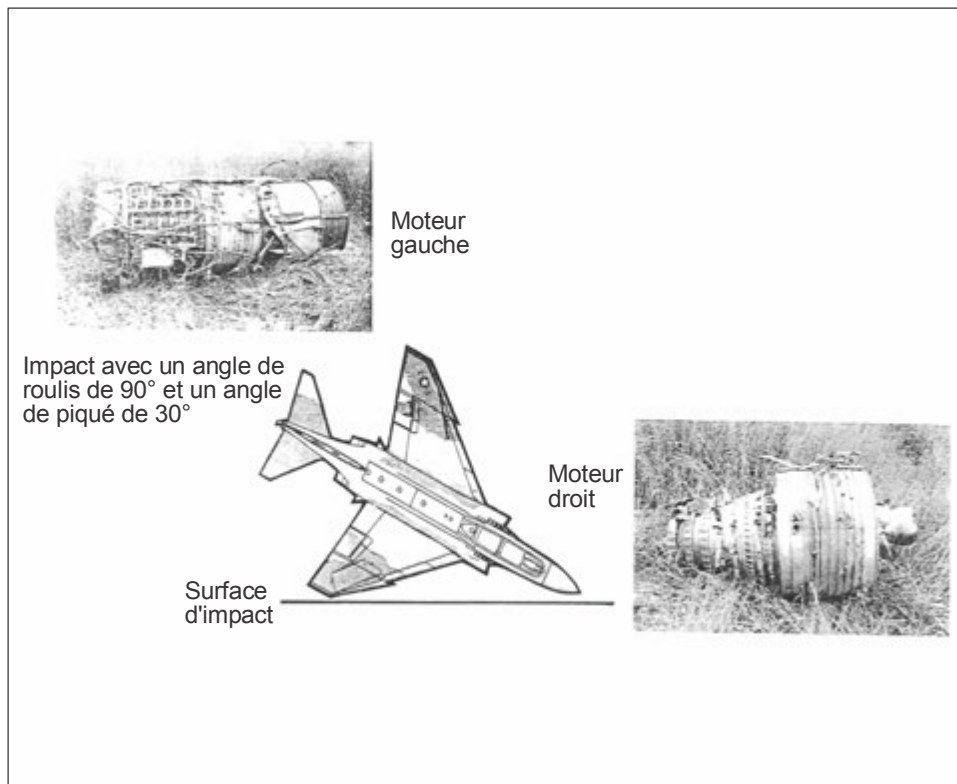


Figure III-12-3. Effets de l'angle de roulis



Figure III-12-4. Dommages causés à haute vitesse

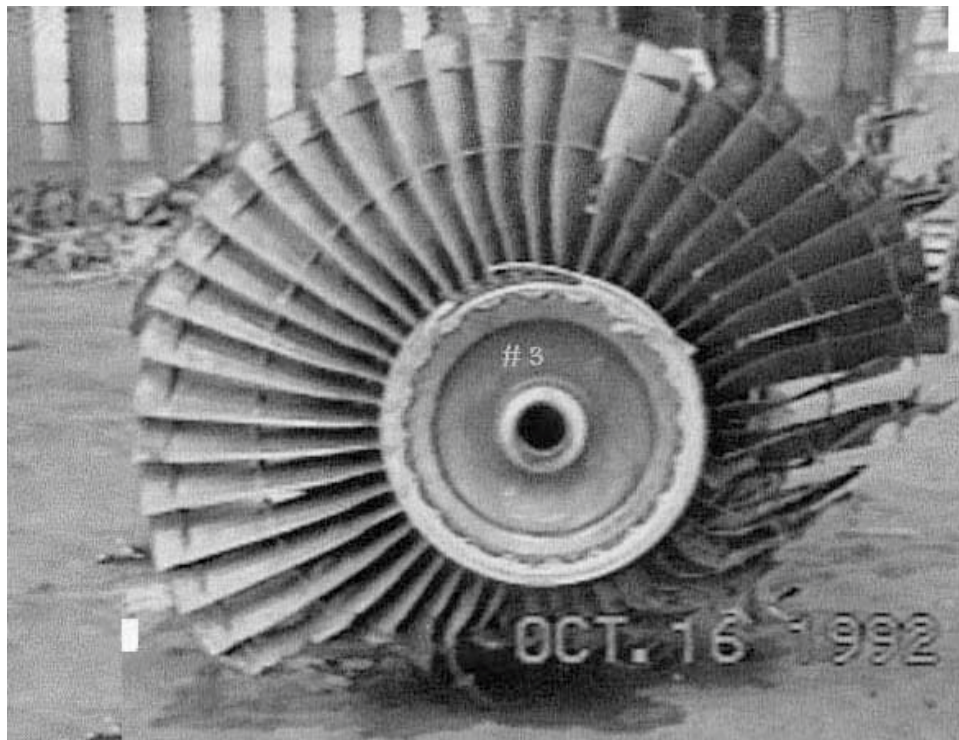


Figure III-12-5. Dommages causés à basse vitesse

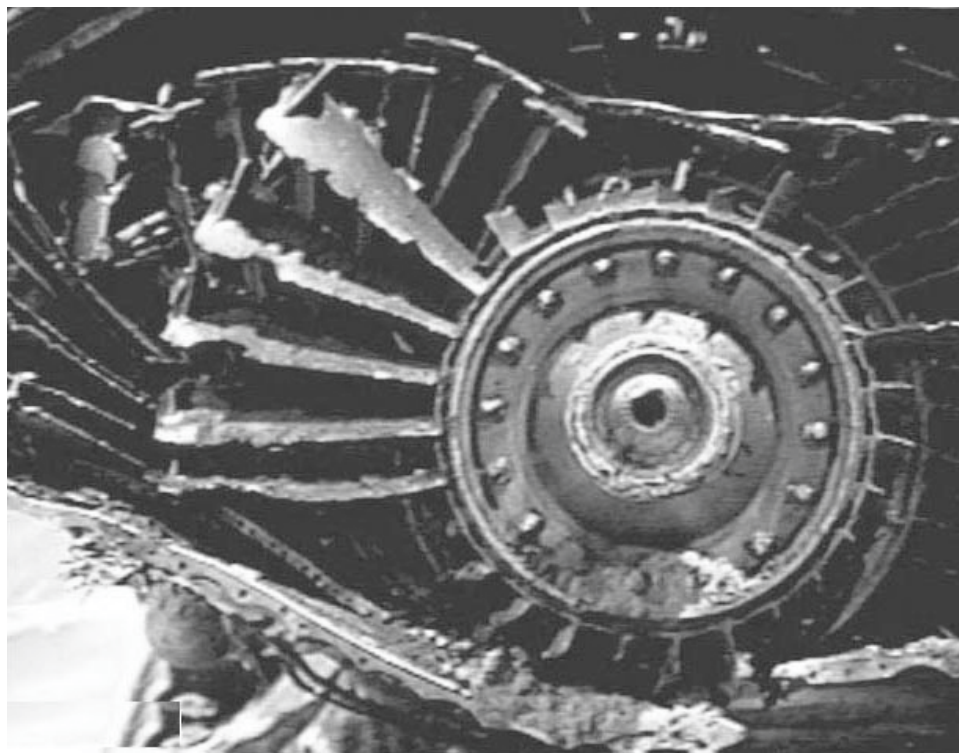


Figure III-12-6. Dommages causés à basse vitesse superposés à des dommages causés à haute vitesse

12.2.23 Comme il est indiqué plus haut, il est important aussi de tenir compte des différences entre les dommages causés à l'avant du moteur et à l'arrière du moteur. Lorsque les moteurs se détachent de l'aéronef avant l'impact au sol, le moteur peut culbuter et la partie turbine du moteur peut heurter le sol plutôt que la partie soufflante. Le premier contact avec le sol a souvent pour effet d'écraser le carter contre les aubes des rotors, grippant de fait les rotors touchés. Lorsque l'autre extrémité du rotor grippé touche le sol, les aubes tournent déjà à une très faible vitesse.

12.2.24 Cet exemple sur la différence des dommages causés à haute et à faible vitesse ne s'applique pas nécessairement aux impacts sur les plans d'eau. Dans ce cas, des forces hydrauliques uniformes considérables peuvent être appliquées sur la partie avant du moteur. L'interprétation des effets de ces forces hydrauliques doit tenir compte de la vitesse de rotation éventuelle des moteurs. Si la vitesse de rotation est élevée, l'aubage essaiera de pomper l'eau ce qui appliquera des efforts de flexion importants contre la rotation ; le résultat sera la rupture complète de presque toutes les aubes à leur point d'attache. L'effet final est semblable à un impact à rotation élevée avec le sol.

12.2.25 Si la vitesse de rotation est faible au moment de l'impact sur l'eau, celle-ci pénètre de force dans l'entrée d'air du moteur et les forces hydrauliques agissent sur la partie frontale de l'aubage, appliquant une force de flexion vers l'arrière. Cette flexion est en fait perpendiculaire à la corde d'une section particulière de l'aube. Puisque les aubes elles-mêmes ont une forme spécifique, qui comprend des changements de torsion et de rigidité en corde, la forme déformée par les forces hydrauliques ressemble souvent à un Z (voir la Figure III-12-7).

12.2.26 Il faut aussi tenir compte des forces hydrauliques appliquées contre les carters des moteurs. Pour la plupart des impacts frontaux, la grande surface du carter absorbe l'impact en se déformant puis en se cassant. La plupart du temps, la forme finale du carter endommagé ressemble à celle d'un bretzel (voir la Figure III-12-8).

12.2.27 Il convient de noter que des différences importantes par rapport aux dommages que présentent les aubes ou le carter/entrée d'air décrits ci-dessus peuvent indiquer que l'impact sur l'eau n'était pas un impact frontal ou que l'avant du moteur était relativement protégé contre la pénétration de l'eau (Figure III-12-9).

12.2.28 Lors de son évaluation des performances du moteur au moment de l'impact, le spécialiste des groupes motopropulseurs a pour objectif d'estimer la poussée disponible. Les indices les plus évidents sont les dommages provoqués par la rotation, qui sont plus ou moins proportionnels à la vitesse de rotation du moteur au moment de l'impact. Les indices des dommages causés par la rotation peuvent parfois être trompeurs en raison de la relation entre vitesse de rotation et poussée. La relation entre ces deux paramètres n'est pas linéaire et la différence en pourcentage de haut régime rotor entre ralenti en vol et poussée maximale est relativement faible. Dans les moteurs modernes, le réglage de ralenti en vol (aucune poussée) est d'environ 60 % du régime ; l'énergie de rotation est donc suffisante pour causer de lourds dommages à l'impact même en l'absence de poussée.

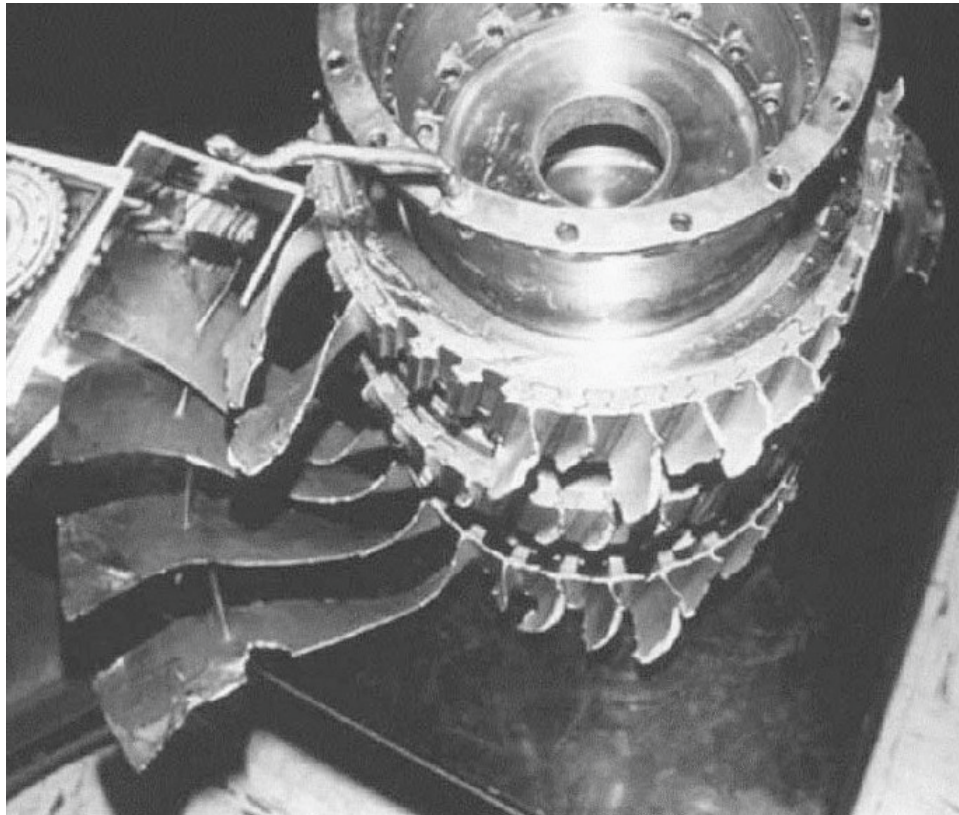


Figure III-12-7. Déformation en Z de l'aubage de l'étage frontal superposée à des dommages importants de rupture en vol à grande vitesse (matage par FOD)



Figure III-12-8. Déformation en forme de bretzel du carter avant d'un moteur après un impact frontal sur l'eau. À noter que le carter a été arraché du moteur par les forces hydrauliques.

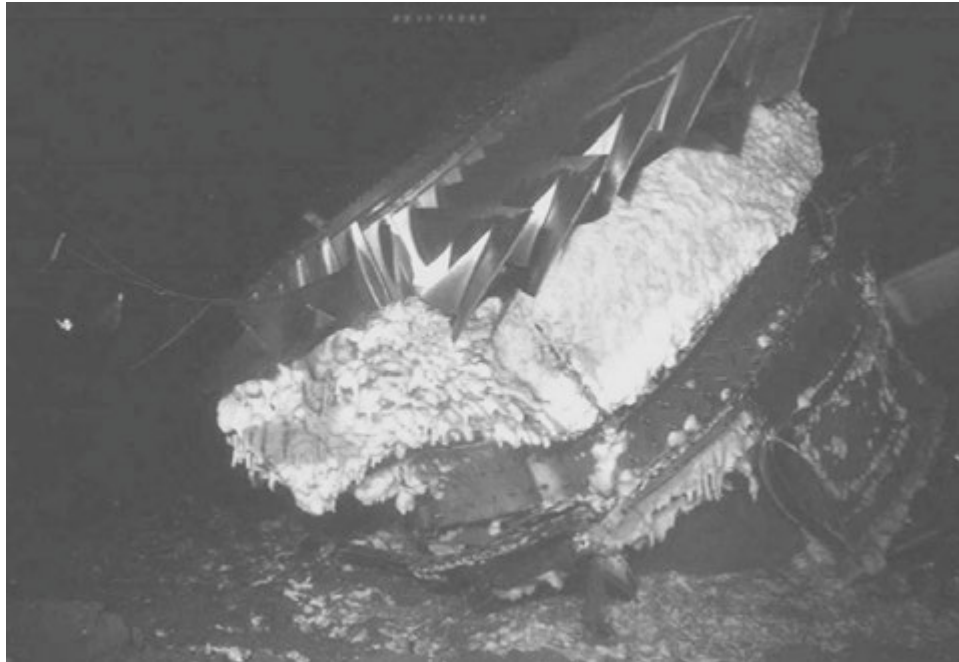


Figure III-12-9. Dommages causés par l'impact sur l'eau. L'eau n'a pas pénétré dans les aubes de la soufflante par l'avant du moteur et la soufflante tournait à très faible vitesse.

12.2.29 D'autres techniques peuvent aider l'enquêteur à évaluer la présence de puissance au moment de l'impact :

- a) Si le moteur fonctionne au moment de l'impact, de la terre ou des morceaux de bois peuvent pénétrer plus profondément dans le moteur ou dans la gaine de prélèvement d'air que si le moteur est arrêté. Si la terre est durcie ou le bois est brûlé, il est raisonnable de penser que le moteur fonctionnait au moment de l'impact. Comme le flux d'air à l'intérieur d'un moteur qui tourne en moulinet refroidit les éléments internes plutôt rapidement, les particules ingérées par un moteur qui ne fonctionne pas au moment de l'impact ne seront pas brûlées.
- b) L'enquêteur doit aussi tirer de l'analyse des commandes moteur, des instruments et des accessoires tous les renseignements qui peuvent donner des indices sur l'état du moteur au moment de l'Impact.
- c) Les manettes des gaz sont souvent déplacées par les forces de l'impact, mais les marques d'impact sur le socle peuvent aider à déterminer leur position originale.
- d) Les instruments moteur électromécaniques du poste de pilotage peuvent donner des indices sur les performances des moteurs au moment de l'impact. Les calculateurs de régulation de moteurs des groupes motopropulseurs modernes à commande électronique de poussée peuvent contenir des mémoires non volatiles, qui conservent les données même en l'absence d'alimentation électrique.
- e) Les aubes directrices d'admission et de stator à calage variable sont contrôlées en fonction du régime moteur et leur position doit être documentée. L'angle des aubes peut être reconstitué directement si des marques témoins sont présentes sur le carter du moteur ou indirectement par l'analyse de l'actionneur. La position des vannes de prélèvement moteur doit être comparée au programme des vannes pour estimer l'état du moteur au moment de l'impact. Les dispositifs de dosage carburant

doivent être examinés, car des marques témoins ou d'autres dommages causés par l'impact peuvent indiquer leur position au moment de l'impact. La rupture d'un arbre de commande des accessoires doit être examinée pour déterminer si elle a été causée par la défaillance d'un accessoire, qui a conduit à une cassure au point de cisaillement théorique, ou si l'arbre s'est cisailé à l'impact. Les pompes carburant et hydrauliques, les entraînements à vitesse constante, les génératrices et tout autre accessoire contenant des parties tournantes présenteront des dommages provoqués par la rotation en fonction de la puissance moteur au moment de l'impact.

- f) Plusieurs systèmes sont étroitement liés au moteur et l'analyse d'un scénario de défaillance doit tenir compte des incidences possibles sur d'autres systèmes. La reconfiguration des systèmes par l'équipage de conduite d'après les listes de vérifications anormales/d'urgence peut indiquer le type de défaillance à laquelle ils réagissaient.

Éléments à vérifier pour haute et basse vitesses

- Profils d'aubes
Haute vitesse si elles sont fragmentées
Basse vitesse si leur longueur est intacte
- Écartement ou flexion des aubes d'un côté ou de l'autre
Basse vitesse
- Déformation en spirale dans une direction
Haute vitesse
- Apparence grenailée des bords des profils
Haute vitesse

Types de défaillances des moteurs

12.2.30 Les paragraphes qui suivent indiquent les éléments essentiels qu'il faut repérer sur les lieux de l'accident pour déterminer s'il y a eu défaillance des moteurs. La plupart des défaillances sont évidentes et c'est le démontage des moteurs qui en détermine l'origine et la cause. Les photos qui suivent montrent quelques exemples de ruptures structurelles possibles. D'autres éléments structurels peuvent être une cause primaire, par exemple la rupture d'un arbre ou une défaillance de palier, ou une cause complètement secondaire comme des charges de grippage des rotors causant une distorsion des structures des carters ou des nacelles.

12.2.31 Dans presque tous les cas de défaillance de moteur non liée à l'épuisement du carburant, il y a des liens de cause à effet entre la cause primaire et les dommages indirects. Le déplacement des débris internes qui forment des particules libres en aval, et dans certains cas en amont, est courant et les effets des dommages sur les températures de fonctionnement des moteurs doivent aussi être pris en compte. Si le système de compression est notablement dégradé, l'efficacité du moteur et la température des gaz d'échappement (EGT) seront aussi affectées. La turbine à plus grande vitesse est cruciale pour la pression du brûleur. Si cette turbine est sensiblement dégradée, il peut se produire un retour de flamme hors du brûleur qui commence à faire fondre les étages de la turbine basse vitesse situés en aval. Par contre, si le compresseur basse vitesse ou la soufflante sont dégradés, le retour de flamme peut ne se produire que dans la turbine haute vitesse et faire fondre les extrémités de ces étages.

12.2.32 Lorsque les étages de la turbine présentent des signes de surchauffe, il faut toujours vérifier les compresseurs et rechercher la cause initiale. Si l'équipage intervient rapidement pour couper le moteur, il peut n'y avoir aucun signe évident de surchauffe.

12.2.33 Dans certains cas, les dommages amorcés dans les sections basse ou haute pression de la turbine réduisent les vitesses d'entraînement de leurs compresseurs respectifs ; le résultat est une asymétrie des vitesses entre les sections du compresseur, causant un calage/pompage du compresseur qui peut être entendu et vu par les témoins (Figure III-12-10). Un calage/pompage peut aussi se produire si les dommages commencent dans le compresseur ou la soufflante vu qu'ils peuvent modifier l'aérodynamique interne. Cependant, il est important de faire la différence, dans les déclarations des témoins, entre les flammes et/ou les détonations d'un moteur qui auraient pu être causées par un calage/pompage dû à une perte de contrôle de l'aéronef et une distorsion de l'air dans les entrées d'air du moteur.

Rupture non confinée d'un disque rotor

12.2.34 Une rupture non confinée d'un disque rotor dans une grande turbine à gaz est une des ruptures les plus énergétiques et les plus potentiellement catastrophiques de toutes les ruptures causées par le système de propulsion. Il est donc important de pouvoir la distinguer des dommages purement attribuables à l'impact. Les figures suivantes montrent les indices classiques d'une rupture de rotor non confinée.

12.2.35 La Figure III-12-11 montre un exemple type de fragments non confinés d'un disque rotor d'un compresseur et la Figure III-12-12, les marques typiques de matage et de la trajectoire de sortie sur les aubes des stators situés de part et d'autre du disque rotor dans le moteur.

12.2.36 La Figure III-12-13 montre un exemple type d'un trou de pénétration d'un fragment non confiné. Comme les fragments qui se détachent se déplacent d'abord tangentiellement aux carters intérieurs du moteur, le trou ressemblera à une rupture tangentielle de pression dont les bords sont rabattus le long de la circonférence.

12.2.37 Comme l'objectif de l'enquête est d'évaluer toutes les conditions dangereuses pour les passagers, il est également important d'inclure une description documentée des trajectoires de tous les éléments non confinés qui peuvent toucher la cabine ou d'autres systèmes de bord. La méthode fréquemment employée consiste à tirer des fils ou des rubans entre les trous des carters du moteur et les trous correspondants dans les autres parties de l'aéronef (voir les Figures III-12-14 et III-12-15).

Éléments à vérifier pour une rupture de rotor non confinée

- Renflement vers l'extérieur des carters adjacents
- Trous ou fentes tangentiels longs
- Fort matage des aubes des stators situés de part et d'autre du rotor
- Étages manquants
- Pièces internes du moteur à l'extérieur du moteur ou le long de la trajectoire de vol

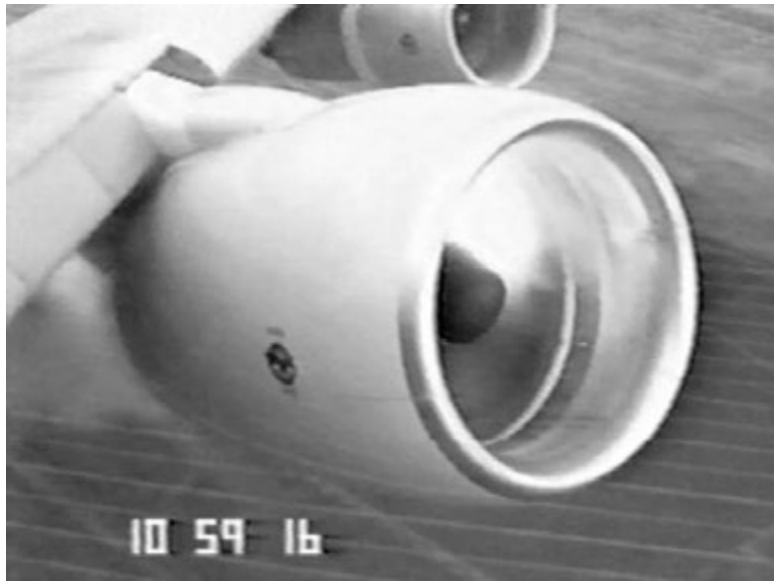


Figure III-12-10. Flammes sortant de l'entrée d'air et de la tuyère par suite d'un calage/pompage moteur

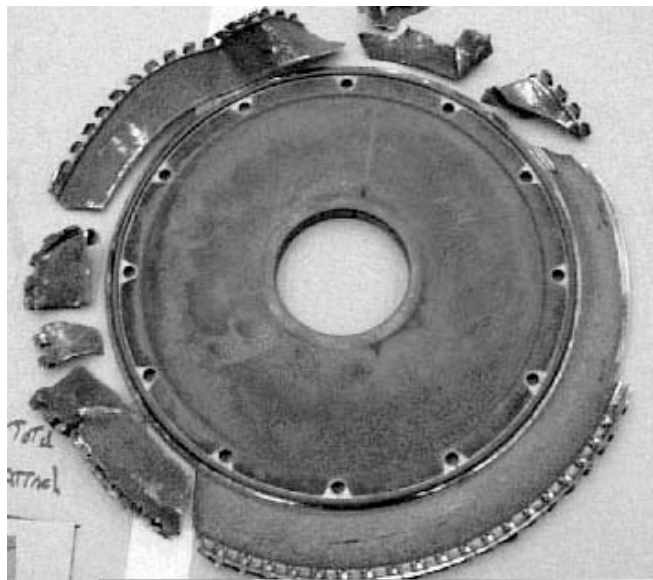
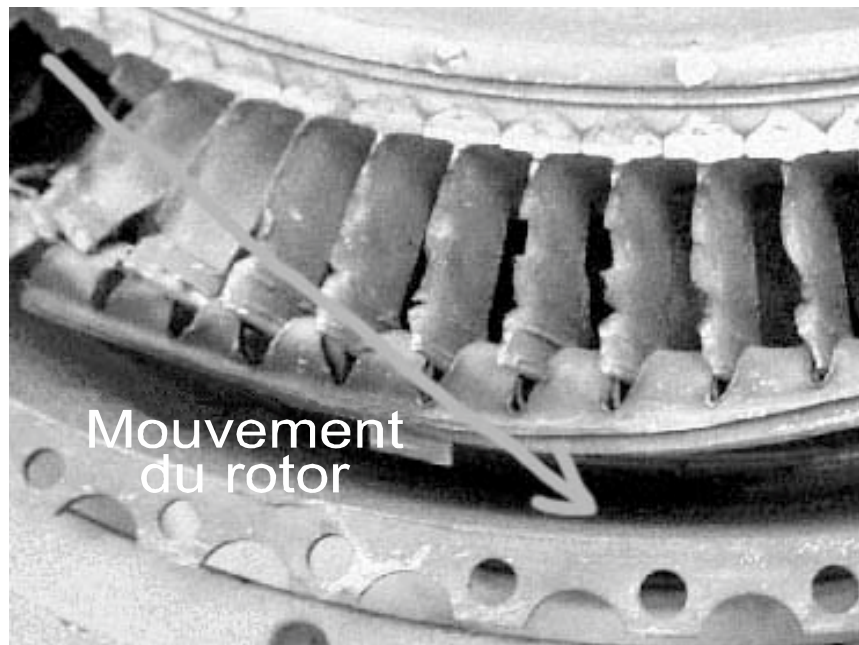
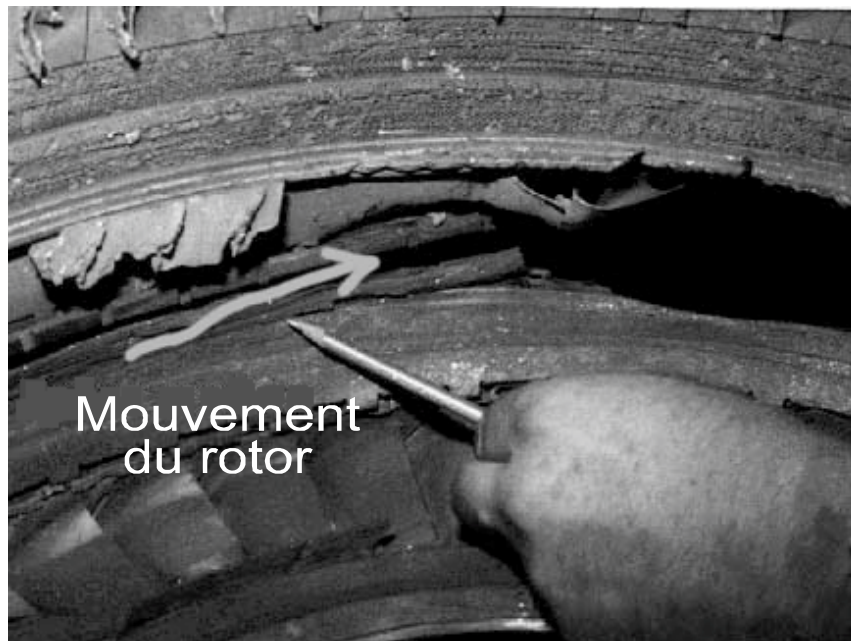


Figure III-12-11. Exemple de rupture d'un disque rotor



Mouvement
du rotor

Figure III-12-12. Trajectoire des fragments non confinés d'un disque rotor



Mouvement
du rotor

Figure III-12-13. Trou de pénétration ressemblant à une rupture de pression

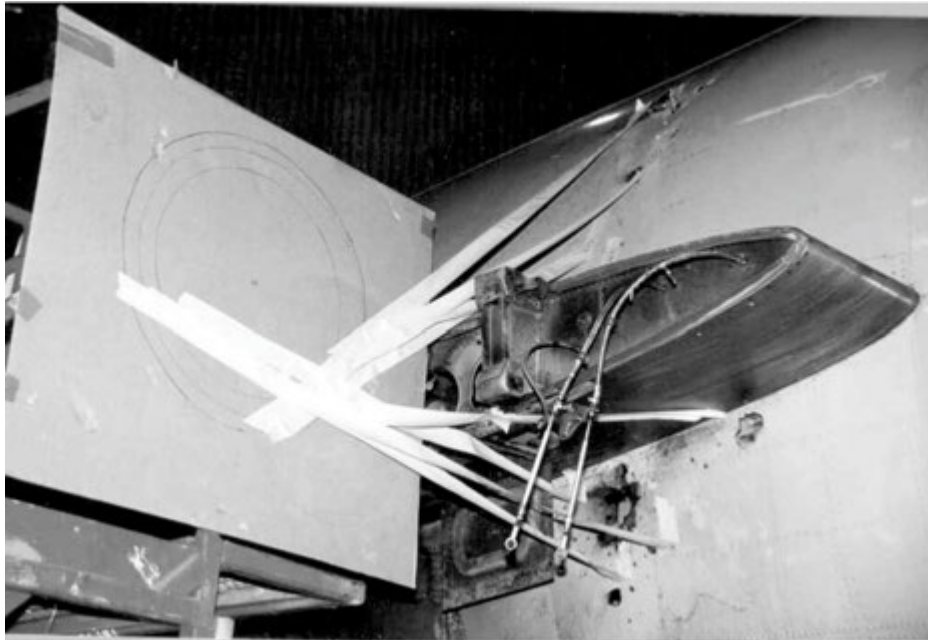


Figure III-12-14. Marquage des trajectoires des fragments non confinés

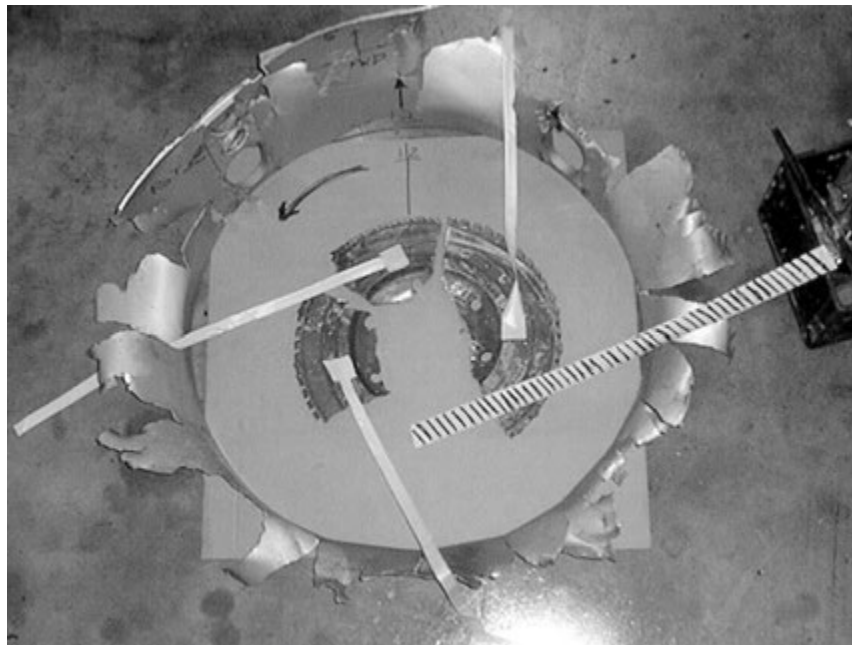


Figure III-12-15. Marquage des trajectoires des fragments non confinés
d'un disque rotor

Ingestion de corps étrangers

12.2.38 Les dommages par corps étrangers (FOD) causés par l'ingestion de petits objets tels du gravier, des rivets ou du fil frein commencent souvent dans la section compresseur.

12.2.39 De petits objets peuvent souvent traverser la soufflante en laissant peu d'indices de dommages. L'objet aspiré peut laisser une empreinte claire sur la soufflante et le premier étage du compresseur, ce qui peut donner des indices sur l'origine des FOD. Il peut aussi laisser des traces microscopiques sur la zone endommagée et une analyse spectrographique des particules peut permettre de déterminer la composition de l'objet.

12.2.40 Si les objets pénètrent dans le générateur de gaz, ils peuvent facilement traverser les étages du compresseur basse pression sans causer trop de dommages. Cependant, lorsque les particules essaient de passer dans la turbine haute pression, elles sont souvent martelées pendant longtemps par l'étage d'admission à ce rotor en raison de sa haute vitesse. Les rainures ou les entailles laissées par le corps étranger devraient avoir peu d'incidences sur le moteur sauf dans les rares cas où les extrémités des petites aubes à l'arrière du compresseur sont gravement endommagées. Comme il est indiqué plus haut, toute perte de flux d'air à l'extrémité des aubes du compresseur sur une grande circonférence se traduira par une grave surchauffe de la turbine si le moteur continue à tourner. Si les petites rainures sur les aubes ne sont pas détectées et réparées au cours de plusieurs cycles de fonctionnement des moteurs, elles risquent de se développer et de former des fissures de fatigue, produisant des débris plus gros qui causeront la défaillance du moteur.

12.2.41 Parmi les objets qui peuvent être aspirés dans une grande soufflante et qui sont capables de causer des FOD, les plus notables sont ceux qui risquent d'endommager plusieurs moteurs d'un aéronef, soit les oiseaux, le givre et les cendres volcaniques. Les deux premiers causeront probablement des dommages caractéristiques des objets mous, c'est-à-dire des dommages en cascade sur plusieurs aubes consécutives du rotor de la soufflante. Ces dommages se produisent lorsque des objets relativement mous (y compris le givre) sont coupés en segments par le mouvement de rotation des aubes causant des dommages semblables (plis, cuspidés et torsions) à une ou plusieurs aubes consécutives d'un rotor. Il est important de distinguer ces dommages d'autres matages ou entailles aléatoires causés par des pièces métalliques qui se détachent d'une seule aube endommagée.

Ingestion d'oiseaux

12.2.42 Lorsque des objets sont aspirés dans plusieurs moteurs, il est important d'examiner les sources environnementales de ces objets et noter leurs effets sur le moteur. Par exemple, dans le cas d'ingestion d'oiseaux, l'enquêteur doit rendre compte de tous les impacts d'oiseaux sur l'aéronef (Figures III-12-16 et III-12-17) et indiquer l'espèce, le nombre d'oiseaux dans la volée et, s'il y a lieu, les attractifs environnementaux présents à l'aéroport.

Par exemple :

- a) espèce (poids et âge) ;
- b) heure ;
- c) activité des oiseaux (se nourrissaient, se reposaient, passaient) ;
- d) événements récents à l'aéroport, s'il y a lieu ;
- e) répartition des oiseaux sur le devant de l'aéronef ;
- f) répartition des oiseaux sur le devant des moteurs.

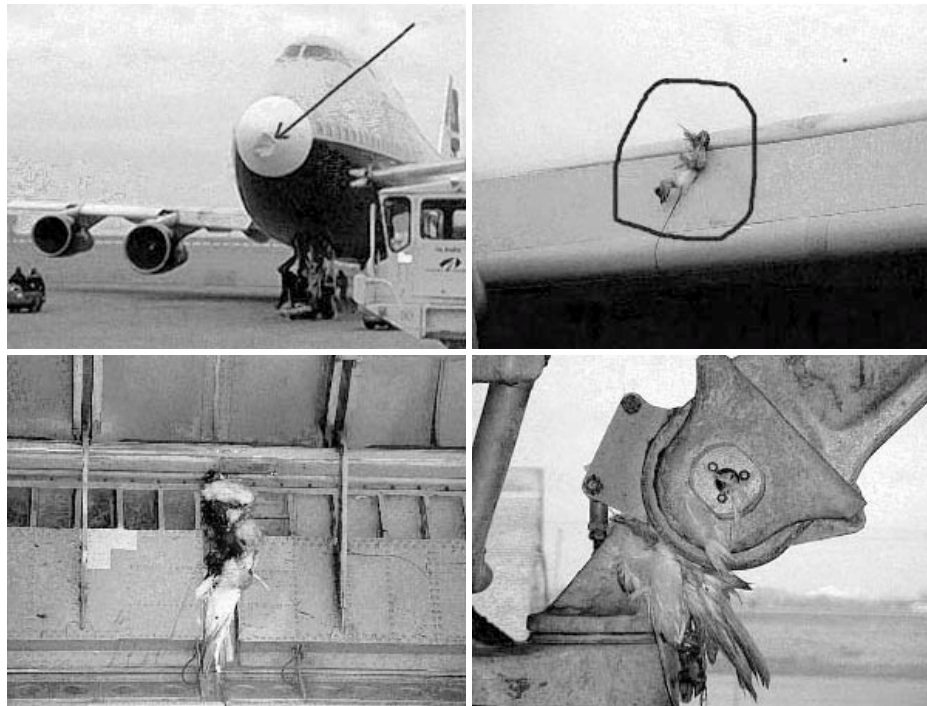


Figure III-12-16. Exemples d'impacts d'oiseaux sur différentes parties de l'aéronef

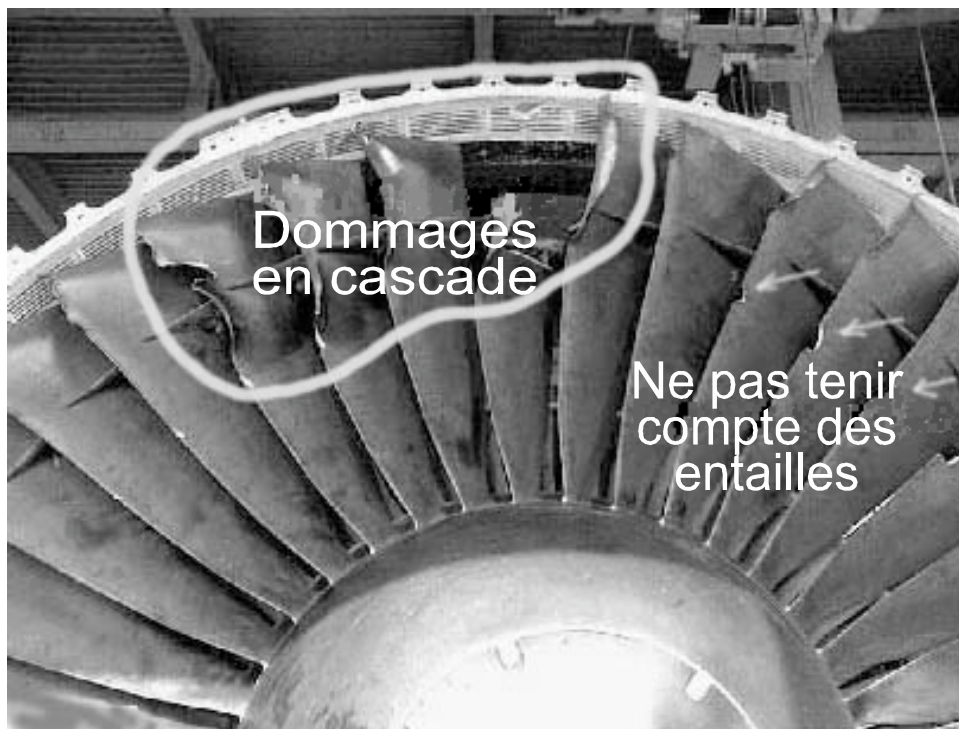


Figure III-12-17. Dommages causés par l'ingestion d'oiseaux

12.2.43 Un moyen utile de confirmer les endroits touchés par les impacts d'oiseaux sur un aéronef et sur le devant des moteurs est d'utiliser une lumière ultraviolette. Ce processus peut aussi être employé pour d'autres animaux, comme les cerfs.

Éléments à vérifier en cas d'ingestion d'oiseaux

- Dommages en cascade sur des aubes consécutives
- Cuspides/plis/déformations/torsions causés par des objets mous
- Duvet/touffes de plumes de la poitrine dans les cavités derrière la soufflante
- Plumes ou taches dans les conduits du moteur, y compris les dispositifs de prélèvement d'air
- Odeur inhabituelle de l'air refoulé par la soufflante
- Impact sur les bords d'attaque de l'aéronef et sur le train d'atterrissage
- Ne pas tenir compte des déchirures ni des entailles dans les aubes

Ingestion de givre/glace (Figures III-12-18 et III-12-19)

12.2.44 Dans les cas d'ingestion de givre ou de glace, l'enquêteur doit tenir compte de toutes les sources potentielles, notamment :

- a) givre du radome ;
- b) givre des ailes ;
- c) givre du fuselage ;
- d) givre dans l'entrée d'air ;
- e) givre de la casserole de la soufflante ;
- f) givrage des aubes de la soufflante ;
- g) givrage interne ;
- h) glace sur la voie de circulation ou la piste (y compris les zones déblayées adjacentes) ;
- i) neige fondante collée aux trains d'atterrissage.

Éléments à vérifier en cas d'ingestion de givre/glace

- Dommages en cascade ou dommages aléatoires sur des aubes consécutives
- Cuspides/plis/déformations/torsions causés par des objets mous
- Ondulations des bords d'attaque des aubes
- Aucun signe de plumes d'oiseaux
- Aucune odeur dans l'air refoulé par la soufflante
- Bosses sur les bords d'attaque
- Ne pas tenir compte des déchirures ni des entailles dans les aubes

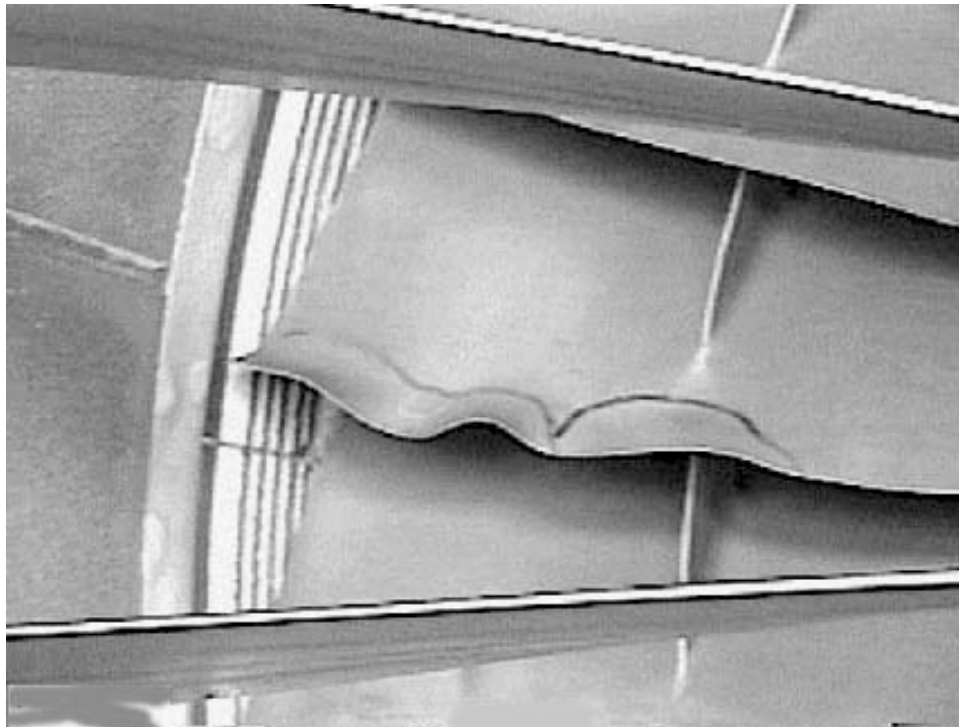


Figure III-12-18. Ondulations causées par l'ingestion de givre/glace

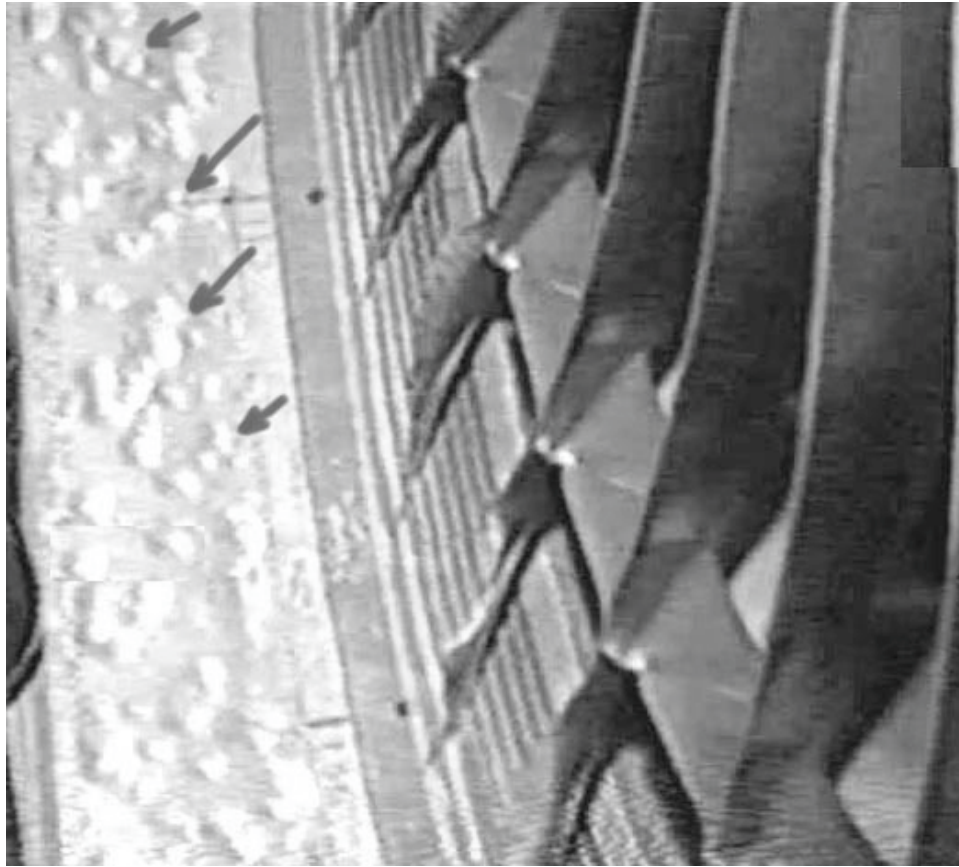


Figure III-12-19. Bosselage du revêtement acoustique causé par le givre qui s'est détaché du rotor de la soufflante.

Ingestion de cendres/poussière volcaniques

12.2.45 L'ingestion de fines particules de cendre ou de poussière volcanique cause des dommages très particuliers dans les turbines à gaz modernes à haute performance. Les effets évidents de l'érosion des aubes tournantes ne menacent pas généralement la sécurité des vols, mais des effets plus graves peuvent se produire dans la section très chaude du moteur, sur les aubes du distributeur de turbine ; il est en effet très probable que, dans les moteurs modernes en régime de croisière, les températures à l'entrée de la turbine fondent les concentrations de poussière qui se collent ensuite dans les étroits passages des aubes du distributeur. Toute modification du flux d'air à ce point critique du moteur risque de nuire à la stabilité du groupe motopropulseur et à sa capacité de fonctionner sans dépasser les limites de température ni décélérer (Figure III-12-20).

Défaillances de la nacelle et du système d'inversion de poussée

12.2.46 Les défaillances de la nacelle et du système d'inversion de poussée font aussi partie des défaillances du groupe motopropulseur. Les défaillances de la nacelle sont causées la plupart du temps par des panneaux de capot qui se détachent de leurs fixations, soit par suite de défaillances moteur non confinées, soit parce qu'ils n'ont pas été verrouillés après la maintenance. Dans les nouveaux modèles d'avions de transport, l'interaction entre la nacelle et le moteur est complexe et il est nécessaire de faire appel aux compétences du concepteur ou de l'installateur pour établir les liens de cause à effet dans cette interaction. Par exemple, un grand nombre des gros moteurs actuels à taux de

dilution élevé dépendent d'un certain degré de répartition des charges par la nacelle pour réagir aux charges de flexion et/ou de grippage du moteur. En cas de défaillance catastrophique du moteur, la nacelle subira des dommages plus graves que juste les trous percés par des particules non confinées.

12.2.47 Les défaillances du système d'inversion de poussée comptent parmi d'autres défaillances primaires des nacelles. L'enquêteur doit reconstituer la position des dispositifs d'inversion au moment de l'impact en analysant le système d'actionnement et les dommages causés par l'impact près de l'inverseur. Si une pièce normalement protégée par les panneaux de l'inverseur est endommagée et le panneau correspondant ne l'est pas, il est probable que l'inverseur a été activé au moment de l'impact.

12.2.48 La complexité du système d'inversion de poussée est comparable à celle des systèmes numériques de régulation du carburant des moteurs. Il faut notamment tenir compte des points suivants :

Interaction des systèmes du groupe motopropulseur

Pour toutes les lignes de défense qui comprennent des redondances ou des barrières, déterminer :

- si des défaillances latentes étaient présentes ;
- si la défaillance d'une défense a causé la défaillance d'une autre défense (dépendance).

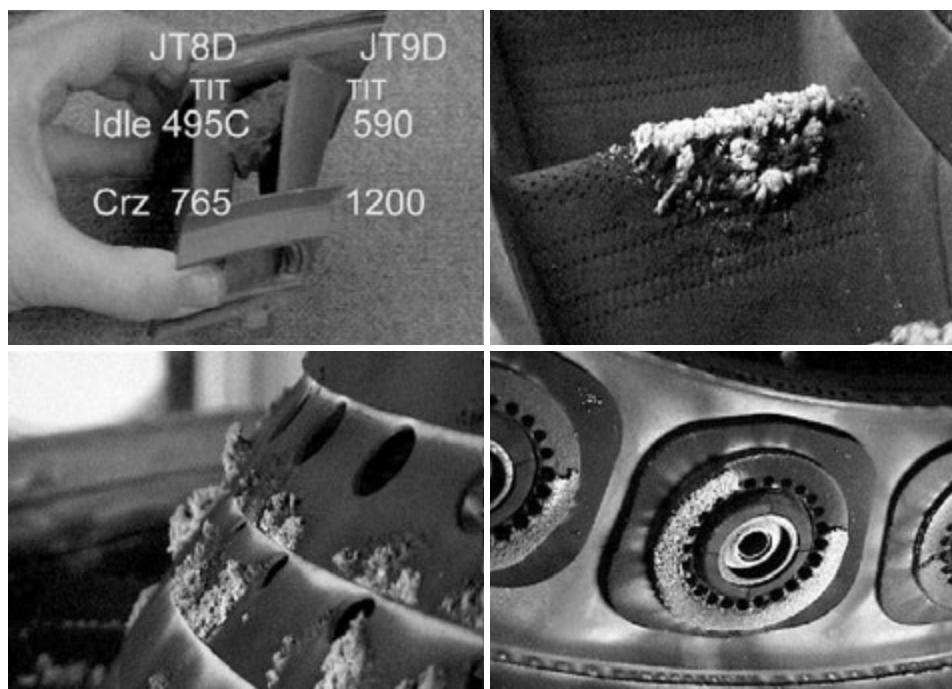


Figure III-12-20. Cendres volcaniques fondues collées à des parties de la section chaude

Autres défaillances de moteur

12.2.49 On compte parmi les autres causes de défaillances des moteurs les ruptures des aubes de turbine dues à l'usure causée par le fonctionnement à de très hautes températures. Il peut aussi se produire des défaillances plus graves dues aux ruptures des arbres causées par des feux internes d'hydrocarbures ou des défauts d'assemblage (Figure III-12-21).

Ruptures d'arbres primaires

- Confirmer la rupture en mesurant la dilatation du disque
- Ruptures d'aubes avec des longueurs circonférentielles uniformes
- Ruptures possibles de disques rotor ou des joints d'étanchéité causées par la survitesse

Ruptures d'arbres secondaires

- Aucune dilatation appréciable des disques
- Ruptures non uniformes des aubes
- Indice de frottement interarbre important
- Fatigue possible des paliers
- Vibrations constantes signalées

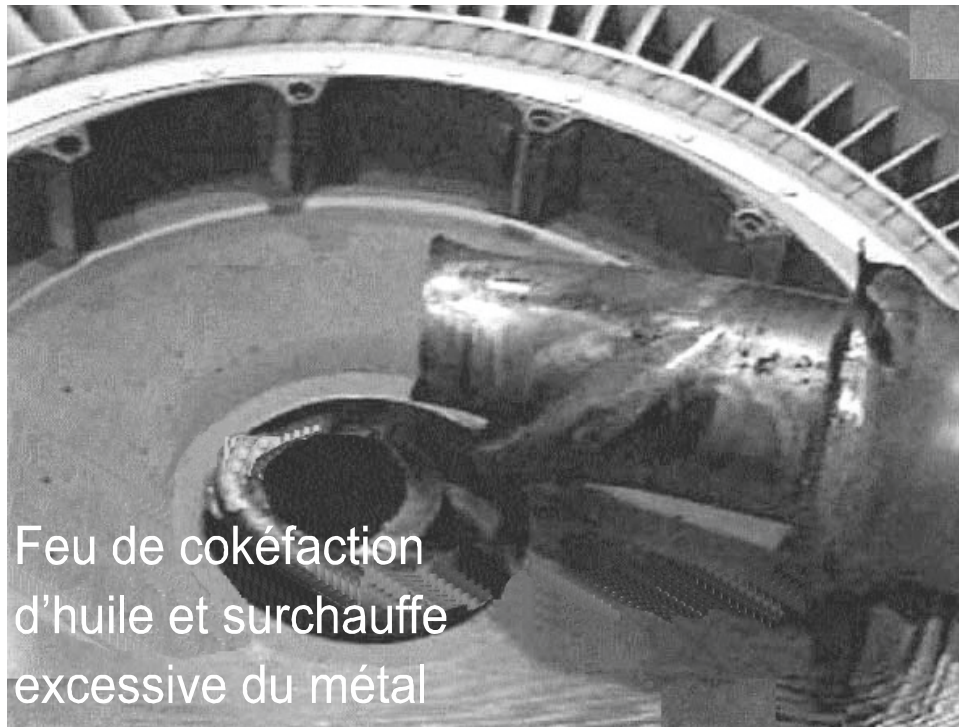


Figure III-12-21. Rupture d'arbre

12.2.50 Les ruptures des disques rotors ou des carters haute pression entre le compresseur et la turbine sont moins fréquentes mais beaucoup plus catastrophiques (Figure III-12-22). Les problèmes d'huile ou de paliers sont encore moins fréquents dans les accidents puisqu'il ne s'agit souvent que d'éléments isolés qui n'exigent de couper qu'un seul moteur sans qu'il y ait d'incidences sur la sécurité du vol.

12.2.51 Les défaillances des accessoires moteur sont de moins en moins fréquentes dans les chaînes causales des accidents. Des exemples de défaillances graves sont les ruptures des trains d'atterrissage, la désactivation des fonctions de commande du moteur, l'approvisionnement en carburant ou en lubrifiant et, dans des cas encore plus rares, du système de régulation du carburant. Si l'un quelconque de ces systèmes est soupçonné durant l'enquête, il convient de consulter le constructeur.

Dysfonctionnements des turbines à gaz

12.2.52 La rupture catastrophique d'un moteur est l'indice visuel le plus évident d'une défaillance avant impact, mais plusieurs autres dysfonctionnements peuvent entraîner une perte de puissance ou causer des symptômes qui obligent le pilote à couper un moteur. L'objectif du présent document n'est pas d'indiquer toutes les causes possibles de dysfonctionnement, mais de fournir quelques exemples d'indices de dysfonctionnement qui peuvent être repérés sur les lieux de l'accident. Il est fortement recommandé de confirmer les causes sous-jacentes de tout signe de dysfonctionnement d'un moteur observé sur les lieux de l'accident en transportant le moteur à un endroit équipé des outils appropriés pour le démonter. En général, cependant, il n'est pas nécessaire d'effectuer un démontage hors des lieux de l'accident à moins que l'examen sur les lieux ne révèle des signes indubitables de dysfonctionnement des moteurs.



Figure III-12-22. Rupture du carter haute pression

12.2.53 Le terme *dysfonctionnement* désigne tout symptôme ou combinaison de symptômes présentés par le moteur qui se traduit par une perte de puissance ou qui oblige l'équipage de conduite à couper le moteur (voir le Tableau III-12-1). Certains symptômes, comme le pompage/calage moteur, peuvent n'être que temporaires et ne sont pas traités en tant que dysfonctionnements dans le présent chapitre. En général, les symptômes qui doivent le plus retenir l'attention, et les causes de ces symptômes, sont les avertissements d'incendie, les pertes de puissance, les vibrations/bruits et les indications anormales de la température des gaz d'échappement, de la température de l'huile ou de la pression d'huile. La cause la plus courante de ces symptômes est une dégradation quelconque de la veine gazeuse, généralement associée aux composants tournants.

Tableau III-12-1. Symptômes de dysfonctionnements des moteurs¹

	Détachement du moteur	Dommmages graves	Pompage	Ingestion d'oiseaux/FOD	Grippage	Extinction	Problèmes de régulation du carburant	Incendie	Incendies de tuyère	Démarrage à chaud	Givrage	Déploiement accidentel de l'inverseur de poussée	Fuite de carburant
Détonation	O	X	X	O	O						O		
Avertissement d'incendie	O	O		O				X					
Flamme visible	O	O	O	O				O	X	O			
Vibration		X	O	X	O						X	X	
Lacet	O	O	O	O	O	O	O					X	
EGT élevée		X	X	O	O		X		O	X	O		
Changement N1	X	X	O	O	X	X	X						X
Changement N2	X	X	O	O	X	X	X						X
Changement de débit carburant	X	O	O		O	X	O	O					X
Changement d'indication d'huile	X	O	O		O	X		O					
Dommmages visibles sur le capot	X	X						O				X	
Fumée /odeur dans l'air de prélèvement pour la cabine		O		O	O								
Changement d'EPR	X	X	X	O	X	X	X						X

X = Symptôme très probable O = Symptôme possible

Note.— Les cases en blanc signifient que le symptôme est improbable.

1. Tiré du document *Airplane Turbofan Engine Operation and Malfunctions – Basic Familiarization for Flight Crews*, Engine & Propeller Directorate, Federal Aviation Administration, 2000.

12.2.54 Les dommages préexistants peuvent ne pas présenter de symptômes à l'équipage de conduite, par exemple, des entailles ou des déchirures dans les aubes causées par l'ingestion de petites pierres ou de gravier. Cependant, tout indice d'une augmentation du jeu à l'extrémité des aubes des étages du compresseur ou de la turbine doit être interprété comme des dommages importants qui ont probablement présenté une combinaison de symptômes exigeant l'intervention de l'équipage de conduite. Les Figures III-12-23 et III-12-24 donnent des exemples de ces dommages.

12.2.55 Il est également important de se rendre compte que les indices de dommages internes importants ne sont pas toujours visibles lors d'un examen général de l'extérieur du moteur sur les lieux de l'accident. Les indices suivants, qui peuvent être repérés par une inspection de l'intérieur du moteur, peuvent indiquer la présence de dommages internes graves :

- a) métal dans la tuyère ;
- b) métallisation dans la section chaude ;
- c) feu de titane dans le compresseur.

Métal dans la tuyère

12.2.56 La présence de métal dans la tuyère est causée par des particules de gouttelettes de métal pulvérisées provenant de fragments qui se sont détachées d'aubes situées en amont et qui ont traversé les étages successifs de rotors. Ces gouttelettes de métal peuvent souvent être détectées au toucher en passant la main sur les surfaces intérieures derrière le dernier étage de la turbine. Il ne faut pas confondre la présence de métal dans la tuyère avec la présence de morceaux d'aubes qui se sont cassées au moment de l'impact avec le sol.

Métallisation

12.2.57 La métallisation est la fusion des extrémités des aubes causée par la friction avec les surfaces adjacentes et le dépôt de ce matériau sur des surfaces arrondies situées en aval, dans la section chaude (Figure III-12-25). Ce dépôt est un indice utile pour valider ou invalider une défaillance interne du moteur pendant son fonctionnement. La présence de ces dépôts peut être confirmée par un examen endoscopique du dôme du brûleur ou des bords d'attaque des aubes fixes et mobiles à l'entrée de la turbine. La métallisation a un aspect cristallin poivre et sel.

Feu de titane

12.2.58 Les feux de titane sont des feux de métaux qui dépendent d'environnements riches en oxygène et d'une augmentation importante de la température de la masse du métal. Les deux conditions sont généralement présentes dans la section arrière du compresseur des turbines à gaz modernes. Le métal a quand même besoin d'une source d'inflammation pour amorcer le processus et cette source est généralement présente lorsque des pièces métalliques se détachent et qu'il y a une forte production d'étincelles. Même si la plupart des métaux sont insensibles à cette source d'inflammation, le titane ne l'est pas. Ces conditions se produisent généralement si des quantités importantes de métal se détachent à grande puissance dans la partie arrière de la section compresseur. Un feu de titane n'est donc pas une cause mais plutôt la conséquence d'une défaillance qui l'a précédé.

12.2.59 Les feux de titane dans le compresseur sont facilement décelables par la présence d'oxydation, avec de forts changements de couleur et le bleuissage du carter métallique qui entoure les premiers étages du compresseur ainsi que le perçage local par brûlure (Figures III-12-26 et III-12-27).

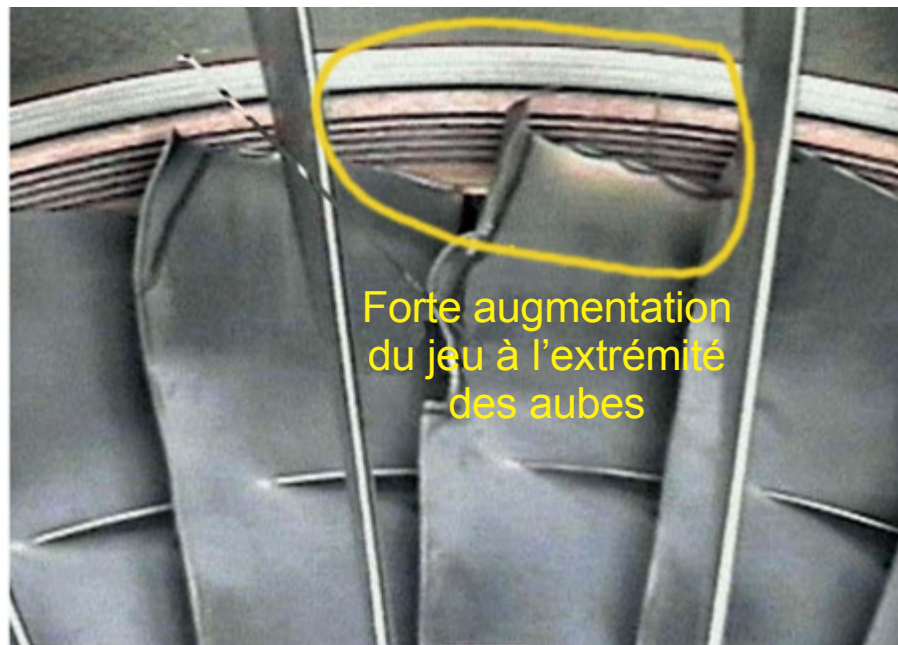


Figure III-12-23. Augmentation du jeu à l'extrémité des aubes de la soufflante causée par le frottement



Figure III-12-24. Augmentation du jeu à l'extrémité des aubes causée par une surchauffe

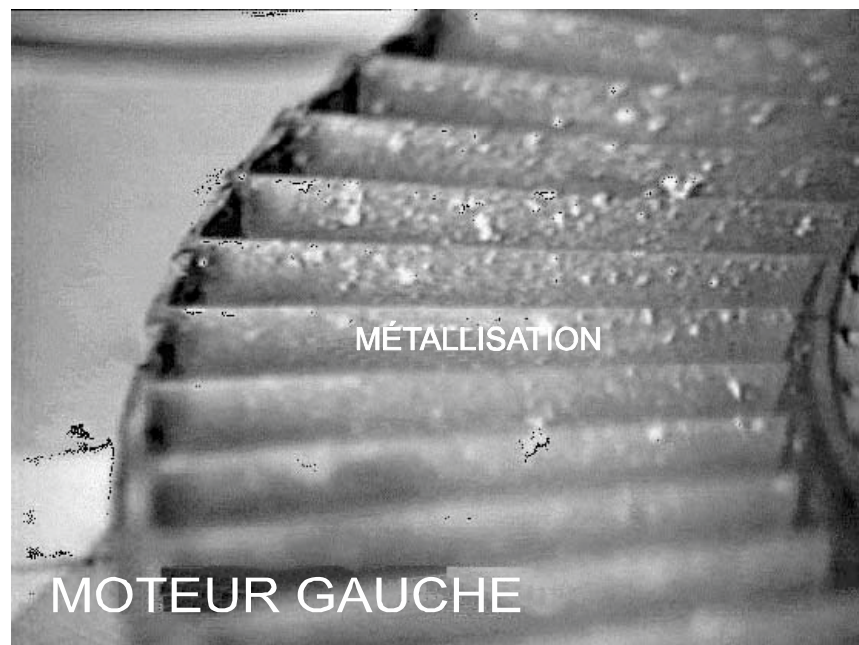


Figure III-12-25. Présence de métaallisation dans la section turbine



Figure III-12-26. Dommages causés par un feu de titane (noter la forme en pointe de flèche)



Figure III-12-27. Perçage par feu de titane

Incendies

12.2.60 Les incendies des groupes motopropulseurs, autres que les feux de titane, se produisent généralement dans l'espace entre le moteur et la nacelle, qui contient plusieurs sources de carburant et d'inflammation (voir la Figure III-12-28). Certaines servitudes des moteurs sont actionnées en utilisant le carburant comme un fluide hydraulique. Si l'enquête porte sur un incendie de moteur, toutes les conduites de carburant autour du moteur doivent être vérifiées pour déterminer s'il y a des fuites qui ont contribué à l'incendie. Les fuites d'air de prélèvement peuvent surchauffer la nacelle ou même déclencher un avertissement d'incendie. L'enquêteur doit vérifier si l'équipage a correctement identifié la cause de l'avertissement et a pris les bonnes mesures.

Incendie de tuyère²

12.2.61 Les incendies de tuyère se produisent lorsque le carburant s'accumule dans le carter de la turbine et s'échappe durant le démarrage ou l'arrêt du moteur puis s'enflamme. Le résultat peut être un jet de flammes qui sort de l'arrière du moteur et qui peut s'étendre sur quelques mètres. Cet événement a conduit des passagers à déclencher des évacuations d'urgence, causant des lésions graves. Il est possible que l'équipage de conduite ne s'aperçoive pas de l'anomalie jusqu'à ce que l'équipage de cabine ou la tour de contrôleur leur signale le problème. Ils peuvent le décrire comme un incendie de moteur mais un feu de tuyère ne déclenche pas d'avertissement d'incendie dans le poste de pilotage. Si on lui signale un incendie de moteur sans qu'il y ait d'indications d'incendie dans le poste de pilotage, l'équipage de conduite doit appliquer la procédure à suivre en cas d'incendie de tuyère. Il faut notamment ventiler le réacteur pour aider à éteindre les flammes, mais cette procédure ne s'applique pas dans la plupart des situations d'anomalies des moteurs. Comme le feu brûle dans le carter de la turbine et la tuyère d'échappement, tirer sur la commande d'extinction pour libérer les agents extincteurs dans l'espace entre les carters et les capots sera inefficace. Tirer sur la commande peut aussi empêcher une ventilation sèche du moteur, qui est la méthode la plus rapide d'éteindre les feux de tuyère.

2. Tiré de *Airplane Turbofan Engine Operation and Malfunctions – Basic Familiarization for Flight Crews*, Engine & Propeller Directorate, Federal Aviation Administration, 2000.

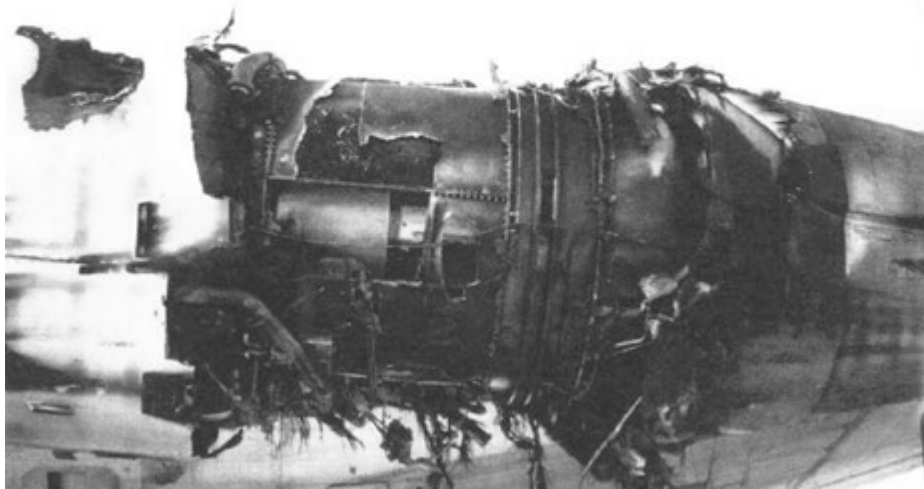


Figure III-12-28. Incendie de nacelle

Efficacité des systèmes d'extinction

12.2.62 Souvent les témoins déclarent qu'ils ont vu l'aéronef en feu avant l'impact. Il est relativement rare qu'un incendie se déclare en vol. La plupart des incendies signalés par les témoins sont de brèves flambées sortant des moteurs dues à un calage/pompage du compresseur. La plupart des incendies en vol détectés par l'équipage de conduite sont causés par des défaillances mécaniques graves ou des ruptures dans le groupe motopropulseur, et par l'inflammation du carburant répandu dans le fuseau moteur. Si les consignes d'incendie sont appliquées rapidement, la plupart des incendies peuvent être maîtrisés et éteints en vol. Le point le plus important de la procédure d'incendie consiste à arrêter l'arrivée de carburant et d'huile au moteur, normalement en coupant l'alimentation en carburant basse pression provenant des réservoirs. Si cette partie de la procédure est exécutée sans retard et correctement, le feu s'éteint généralement de lui-même. Le fonctionnement des extincteurs d'incendie dépend en grande partie de l'exécution des manœuvres appropriées dans l'ordre voulu. Dans le cas des turbomachines, l'alimentation en carburant basse pression doit être coupée pour que l'extincteur d'incendie puisse agir.

12.2.63 Après un accident avec incendie grave, des techniques spéciales peuvent être nécessaires pour déterminer si l'extincteur d'incendie a été déclenché électriquement par l'équipage. Les extincteurs secondaires comportent également deux types d'extincteurs et il est indispensable de vérifier les deux systèmes pour déterminer si, dans les deux systèmes, les extincteurs appropriés ont été utilisés.

12.2.64 Si les circonstances le permettent, on peut employer une autre méthode qui consiste à faire une analyse électrochimique de l'intérieur des buses et des tuyauteries de décharge ou de pulvérisation pour déterminer si l'agent extincteur a circulé dans ces tuyauteries et ces buses. Les circuits des extincteurs d'incendie et des avertisseurs d'incendie deviennent de plus en plus complexes et spécialisés et il est indispensable de s'assurer promptement la collaboration du constructeur pour mener à bien une enquête sur un circuit extincteur d'incendie.

Extinction

12.2.65 La cause prédominante de l'extinction en vol d'une turbomachine moderne est le mauvais fonctionnement ou la rupture de l'alimentation en carburant ou du régulateur. Si l'on soupçonne les commandes de carburant ou les pompes, et si les conditions le permettent, la meilleure méthode pour déterminer la cause du mauvais fonctionnement consiste à effectuer un essai au banc avec tous les appareils de contrôle nécessaires. Le dispositif de rallumage doit également être examiné. L'enquêteur doit toujours avoir présent à l'esprit que l'extinction des turbomachines peut être provoquée par une fausse manœuvre des commandes de carburant, par la fermeture du mauvais robinet de carburant, par un robinet de carburant laissé ouvert sur un réservoir vide ou, tout simplement, par une panne sèche. Toutes ces causes possibles doivent être envisagées et éliminées avant de conclure à une défectuosité de l'équipement moteur.

12.2.66 Il semble encore y avoir une certaine confusion dans l'utilisation du terme *extinction (flameout)*. La confusion vient de la différence de terminologie utilisée par les pilotes et par les concepteurs de moteurs. Les différences sont notamment les suivantes :

- a) Pour l'équipage de conduite, une extinction signifie (compte rendu commun) :
 - Perte de réponse à la sollicitation de la manette des gaz
 - Décélération des rotors
 - Augmentation de l'EGT jusqu'à une température excessive
 - Généralement associée à un calage/pompage

- b) Pour le concepteur, une extinction signifie (rare) :
 - Perte de réponse à la sollicitation de la manette des gaz
 - Décélération des rotors
 - Extinction du brûleur (la flamme s'éteint)
 - Diminution de l'EGT

12.3 MOTEURS ALTERNATIFS ET TURBOPROPULSEURS

12.3.1 Dans le cas de moteurs alternatifs ou des turbopropulseurs, il faut utiliser une technique différente pour déterminer si le moteur fournissait de la puissance au moment de l'impact. Là encore la perte de puissance peut sembler évidente lors d'une première inspection (Figures III-12-29 à III-12-33) ; l'hélice peut même avoir été mise en drapeau, ce qui ne constitue pas une preuve absolue que le moteur ne fournissait pas de puissance. Des accidents ont été causés par des équipages ayant mis par erreur en drapeau l'hélice du « bon » moteur au lieu de celle du moteur défectueux et, par conséquent, l'examen de l'hélice doit s'accompagner d'un examen du moteur. Une fois encore, il est peu recommandé de tenter de déterminer sur les lieux de l'accident la puissance fournie par un moteur alternatif ou un turbopropulseur. Les moteurs et les hélices doivent toujours être examinés par un expert dans un atelier ou un laboratoire bien équipé ou, du moins, avec l'aide d'un technicien ayant de l'expérience dans la maintenance de ce type de moteur.

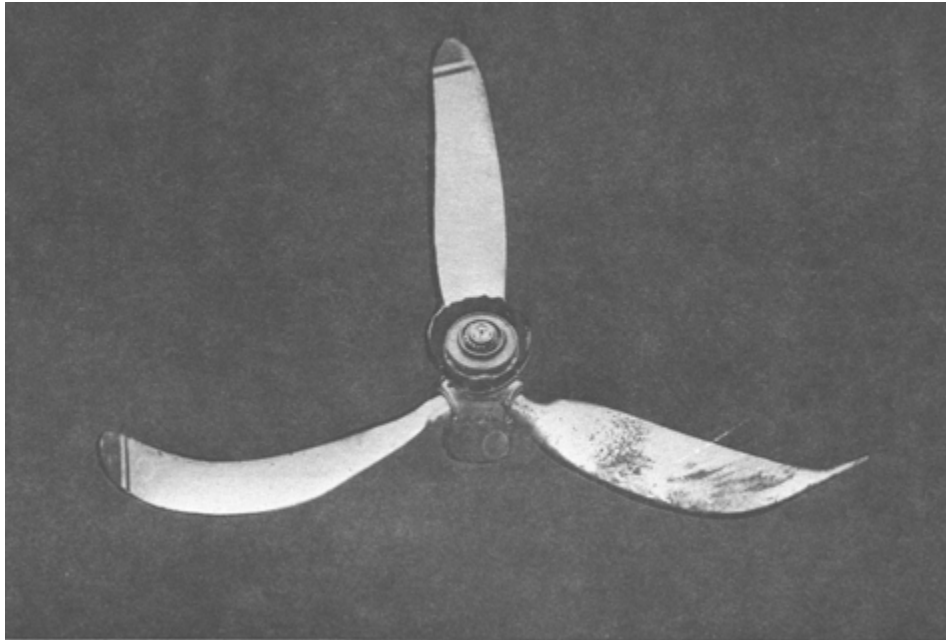


Figure III-12-29. L'hélice tournait en moulinet au moment de l'impact.

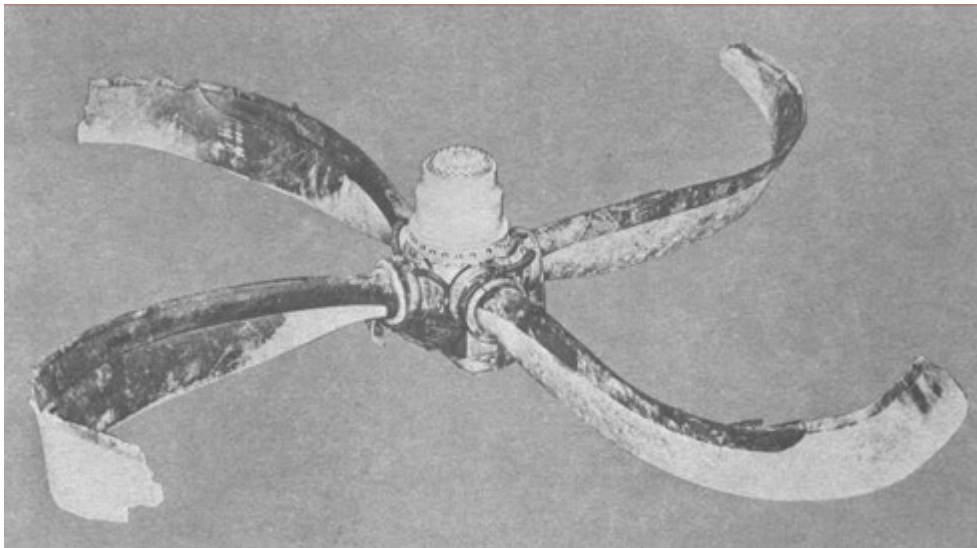


Figure III-12-30. Le moteur développait de la puissance au moment de l'impact.



Figure III-12-31. Le moteur développait de la puissance au moment de l'impact.

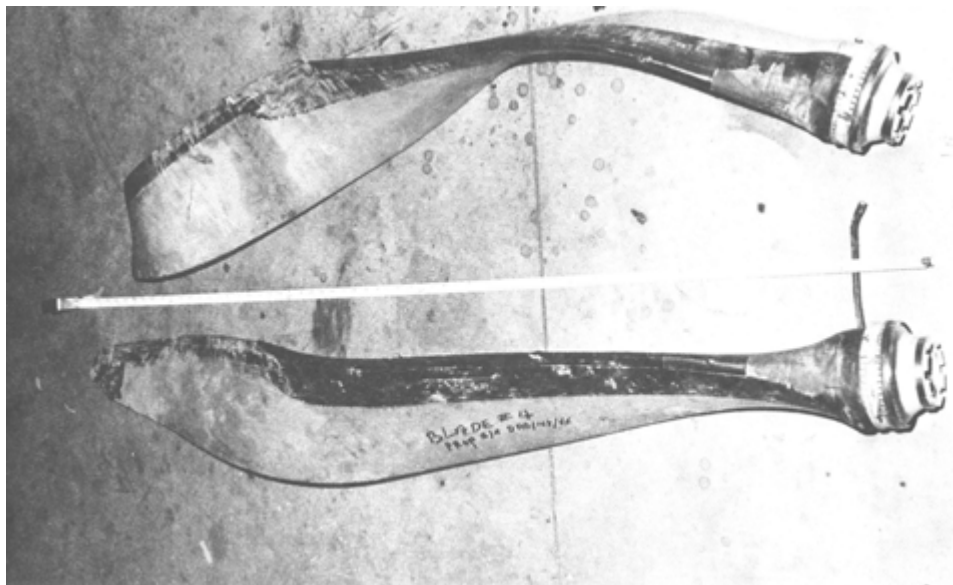


Figure III-12-32. Pales 3 et 4 de l'hélice ci-dessus



Figure III-12-33. Extrémité de la pale n° 1 de la même hélice

Détermination des défauts de fonctionnement ou des défaillances de moteurs alternatifs

12.3.2 Pour déterminer s'il y a eu une défaillance ou un dysfonctionnement d'un moteur alternatif, il faut examiner tout d'abord les renseignements fournis par les témoins oculaires pour déterminer la nature de la défaillance ou du dysfonctionnement. Les indices les plus courants, ainsi que leurs causes, sont énumérés ci-dessous à titre indicatif. La similitude de plusieurs de ces indices devrait éveiller l'attention de l'enquêteur sur la possibilité d'attribuer une cause erronée à la défaillance s'il n'a pas recours à un examen minutieux du moteur.

Givrage du carburateur

12.3.3 Ce phénomène se produit plus souvent sur les petits moteurs alternatifs que sur les gros moteurs, qui sont généralement dotés de systèmes d'injection moins sensibles au givrage. Le givrage du carburateur est généralement caractérisé par une diminution progressive de la puissance, des ratés, des variations désordonnées du régime moteur, des cognements par intermittence et souvent par l'émission de fumée noire à l'échappement (par suite d'un excès de richesse du mélange). Sur certains moteurs, un givrage du carburateur se produit lorsque l'humidité relative est assez élevée (supérieure à 60 %) par beau temps ensoleillé, et souvent par temps chaud (15/20 °C — 60/70 °F) (Figure III-12-34). Il ne faut pas oublier que les conditions de givrage du carburateur ne sont pas nécessairement les mêmes que les conditions de givrage de la cellule. L'enquêteur doit étudier les conditions météorologiques et comparer ces conditions aux observations qu'il a faites sur l'épave : réglage des papillons d'admission d'air chaud et froid sur le moteur et dans le poste de pilotage. Il convient également de rechercher s'il n'y a pas eu rupture des papillons ou débranchement de leurs commandes.

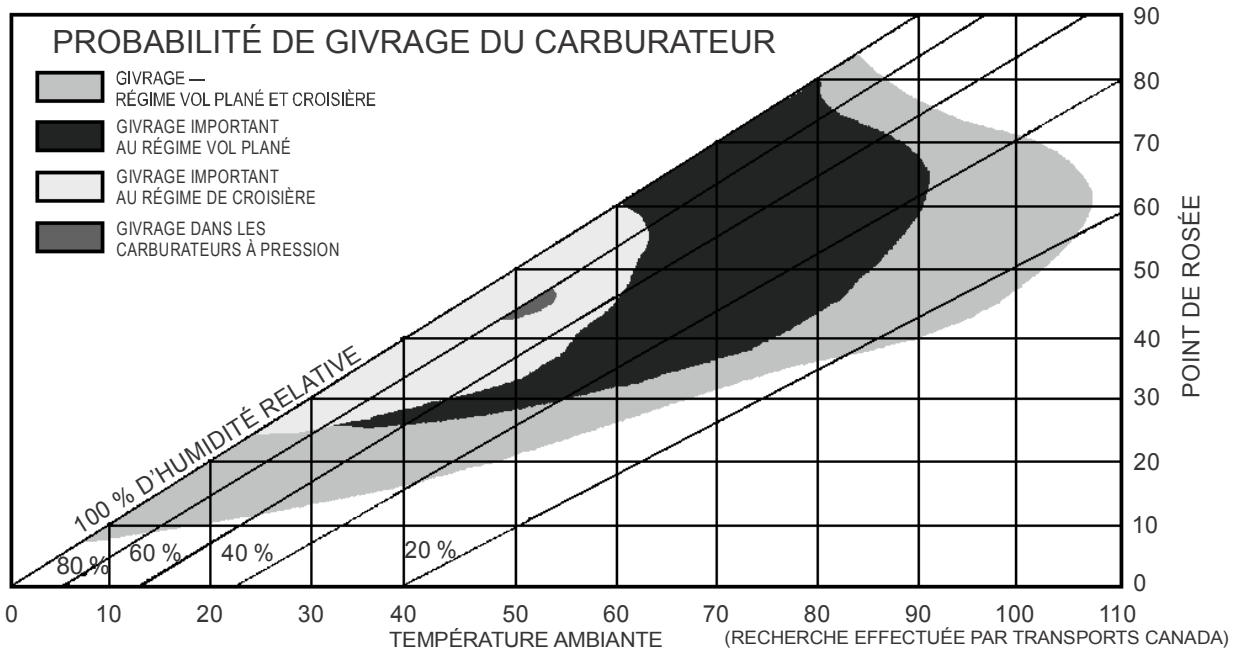


Figure III-12-34. Probabilités de givrage du carburateur
 (Source : recherche effectuée par Transports Canada)

Défauts d'allumage

12.3.4 Les défauts d'allumage sont souvent caractérisés par un cognement intermittent du moteur. Les câbles d'allumage, les câbles reliant les magnétos aux commutateurs montés dans le poste de pilotage, les mécanismes d'entraînement des magnétos et le calage des distributeurs doivent être vérifiés. Les électrodes des bougies peuvent fournir des indices très révélateurs et indiquer d'autres anomalies telles qu'un mélange incorrect ou la présence de dépôts anormaux de plomb. L'enquêteur doit s'assurer que le type de bougies convient au moteur et que les bougies sont vissées à fond. Il doit également s'assurer que le carburant utilisé avait un indice d'octane approprié au moteur, etc.

Panne sèche ou mauvaise arrivée de carburant au moteur

12.3.5 Cette anomalie est souvent caractérisée par des ratés ou des variations désordonnées du régime, mais dans certains cas, selon le type de carburateur ou d'injecteur utilisé, il peut n'y avoir aucune indication préalable audible ou décelable, sauf le fait que le moteur cesse sans bruit de développer de la puissance. Dans le cas des avions multimoteurs, surtout dans le cas de vol aux instruments et de vol de nuit avec hélices à vitesse constante, les pannes de ce genre peuvent être difficiles à déceler pendant un certain temps. Les manomètres et débitmètres de carburant fournissent les indications les plus sûres d'une mauvaise arrivée de carburant produisant une perte de puissance du moteur. Surtout dans le cas des avions multimoteurs, plus d'accidents ont été causés par un mauvais réglage d'un robinet de carburant ou une mauvaise utilisation du circuit de carburant que par une panne sèche proprement dite. L'enquêteur doit avoir soin de noter les réglages de tous les robinets de carburant tels qu'ils ont été observés sur l'épave, qu'il considère ces indices comme utiles et fiables ou non. Les robinets à commande électrique donnent généralement une indication sûre de leur dernier réglage avant l'accident. Les robinets commandés par câbles ou par tringlerie peuvent se déplacer lors de l'impact ou lors des opérations de sauvetage et de récupération et, par conséquent, les commandes de ce genre doivent être considérées comme ne fournissant que des indices douteux du réglage avant l'accident.

12.3.6 L'inspection des réservoirs de carburant et des tuyauteries d'alimentation et de mise à l'air libre du circuit d'alimentation en carburant est indispensable pour s'assurer qu'il n'y avait ni obstruction, ni fuite, ni usure par frottement, ni perforation ou corrosion. L'enquêteur doit procéder à une vérification au dernier point de ravitaillement en carburant et examiner les documents correspondants. Il peut être nécessaire de vérifier l'entreposage et l'utilisation de l'aéronef ainsi que les méthodes d'avitaillement en carburant, car des condensations d'eau peuvent se produire dans les réservoirs et les carburateurs.

12.3.7 Le démontage et l'inspection détaillée des carburateurs et des injecteurs doivent être confiés à des spécialistes dans un atelier ou un laboratoire approprié. Lors de cette inspection, il faut tout particulièrement s'assurer que les gicleurs sont du calibre voulu, que le flotteur n'est pas percé ou coincé, que les puits des gicleurs sont propres et ne sont pas corrodés, qu'il n'y a pas de corps étrangers dans la cuve, qu'il n'y a pas de traces d'eau et que les commandes de mélange et de gaz sont convenablement réglées. Dans le cas des injecteurs, il faut examiner avec soin les robinets de commande, les robinets coupe-feu et la pompe. Pour les injecteurs comme pour les carburateurs, il est souvent préférable d'effectuer d'abord un essai au banc si cela est matériellement possible, avant de procéder au démontage. Ceci s'applique également à des éléments tels que les pompes à carburant. Il faut prendre des précautions pour ne pas faire disparaître des indices de contamination possible lorsque l'on effectue un essai de fonctionnement.

Lubrification

12.3.8 Il est souvent évident qu'une lubrification insuffisante a joué un rôle dans l'accident : mais, dans certains moteurs, l'huile sous pression du circuit d'huile du moteur est utilisée à d'autres fins telles que le fonctionnement des systèmes asservis, le réchauffage des carburateurs, l'alimentation des commandes d'hélice, etc. Par conséquent, il faut examiner les circuits d'huile depuis le réservoir jusqu'au moteur pour déterminer s'il y a des obstructions, des tuyauteries desserrées ou détériorées, des fuites, etc. Il ne faut pas oublier de s'assurer que le réservoir contenait la quantité voulue d'huile de la qualité voulue. Tous les filtres à huile doivent être examinés avec grand soin et, s'il y a lieu, leur contenu doit être soumis à une analyse chimique. L'analyse chimique est une technique qui est utilisée pour prévenir des défaillances, déceler les matériaux qui ne répondent pas aux spécifications et déceler l'imminence de ruptures. De nombreuses grandes compagnies aériennes font effectuer des analyses chimiques dans le cadre de leurs opérations normales de maintenance. Une analyse des tendances du métal et de la teneur en contaminants dans les échantillons d'avant et d'après l'accident peut indiquer la cause ou l'ordre du développement de la défaillance du composant.

Intégrité mécanique

12.3.9 Sauf dans le cas des petits moteurs alternatifs simples, le démontage et l'examen détaillé des moteurs ne doivent être effectués que dans les ateliers de révision ou d'inspection de moteurs appropriés. Le constructeur doit toujours être consulté au début de l'enquête, car son expérience et sa connaissance des défauts et des défaillances constituent un atout précieux pour le succès de l'enquête. L'enquêteur doit en principe être suffisamment qualifié pour suivre l'inspection détaillée. Dans le cas contraire, un technicien d'expérience spécialisé dans les groupes motopropulseurs doit participer à titre de conseiller. Tous les défauts et toutes les ruptures suspectes doivent être examinés par un expert en analyse des ruptures ou par un métallurgiste compétent. En général, la fatigue est la cause la plus courante des ruptures des bielles, dents d'engrenage, culbuteurs, arbres à cames, goujons de fixation de cylindres, pistons, ressorts et vilebrequins ; les indices caractéristiques de ce type de rupture sont généralement décelables sur les faciès de rupture.

Indications de puissance élevée dans les moteurs alternatifs

12.3.10 a) Arbre d'entraînement :

- déplacement en torsion ;
- cisaillement de l'arbre ;
- décalage des cannelures du moteur ;

- b) dommages internes importants ;
- c) dents d'engrenage arrachés ;
- d) pièces tournantes usinées ;
- e) fixation du contrepoids déplacée ;
- f) rotor gravement endommagé ;
- g) tuyaux d'échappement pliés (chauds).

Indications de faible puissance dans les moteurs alternatifs

- 12.3.11 a) Arbre d'entraînement :
- aucun dommage de torsion ;
 - peut être déformé par l'impact mais non cisailé ;
- b) peu ou pas de dommages internes par rotation :
- réducteurs ;
 - pignon/arbre de commande des accessoires ;
 - rotor de compresseur ;
- c) rupture par fragilité des tuyaux d'échappement (froids).

12.4 INDICES FOURNIS PAR L'EXAMEN DE L'HÉLICE

12.4.1 L'examen des hélices peut fournir des indices qui, en corrélation avec les indices fournis par les moteurs, peuvent être très utiles pour indiquer :

- a) si un moteur fournissait de la puissance au moment de l'impact ;
- b) le régime d'un moteur (dans certains cas) ;
- c) le calage du pas d'hélice ;
- d) la vitesse sol de l'avion (dans certains cas).

Examen des pales

12.4.2 La première chose à faire lors de l'examen de l'hélice est d'examiner toutes les pales et de vérifier l'intégrité des extrémités de pales. Si des portions de pales manquent, il faut examiner à la loupe la rupture des parties restantes et déterminer si la rupture a eu lieu en vol ou à l'impact. Il convient de noter avec soin tous les indices de rupture en fatigue ou en traction.

Détermination de la rotation à l'impact

12.4.3 L'opération suivante doit consister en un examen permettant de déterminer si l'hélice tournait au moment de l'impact. Les indications les plus caractéristiques sont les suivantes :

- a) pales recourbées dans le sens opposé à celui de la rotation ;
- b) éraflures dans le sens de la corde sur le devant des pales. Il est presque impossible de produire une éraflure qui soit exactement perpendiculaire aux bords des pales à moins que la pale ne soit en rotation ;
- c) recourbure ou déformation semblables des extrémités de toutes les pales (Figure III-12-35). Il est presque impossible d'endommager les extrémités de toutes les pales de la même manière à moins que l'hélice ne tourne ;
- d) bossellement du bord d'attaque des pales ;
- e) torsion de l'arbre d'hélice ou de la fixation.

12.4.4 Il est fort probable que l'hélice tournait au moment de l'impact. Même en cas de défaillance ou de coupure du moteur, l'hélice tournera en moulinet à un régime suffisamment élevé pour produire des indices de rotation. Les exceptions à cette règle sont les suivantes :

- a) L'hélice a été mise en drapeau. Dans ce cas, bien entendu, l'hélice ne présentera pas de signes de rotation.



Figure III-12-35. Extrémité de l'hélice recourbée vers l'avant en raison d'un régime élevé lors d'un impact à faible angle

- b) L'hélice n'a pas été mise en drapeau mais elle était complètement arrêtée, soit en raison d'une défaillance interne (grippage) du moteur, soit en raison d'un décrochage aérodynamique de l'hélice. Si le moteur était grippé, les indices seront clairs. La théorie du décrochage aérodynamique suppose que le moteur a été coupé et que l'avion a ralenti au point d'arrêter la rotation de l'hélice en moulinet, ce qui est très difficile à réaliser ; il faut en général maintenir l'avion près d'un décrochage total tout en attendant que l'hélice s'arrête.

12.4.5 Si elle n'a pas été mise en drapeau, l'hélice tournait probablement au moment de l'impact. Les indices de rotation en fait ne disent pas grand-chose. Par contre, une absence totale d'indices de rotation devrait conduire l'enquêteur à soupçonner une défaillance interne massive du moteur.

12.4.6 Toutefois, il faut mettre en garde l'enquêteur qui examine l'épave sur les lieux de l'accident car il doit éviter toute conclusion hâtive au sujet des dommages et des déformations qu'il peut relever sur les pales d'hélice qui ont heurté le sol. Il est trop facile de conclure que le moteur fournissait de la puissance au moment de l'accident parce que l'hélice est très tordue ou très endommagée. Il faut établir la corrélation entre les indices obtenus par l'examen des pales d'hélice et les autres indices avant de pouvoir formuler une conclusion valable.

12.4.7 Les dommages de l'hélice ne révèlent pas grand-chose à propos de la puissance fournie par le moteur à moins que l'hélice n'ait laissé des marques sur le sol qui permettent à l'enquêteur de calculer le régime du moteur. Il est dit dans de nombreux documents sur les enquêtes que des extrémités de pales recourbées vers l'arrière signifient que le régime était faible et que si elles sont recourbées vers l'avant, le régime était élevé. Ces indications sont trompeuses.

12.4.8 En fait, lorsque les extrémités des pales heurtent le sol, elles peuvent se recourber vers l'avant ou vers l'arrière selon la relation entre le régime du moteur et la vitesse avant. Il s'agit d'un simple exercice sur les forces. La pale de l'hélice n'est pas droite, mais tournée vers l'avant à l'angle de pas de la pale. Si le régime est élevé par rapport à la vitesse avant, la force dominante qui tend à recourber la pale est l'angle de pas de la pale et elle tend à recourber l'extrémité de la pale vers l'avant. Par contre, si le régime est faible par rapport à la vitesse avant, la force dominante exercée sur la pale vient de la vitesse avant, ce qui tend à recourber l'extrémité de la pale vers l'arrière. Le recourbement de la pale n'est donc pas une mesure directe du régime du moteur. Le régime peut être élevé, mais si la vitesse avant est aussi élevée, les extrémités des pales se recourberont probablement vers l'arrière. Si les extrémités sont recourbées vers l'avant, il est clair non seulement que la vitesse de rotation de l'hélice était élevée par rapport à la vitesse avant, mais aussi que l'hélice était entraînée par le moteur. Il faut aussi tenir compte d'autres éléments dans ce phénomène. Tout d'abord, il ne se produit qu'à l'extrémité des pales et le recourbement commence sur le coin du bord d'attaque de l'extrémité. Une pale recourbée à partir du milieu, soit vers l'avant, soit vers l'arrière, n'est pas une indication d'un régime élevé ou faible. Deuxièmement, le recourbement se produit sur toutes les pales ; si une seule pale est recourbée, la cause n'est pas la rotation. Troisièmement, le recourbement se produit à des angles d'impact relativement faibles : 5° ou moins. Ce phénomène se produit le plus souvent dans les atterrissages train rentré. Si le pilote ne se rend pas compte que le train est rentré jusqu'à ce qu'il entende un crissement, les pales se recourberont vers l'arrière. Par contre, si le pilote se rend compte à la dernière minute que le train est rentré et qu'il pousse la manette des gaz complètement vers l'avant pour remettre les gaz, l'extrémité des pales sera recourbée vers l'avant.

12.4.9 Pour éviter de perdre des indices importants, il est bon de marquer la position du pied de pale par rapport au moyeu d'hélice, mais lorsque la transmission entre la pale et le mécanisme de changement de pas s'est brisée à l'impact, la valeur de ces marques doit être déterminée lors de l'inspection détaillée. Il faut tenir compte d'un grand nombre de facteurs et chaque accident doit être étudié en conséquence. L'angle d'impact, la nature du sol, la vitesse à l'impact, les matériaux de construction de l'hélice, qu'il s'agisse d'alliage d'aluminium, d'acier ou de bois, sont autant de facteurs qui influent sur cette détermination. Bref, il ne suffit pas d'examiner l'hélice elle-même pour pouvoir dire si le moteur développait ou non de la puissance. Les pales d'hélice ne sont qu'un des maillons de la chaîne d'indices qui, ajouté à l'angle de pas des pales en fonction de la phase de vol dans laquelle s'est produit l'accident, à la torsion éventuelle de l'arbre d'hélice, à l'état du moteur et à la position des robinets de carburant, etc., peut mener à des conclusions plus sûres au sujet de la puissance développée par le moteur au moment de l'impact. On peut déterminer le calage du pas des pales en démontant le régulateur de pas et en vérifiant la position du dispositif de changement de

pas en fonction des traces que laisse souvent l'impact à la base des pales, sur les plaques de presse-étoupe en cuivre. Ces traces peuvent donner des indices utiles et sûrs du pas de l'hélice au moment où celle-ci a heurté le sol. Le travail doit être effectué avec soin, en collaboration avec un représentant du constructeur de l'hélice, ou avec une autre personne qualifiée ayant l'expérience de ce genre d'enquêtes.

12.4.10 Dans le cas des pales en bois, si le moteur développait de la puissance, les pales seront généralement déchiquetées et les éclats seront dispersés à de grandes distances de part et d'autre de la trajectoire de l'aéronef.

12.4.11 Si, au moment de l'impact, les hélices étaient en drapeau, elles ont pu, selon la nature de l'impact, laisser des entailles caractéristiques dans le sol dans l'axe de la trajectoire de l'aéronef. Les hélices en rotation laissent des entailles caractéristiques faiblement espacées que l'on peut utiliser pour faire certains calculs (voir le § 12.4.3). Dans le cas des hélices de certains avions légers, qui sont commandées par un régulateur à pression hydraulique avec rappel à ressort ou à l'air comprimé, il ne faut pas nécessairement conclure, lorsqu'une hélice de ce genre est trouvée en drapeau, qu'elle avait été mise en drapeau avant l'impact. Dans certains cas, ces hélices peuvent se mettre en drapeau après l'impact.

12.4.12 Il ne faut pas oublier que le fait que l'hélice indique que le moteur ne développait pas de puissance au moment de l'impact ne signifie pas nécessairement que le moteur était en panne, car le pilote a pu couper les gaz ou le contact avant l'impact s'il était en mesure de le faire.

Détermination de la vitesse de rotation de l'hélice ou de la vitesse sol de l'aéronef à l'impact

12.4.13 L'espacement des premières marques ou entailles laissées par les pales de l'hélice dans le sol (Figure III-12-36) peut donner des indications utiles, particulièrement si la vitesse sol de l'aéronef au moment de l'impact est connue (ou peut être estimée). Les formules suivantes peuvent être utilisées pour déterminer approximativement la vitesse de rotation de l'hélice, en tours/minute (t/min), au moment de l'impact :

$$t/min = \frac{Vkt \times 101,3}{D \times N}$$

$$t/min = \frac{Vmph \times 88}{D \times N}$$

$$t/min = \frac{t/min \times D \times N}{101,3}$$

$$Vkt = \frac{t/min \times D \times N}{88}$$

où :

D = l'espacement des entailles (en pieds)

V = la vitesse sol

N = le nombre de pales

S'il y a un démultiplicateur, la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est calculée en divisant la vitesse de rotation de l'hélice par le rapport de démultiplication.

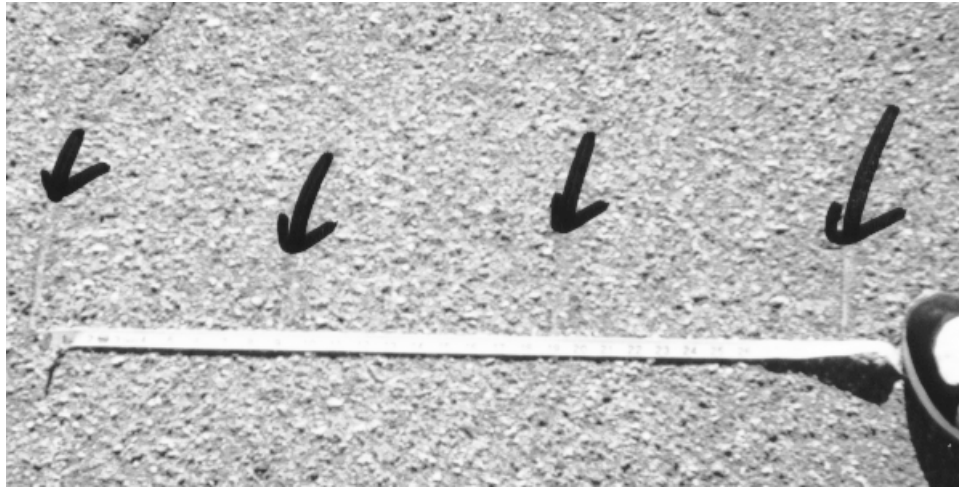


Figure III-12-36. Marques d'impact des pales d'hélice sur la piste

Rupture d'hélice en vol

12.4.14 Certains accidents ont été provoqués par la rupture en vol de pales d'hélice, généralement à la suite de fissures de fatigue. Une telle rupture cause des vibrations violentes et le moteur est souvent arraché de son berceau ; il arrive également que le carter du réducteur d'hélice soit arraché du moteur. Les ruptures d'hélice en vol peuvent ne pas provenir de l'hélice elle-même et il est indispensable de procéder à un examen minutieux du régulateur d'hélice, du circuit d'huile, du moteur et du réducteur.

Fatigue causée par les FOD

12.4.15 Durant le vol, les hélices subissent souvent des FOD : de petites entailles ou éraflures ou de petits sillons augmentent les contraintes qui, si elles ne sont pas corrigées, peuvent provoquer des fissures de fatigue. L'ajustage de petits défauts est un travail qui doit être fait par un mécanicien professionnel et les observations à leur sujet devraient être consignées dans le livret de l'hélice. Des défauts de dimensions excessives, un mauvais ajustage ou un ajustage excessif peuvent conduire à la rupture de l'hélice. Selon la flexion dynamique de l'hélice, de simples marques de crayon peuvent créer une rayure suffisamment profonde pour créer une fatigue.

Rupture par résonance

12.4.16 Toutes les combinaisons de moteurs et d'hélices ont des régimes de fonctionnement qui introduisent des vibrations harmoniques. Le manuel d'utilisation les donne généralement en tours/minute afin d'éviter une utilisation prolongée à ces valeurs et d'indiquer les valeurs de couple à éviter. La résonance est une vibration excessive causée par cette relation harmonique. La rupture par fatigue est le résultat normal de la résonance (Figure III-12-37). Contrairement à la fatigue causée par les FOD, la fatigue par résonance ne comporte pas normalement de point d'origine de fatigue lié à un dommage préexistant. L'enquêteur doit aussi examiner les autres pales de l'hélice pour voir si elles présentent des signes semblables de fatigue. Une rupture par résonance aura le même effet sur toutes les pales même si une d'elles se rompt habituellement avant les autres. Si le point de rupture de fatigue est mesuré depuis le moyeu, des signes semblables de fatigue devraient apparaître à la même distance sur les autres pales. Cet examen peut exiger l'application de méthodes non destructives telles que des techniques de détection par ressuage ou des techniques similaires.

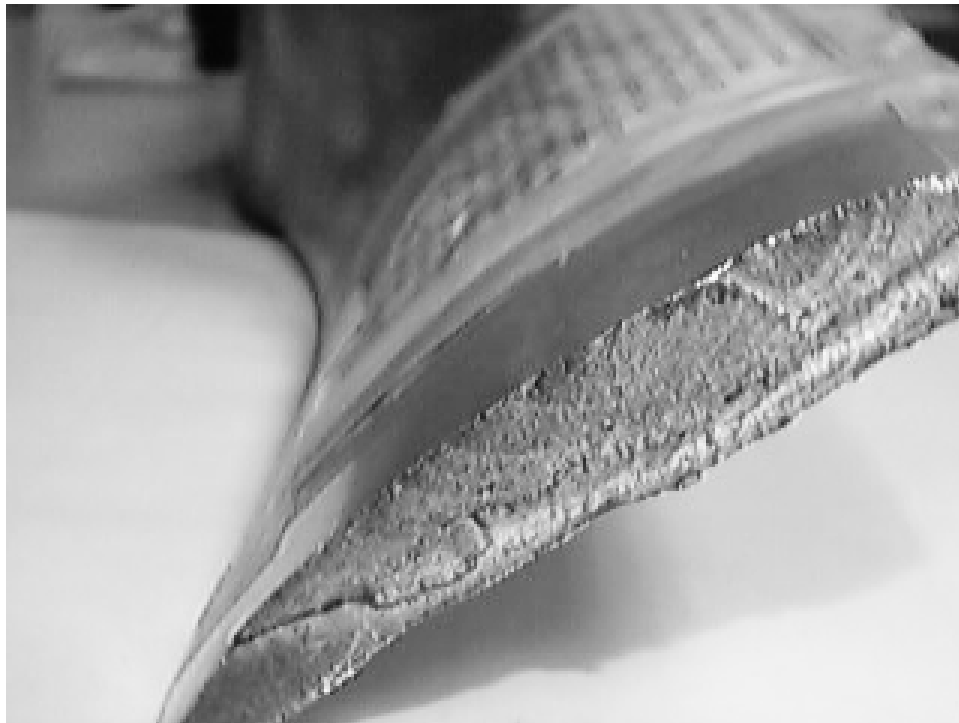


Figure III-12-37. Hélice présentant des lignes d'arrêt à la suite d'une rupture de fatigue

Emballement des hélices

12.4.17 L'emballement des hélices, malgré les efforts de l'équipage pour les mettre en drapeau, intervient aussi dans les accidents d'aviation. Avec certains types d'hélices, la rupture du réducteur peut désaccoupler l'hélice, qui s'emballe et peut tourner en moulinet à une vitesse si excessive que les pales peuvent être arrachées du moyeu sous l'effet d'énormes forces centrifuges. Très souvent, la seule ressource qu'a alors l'équipage pour maîtriser l'emballement de l'hélice est de couper les gaz et de cabrer l'avion pour diminuer la vitesse.

Incapacité de mettre l'hélice en drapeau

12.4.18 Les services d'enquête et les représentants de l'industrie ont décidé, un peu trop hâtivement, que les accidents causés par la non-mise en drapeau de l'hélice étaient la faute des pilotes qui ne suivaient pas les procédures en situation d'urgence, c'est-à-dire qu'ils ne mettaient pas l'hélice en drapeau lors de la défaillance du moteur, ce qui empêche normalement l'avion de maintenir le vol en palier. Un point commun de la plupart des enquêtes sur les accidents dans lesquels les hélices n'avaient pas été mises en drapeau est le fait qu'il n'a pas été tenté de déterminer si la cause de la non-mise en drapeau et de l'accident qui s'en est suivi était mécanique plutôt qu'opérationnelle. Autrement dit, est-il possible que le mécanisme de mise en drapeau n'ait pas fonctionné malgré les efforts du pilote ?

12.4.19 La démonstration en a été faite durant les recherches avec une hélice à vitesse constante et à mise en drapeau totale. Il s'agit d'un dispositif à effet simple dans lequel la pression hydraulique s'oppose aux forces exercées par les ressorts et les contrepoids afin d'obtenir le pas approprié pour les charges du moteur. L'hélice est mise en drapeau lorsque la pression hydraulique est retirée du piston par une commande du pilote : l'huile sous pression est vidée dans le carter. Un mécanisme de verrouillage centrifuge dans l'hélice permet de maintenir l'hélice à la position de petit pas lorsque le moteur est coupé afin d'aider au redémarrage.

12.5 GESTION DES GROUPES MOTOPROPULSEURS

12.5.1 L'enquêteur sur les groupes motopropulseurs, avec le concours d'autres groupes d'enquête, doit vérifier si l'équipage de conduite a bien géré les groupes motopropulseurs. Voici en exemple deux scénarios possibles :

- a) Un accident s'est produit lorsque l'équipage de conduite d'un aéronef multimoteur a incorrectement coupé un moteur qui fonctionnait après un avertissement de dysfonctionnement du moteur.
- b) Les gros aéronefs de transport modernes décollent souvent avec un niveau de poussée inférieur à la poussée maximale au décollage pour protéger le moteur et en prolonger la durée de vie utile. Le réglage de la poussée est calculé en fonction de plusieurs paramètres, notamment la masse au décollage, la longueur de la piste, l'altitude topographique et la pente ainsi que la pression et la température locales. Si les moteurs sont incorrectement réglés à une poussée inférieure à celle qui est nécessaire, l'aéronef peut ne pas être capable de décoller en sécurité même s'il n'y a pas de dysfonctionnement des moteurs.

12.6 NATURE ET QUALITÉ DU CARBURANT

12.6.1 En général, les réacteurs ne sont pas très sensibles à la nature ou à la qualité du carburant ; la plupart des moteurs sont conçus pour fonctionner avec divers types de carburant : kérosène, mélanges de kérosène et d'essence ou même, en cas d'urgence, essence pure. En général, la qualité du carburant est soigneusement vérifiée à la base d'avitaillement avant que l'aéronef fasse le plein, et il est rare que des accidents ou des pannes soient provoqués par l'utilisation d'un carburant de mauvaise qualité dans des turbomachines ; par contre, il y a eu des cas où le carburant s'est dégradé à l'intérieur de réservoirs contaminés, soit ceux de l'aéronef, soit ceux de l'aéroport.

12.6.2 L'enquêteur doit toujours noter la nature et la qualité du carburant utilisé (et faire procéder à une analyse chimique s'il le juge nécessaire). Cela est particulièrement important en cas d'incendie ou d'explosion.

12.7 PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS

12.7.1 Le but essentiel des prélèvements d'échantillons est d'identifier les substances recueillies sur les éléments d'un aéronef et de vérifier si le carburant ou le lubrifiant est conforme aux spécifications. Par conséquent, il faut avoir soin de prélever un échantillon représentatif, ou échantillon moyen, ce qui n'est pas toujours possible dans les enquêtes sur les accidents d'aviation, et le prélèvement d'un échantillon est souvent difficile.

12.7.2 Il faut toujours s'efforcer de prélever les échantillons de lubrifiant sur le moteur et les échantillons de carburant dans les réservoirs principaux ou sur le moteur, et toujours utiliser des récipients propres. Les échantillons de carburant doivent être conservés dans des bidons métalliques convenablement scellés (les récipients en verre ou en matière plastique laissent passer la lumière, ce qui risque de détériorer l'échantillon ; le carburant peut également absorber certains constituants de la matière plastique). Pour pouvoir faire une analyse convenable en laboratoire, il faut un échantillon d'au moins 2 litres (0,5 gallon). Les récipients doivent porter des étiquettes qui indiquent clairement l'immatriculation de l'aéronef, la date et l'endroit où l'échantillon a été prélevé. Les échantillons doivent être envoyés au laboratoire sans délai.

12.7.3 Il est parfois nécessaire de prélever des échantillons d'autres matériaux tels que des dépôts de fumée ou de suie. Les dépôts ou les taches sur les aubes de compresseur doivent faire l'objet d'une analyse chimique en laboratoire afin d'en déterminer l'origine, par exemple aspiration de corps étrangers.

12.7.4 Il est courant de retirer les détecteurs de particules du circuit d'huile pour vérifier la présence de ruptures de paliers comme cause initiale. Les examens endoscopiques sont aussi très utiles pour confirmer sur les lieux de l'accident la possibilité d'une défaillance interne. Pendant ces examens, l'enquêteur doit aussi vérifier si les bouchons des ouvertures d'examen et de remplissage d'huile ont bien été remplacés lors du dernier entretien.

12.8 EXAMEN PAR DES SPÉCIALISTES

12.8.1 Les échantillons de carburant et de lubrifiant doivent être examinés par des spécialistes pour déterminer s'ils sont conformes aux spécifications. Certains des dépôts que l'on trouve parfois dans le circuit de lubrifiant sont des particules métalliques, des particules de calamine, des liquides étrangers ou des boues. Les particules métalliques peuvent être ferreuses ou non ferreuses. Les particules de métaux ferreux proviennent de pièces en acier à l'intérieur du moteur ; les dimensions et la forme de ces particules peuvent donner une indication de la pièce d'où elles proviennent. Les sources les plus probables de particules d'acier sont les parois des cylindres, les segments de piston et les engrenages.

12.8.2 Les particules de métaux non ferreux proviennent généralement de paliers, de coussinets, de pistons ou d'autres pièces d'aluminium, de magnésium ou de bronze.

12.8.3 Des quantités excessives de boue ou de calamine peuvent empêcher l'arrivée du carburant et causer une panne de moteur. Il est assez rare de trouver des liquides étrangers tels que de l'eau ou du carburant dans le circuit de lubrifiant, mais s'il y a des quantités excessives de ces liquides étrangers, les propriétés du lubrifiant sont modifiées, ce qui risque de provoquer des anomalies de fonctionnement du moteur. Une autre cause possible de panne du moteur est l'utilisation d'un lubrifiant incorrect, ce qui peut provoquer de graves incendies internes et un mauvais fonctionnement du moteur. Par conséquent, il peut être extrêmement utile de faire procéder à l'analyse physique et chimique détaillée du carburant, du lubrifiant et des contaminants recueillis dans les circuits de carburant et de lubrifiant.

12.8.4 Si on le peut, il est préférable de procéder à l'essai des groupes motopropulseurs, des accessoires ou des instruments plutôt que d'effectuer une inspection après démontage. Cette préférence doit être nettement spécifiée dès le départ et tous les éléments qui doivent être soumis aux essais doivent être convenablement étiquetés. L'essai d'un groupe motopropulseur complet est souvent impossible, mais on peut effectuer des essais sur un grand nombre de ses accessoires, qui doivent alors être démontés en vue d'un essai au banc. On peut souvent remplacer l'essai au banc par un essai sur une cellule identique à celle de l'aéronef accidenté, ce qui permet parfois d'accélérer les enquêtes.

12.9 AUTRES SOURCES D'INFORMATION

12.9.1 L'enquêteur sur les groupes motopropulseurs peut obtenir des renseignements utiles sur l'état de fonctionnement des moteurs de plusieurs dispositifs de stockage des données. Si l'accident détruit l'aéronef, plusieurs de ces dispositifs seront endommagés et il peut être impossible de récupérer les données. Le spécialiste des groupes motopropulseurs peut cependant être appelé à enquêter sur un incident qui laisse l'aéronef presque intact. Dans ce cas, les données devraient être facilement accessibles. Un endoscope est un outil utile pour inspecter l'état interne du moteur. Il convient de faire appel à un spécialiste des examens endoscopiques pour aider l'équipe d'enquête à effectuer ces examens sur les moteurs.

12.9.2 En plus des dispositifs d'enregistrement de données, les aéronefs modernes sont équipés de systèmes électroniques qui contiennent des unités de mémoire conçues pour le stockage des données. La plupart du temps ces systèmes contiennent des mémoires volatiles dont le contenu se perd quand l'alimentation électrique est coupée, mais les systèmes contiennent souvent des mémoires non volatiles (NVM), qui sont capables de conserver les données

stockées même en l'absence d'alimentation électrique. La récupération des dispositifs NVM peut être extrêmement difficile et exiger beaucoup de temps vu qu'ils ne sont généralement pas identifiés par des marques distinctives.

Enregistreur de données de vol

12.9.3 Le nombre de paramètres enregistrés par l'enregistreur de données de vol (FDR) a sensiblement augmenté au cours des dernières décennies et les FDR modernes à semi-conducteurs ont facilité et accéléré l'extraction et l'analyse des données.

12.9.4 Le spécialiste des groupes motopropulseurs doit obtenir la lecture des paramètres moteur dès que possible pour vérifier si les données disponibles correspondent à l'hypothèse de défaillance avancée. Un tableau comparatif des paramètres provenant de différents moteurs d'un aéronef multimoteur aide à mettre en évidence les différences de performances entre chaque moteur.

Enregistreur à accès rapide

12.9.5 En plus du FDR obligatoire, un grand nombre de gros aéronefs de transport sont munis d'enregistreurs non obligatoires pour aider à diagnostiquer les défaillances et à faciliter la maintenance. Ces enregistreurs, couramment appelés enregistreurs à accès rapide (QAR), peuvent enregistrer un nombre beaucoup plus grand de paramètres que le FDR mais ils ne sont pas renforcés contre les impacts ni contre les dommages causés par l'eau ou le feu. L'enquêteur doit faire appel au constructeur pour extraire toutes les données disponibles.

Système embarqué de communications, d'adressage et de compte rendu

12.9.6 Pour faciliter la maintenance, un grand nombre de gros aéronefs de transport ont à bord des systèmes automatiques qui transmettent des données sur les systèmes de bord, notamment les paramètres moteur, durant le vol. Le centre technique de la compagnie reçoit ces données sur un réseau de communication VHF appelé système embarqué de communications, d'adressage et de compte rendu (ACARS). Vu que ces données sont stockées, il devrait être possible d'obtenir certains renseignements sur le vol accidenté.

Commande électronique de moteur

12.9.7 Les moteurs modernes sont commandés électroniquement par un ordinateur spécialisé connu sous différents noms, notamment commande électronique numérique de moteur pleine autorité (FADEC), commande électronique de moteur (EEC) ou système de commande de moteur (ECU). Ce système n'est pas résistant aux impacts et il n'est pas conçu pour fournir des données accumulées en cas d'accident, mais en l'absence de données du FDR, toutes les données extraites de la FADEC du moteur peuvent être utiles pour obtenir quelques informations sur les dernières minutes du vol. Cependant, la mémoire de la FADEC est conçue pour stocker des informations en vue de la maintenance et la différence entre le moment où se produit le problème, indiqué par le groupe horodateur, et le moment où les données sont stockées en mémoire a une précision trop faible pour les fins de l'enquête sur les accidents.

12.9.8 L'emploi des données de la NVM des moteurs équipés de FADEC dans une enquête sur un accident exige l'assistance d'un expert pour l'extraction et l'analyse des données. L'identification positive et l'attribution des données à la position du moteur sont importantes. Il faut l'aide d'un expert durant l'extraction des données afin d'éviter toute décharge électrique accidentelle qui pourrait corrompre la mémoire. Aucun essai sur place ou au banc ne doit être entrepris sans l'aide du concepteur de la FADEC, car ces essais effacent souvent la mémoire durant la lecture initiale.

12.9.9 La FADEC a fondamentalement pour objectif de commander le moteur et non l'aéronef. Ce dispositif est autoalimenté et utilise des données environnementales telles que la vitesse de l'aéronef, l'altitude-pression et la température que lui fournissent les systèmes de bord. En cas de perte des données environnementales disponibles ou de dysfonctionnement, la FADEC passe en mode secours. Lorsque la FADEC détecte un problème, un groupe horodateur est enregistré sur la NVM avec les données de base et les données environnementales. La NVM enregistre donc fréquemment des problèmes mineurs de toutes sortes durant le vol accidenté et même durant les vols précédents.

Enregistreur de conversations de poste de pilotage

12.9.10 L'enregistreur de conversations de poste de pilotage (CVR) est une source utile d'informations pour l'enquête sur les groupes motopropulseurs. Les alarmes déclenchées dans le poste de pilotage aident à définir le scénario de la défaillance et la chronologie des événements. Les voix des membres d'équipage et les sons du poste de pilotage provenant de l'actionnement des commutateurs peuvent donner certains renseignements sur les résultats de la liste des vérifications effectuées sur le moteur en panne. Une analyse spectrale des sons peut permettre d'estimer le régime des moteurs.

12.10 BIBLIOGRAPHIE

Les documents suivants s'appliquent aux enquêtes sur les accidents et incidents d'aviation :

AFP 127-1 Vol. II, *Investigative Techniques*, Department of the Air Force, 1987.

Documents d'information technique de référence du *Rapport d'enquête aéronautique, Incendie en vol menant à un impact avec un plan d'eau, McDonnell Douglas MD-11 HB-IWF exploité par Swissair Transport Limited, 5 nm au sud-ouest de Peggy's Cove (Nouvelle-Écosse), le 2 septembre 1998, Rapport numéro A98H0003*, Bureau de la sécurité des transport du Canada, 2003.

Airplane Turbofan Engine Operation and Malfunctions — Basic Familiarization for Flight Crews, Engine & Propeller Directorate, Federal Aviation Administration, 2000.

Richard H. Wood et Robert W. Sweginnis, *Aircraft Accident Investigation*, Endeavor Books, 2006.

Jack C. Lipscomb, Richard H. McSwain et Mark Hood, "The Silent Killer," *ISASI Forum*, octobre-décembre 2004.

Chapitre 13

ENQUÊTE SUR LES SYSTÈMES

13.1 GÉNÉRALITÉS

13.1.1 Le groupe d'enquête sur les systèmes est chargé d'enquêter et de faire rapport sur les systèmes de l'aéronef qui ne figurent pas déjà sous une autre rubrique. D'une manière générale, on considère que les éléments suivants entrent dans le cadre des enquêtes sur les systèmes : système hydraulique, systèmes électrique et électronique, système pneumatique, circuit de dépression, système de pressurisation et de climatisation, système de protection contre le givrage et la pluie, instruments, calculateur de données aérodynamiques, directeur de vol, avertisseur de décrochage, systèmes de radiocommunication et de navigation, pilote automatique, système de détection et de protection contre l'incendie et circuit d'oxygène. Il y a forcément un certain chevauchement, par exemple dans le cas des gouvernes à commande hydraulique pour lesquelles la production d'énergie et la régulation de la pression dans le circuit hydraulique font partie de l'enquête sur les systèmes tandis que le fonctionnement hydraulique des gouvernes fait partie de l'enquête sur les structures.

13.1.2 L'enquête sur les systèmes est un travail assez délicat en raison de la diversité et de la complexité de l'équipement moderne. Par conséquent, comme tous les circuits et leur fonctionnement peuvent être ramenés à trois catégories fondamentales, il est indispensable que l'enquêteur possède une bonne connaissance des systèmes hydrauliques, électriques, électroniques et pneumatiques pour pouvoir interpréter et analyser convenablement les indices dont il dispose. Les enquêteurs doivent être prudents lorsqu'ils travaillent avec ces systèmes, particulièrement durant l'examen sur les lieux de l'accident, car plusieurs d'entre eux contiennent des fluides ou des gaz sous pression, ou des éléments chargés électriquement qui peuvent se décharger et entraîner des blessures graves ou la mort.

13.1.3 Les enquêteurs doivent se procurer les schémas de montage détaillés ou les plans appropriés pour déterminer les éléments qui font partie de chaque système, puis s'efforcer de retrouver tous ces éléments ; les schémas ou plans facilitent également l'analyse de l'incidence d'un défaut de fonctionnement d'un élément sur le reste du système.

13.1.4 L'examen d'un système ne se limite pas généralement à l'examen de ses éléments. Il peut comprendre un essai de fonctionnement du système au complet, l'essai des différents éléments d'un système, ou le montage de l'équipement sur un aéronef du même type que l'aéronef accidenté pour procéder à des essais en vol afin de déterminer les possibilités de fonctionnement de cet équipement en vol normal et dans les conditions prescrites par l'enquêteur. Les renseignements tirés de l'examen d'un système peuvent être utiles pour déterminer l'intégrité d'autres systèmes.

13.1.5 L'examen de chaque système peut être décomposé en six parties pour faciliter la recherche des éléments : 1) l'alimentation, 2) la mise sous pression, 3) les commandes, 4) la protection, 5) la distribution et 6) l'application. La documentation sur chaque pièce doit comprendre la désignation, le nom du constructeur, le numéro de pièce, le numéro de série et, s'il y a lieu, le numéro de spécification. Des pièces portant le même numéro peuvent être utilisées en divers endroits d'un même système, surtout dans les systèmes hydrauliques et pneumatiques. Par conséquent, il est indispensable d'obtenir de l'exploitant une nomenclature à jour indiquant l'emplacement exact de ces pièces dans le système, avec le numéro de série correspondant. Ces renseignements peuvent être fournis par le constructeur.

13.1.6 La documentation sur les systèmes et leurs éléments ne doit pas se limiter à une nomenclature ou à des catalogues. Elle doit comprendre une description assez détaillée de l'aspect et de l'état des éléments, ainsi que l'indication de la position des pièces mobiles. Il faut utiliser des phrases complètes et éviter d'employer un style télégraphique sibyllin.

13.1.7 L'un des premiers points à déterminer est la position des commutateurs et des commandes dans l'épave du poste de pilotage. Il ne faut pas oublier cependant que la position des commutateurs a pu être modifiée durant les opérations de recherche et de sauvetage et/ou de lutte contre l'incendie. Il faut également noter les indications de tous les instruments retrouvés. Des notes, appuyées par des photographies, doivent être prises dès que possible en liaison avec le Groupe de l'exploitation. Il convient de demander aux autres enquêteurs de se tenir à l'écart de la zone du poste de pilotage jusqu'à ce que ces indications aient été relevées.

13.2 SYSTÈME HYDRAULIQUE

13.2.1 Les systèmes hydrauliques des aéronefs modernes sont essentiels au vol. La plupart des gros aéronefs ont au moins deux systèmes hydrauliques indépendants. Ces systèmes de commande possèdent généralement des pompes et des réservoirs hydrauliques distincts, qui alimentent soit des actionneurs redondants des commandes de vol, soit des vérins doubles. Les actionneurs doubles peuvent être conçus pour fonctionner en tandem ou en parallèle, et être hydrauliquement indépendants l'un de l'autre. Lors de la défaillance d'un système hydraulique, l'élément de commande touché possède un système intégré de régulation de débit qui passe en mode de contournement, ce qui permet au système en fonctionnement d'assurer une commande ininterrompue sans être entravé par la section régulatrice.

13.2.2 Même dans les aéronefs multimoteurs et multisystèmes, il s'est produit des cas où une seule défaillance catastrophique a conduit à la perte de tous les circuits hydrauliques. Même si la probabilité d'un tel événement est extrêmement faible, les concepteurs ont maintenant incorporé des régulateurs de débit qui détectent l'écoulement illimité d'un fluide indiquant la présence d'une conduite ouverte en aval. Ces régulateurs arrêtent et/ou réacheminent l'écoulement du fluide permettant ainsi de continuer à utiliser le système ailleurs dans l'aéronef. En 1989, un DC-10 exploité par United Airlines (UA232) près de Sioux City (Iowa), aux États-Unis, a subi une défaillance catastrophique du moteur numéro 2, qui a projeté des fragments dans les deux canalisations hydrauliques restantes. La rupture de ces canalisations permettait au fluide hydraulique de s'échapper librement rendant toutes les commandes de vol hydrauliques inutilisables. Même s'il était estimé que la probabilité que cet événement se répète était très faible, il a été décidé d'installer ces régulateurs dans ce modèle d'aéronef (et d'autres aéronefs multimoteurs) pour faire en sorte que le reste des systèmes entraînés par moteur puissent continuer à être utilisés par l'aéronef pendant le vol.

13.2.3 Les enquêteurs doivent prélever des échantillons de fluide hydraulique du plus grand nombre de points possible, par exemple, des réservoirs, des filtres, des actionneurs et des parties de tuyauteries bloquées. Veiller à ce que les échantillons ne soient pas contaminés durant le prélèvement. Les meilleurs échantillons sont probablement ceux qui sont prélevés sur des composants fermés et qui sont envoyés à un laboratoire. Chercher à établir la pression du système au moment de l'impact en examinant les indicateurs de pression hydraulique, les panneaux annonciateurs, etc. (voir le § 13.6, Instruments). Toutes les lectures doivent être mises en corrélation avec le fonctionnement de systèmes tels que les équipements auxiliaires, les affichages multiples, les changements de pression durant les opérations normales et les systèmes de secours. S'il peut être établi que le système fonctionnait sous une pression normale, l'enquêteur peut concentrer ses efforts sur les différents éléments du système plutôt que sur l'ensemble du système.

Fluides hydrauliques

13.2.4 Il convient de se procurer des échantillons de fluide en divers points du système pour les analyser et rechercher les traces d'impuretés. Les réservoirs doivent être examinés pour déterminer la quantité de fluide qui reste et le niveau de fluide avant l'accident et pour s'assurer que les robinets de purge du réservoir sont fermés et bloqués, que les filtres d'arrivée du fluide sont propres et que le bouchon de l'orifice de remplissage est convenablement vissé. Les robinets d'arrêt d'aspiration de liquide peuvent être à commande manuelle ou électrique. Vérifier s'ils sont ouverts ou fermés, puis déterminer si les positions constatées correspondent à un fonctionnement normal ou d'urgence.

13.2.5 Vers la fin des années 1970, l'inquiétude croissante au sujet de l'inflammabilité du fluide hydraulique a mené à l'introduction d'un liquide « moins inflammable ». Même s'il n'était pas complètement ininflammable, ce fluide (MIL-H-83282), avait de meilleures caractéristiques et il est utilisé sur les nouveaux aéronefs et sur les modèles plus anciens par modification en rattrapage. Sur certains aéronefs, cette modification est permise sur une base de combinaison ou de remplacement. Il convient de consulter le manuel de maintenance approprié pour déterminer le type de fluide hydraulique qui devrait se trouver dans l'aéronef accidenté.

Fluide hydraulique standard (MIL-H-5606)

13.2.6 Il s'agit d'une huile minérale composée d'huile de pétrole de qualité supérieure et elle est généralement teinte en rouge.

Fluide hydraulique « résistant au feu » (MIL-H-83282)

13.2.7 Il s'agit d'un liquide synthétique à base d'hydrocarbures mis au point pour offrir une meilleure résistance au feu ; il est conçu pour être totalement compatible avec le MIL-H-5606. Malgré les exigences de conception, tous les systèmes ne sont pas approuvés pour le MIL-H-83282. Certaines caractéristiques du MIL-H-83282 dans les températures froides ont limité son emploi dans certains systèmes de bord, particulièrement s'ils sont exploités dans les régions arctiques. En outre, les joints toriques du circuit hydraulique et d'autres matériaux internes doivent être compatibles avec le MIL-H-83282 avant qu'il puisse être employé.

SKYDROL

13.2.8 Le Skydrol est un fluide hydraulique résistant au feu utilisé en aviation commerciale. Les fluides Skydrol sont généralement du type ester phosphaté et présentent un large éventail de types et de couleurs (vert pâle, bleu, violet, etc.). Les joints et les bagues d'étanchéité ainsi que les tuyaux sont faits de caoutchouc synthétique butyle ou de résine fluorocarbène Teflon®. Les fluides Skydrol ne sont pas compatibles avec le MIL-H-5606 ni le MIL-H-83282.

Réservoirs

13.2.9 Le réservoir (ou bêche) contient les réserves de fluide hydraulique du système. Les systèmes qui n'ont pas de pompes d'aspiration sont généralement pressurisés ou munis d'un autre dispositif mécanique pour maintenir une réserve positive de fluide pour la pompe. Le réservoir permet les échanges de fluides pour tenir compte de l'expansion thermique et des besoins de nombreux actionneurs, particulièrement les plus grands, qui ont des cylindrées inégales, c'est-à-dire une faible cylindrée dans un sens et une forte dans l'autre.

13.2.10 Une tâche importante du réservoir hydraulique est de maintenir une hauteur manométrique positive au point d'aspiration de la pompe hydraulique à toutes les altitudes et pour toute la gamme de manœuvres de l'aéronef, ce qui est réalisé par l'utilisation de pressions pneumatiques, hydrauliques ou de ressort contre le piston ou, dans les modèles plus anciens, d'un diaphragme de caoutchouc souple. Une pression de ressort contre l'arrière du piston est particulièrement efficace pour démarrer un système en l'absence d'auto-pressurisation (*bootstrap*) ou de pressurisation de l'accumulateur, par exemple, après une purge de la pression hydraulique pour vérifier la charge d'azote de l'accumulateur.

13.2.11 À noter particulièrement la différence entre un réservoir hydraulique d'un système « fermé », qui utilise une pressurisation par piston (auto-pressurisation) et un système « ouvert », qui doit employer un moyen pour assurer la continuité du fluide à l'orifice d'aspiration dans toutes les conditions de vol. Il faut non seulement appliquer une pression constante dans le réservoir, supérieure à la pression atmosphérique, mais aussi utiliser un dispositif mécanique pour faire en sorte que les tubes de sortie du réservoir soient toujours submergés dans le liquide, quels que soient les angles ou les positions en vol. Les deux systèmes ont des avantages. Le système de type « ouvert » n'est pas sensible aux graves problèmes que connaît le système de type « fermé » s'il y a introduction d'air dans le système.

13.2.12 Les réservoirs hydrauliques sont conçus de manière à ne pas laisser entrer l'air dans le système. Examiner la position du piston dans un réservoir intact pour essayer de déterminer la quantité de liquide qui reste. Si le réservoir s'est détaché ou si tout le liquide s'est échappé durant la rupture, examiner les parois des réservoirs pour trouver des marques qui pourraient indiquer le niveau de liquide qui restait au moment de l'Impact

Pompes hydrauliques

13.2.13 Les pompes hydrauliques principales peuvent être entraînées par un moteur de l'aéronef ou par un moteur électrique. Les pompes auxiliaires sont généralement entraînées par des moteurs électriques. S'assurer que l'accouplement est intact. L'examen du faciès de rupture d'une pièce d'accouplement cisailée peut fournir des indices sur le fonctionnement. Si le faciès de rupture de la moitié correspondante a une apparence usée et légèrement polie, c'est que la pièce d'accouplement s'est rompue alors que la pompe était en fonctionnement et que la source motrice a ensuite continué à fonctionner, ce qui a provoqué le frottement des deux surfaces l'une contre l'autre. Les faciès de rupture propres et sans autres dommages indiquent que la pompe et la source motrice étaient arrêtées au moment de la rupture. Une rupture de ce genre est très probablement provoquée par les contraintes dues à l'impact. Ces indications sont également valables pour tout autre élément fonctionnant d'une manière analogue. Dans le cas d'une pompe dont le raccord d'accouplement est cisailé et dont les faciès de rupture sont endommagés, il convient de s'assurer que la lubrification était normale et qu'il n'y a pas d'usure ou de jeu anormal ni de traces de surchauffe. Examiner le mécanisme intérieur en recherchant des signes de surchauffe, de cavitation ou de rupture. Dans certains cas, les conduites de vidange des carters de certaines pompes sont munies d'un filtre, qu'il convient d'examiner pour s'assurer qu'il ne contient pas d'indices d'une panne imminente ou effective de la pompe. Certaines pompes font plus qu'extraire le liquide du réservoir, le comprimer (pressuriser) pour fournir l'énergie et répondre à l'augmentation ou à la diminution requises de débit du fluide. Pour améliorer les caractéristiques de démarrage des moteurs, les concepteurs ont ajouté des clapets et des sections de détection de vitesse qui font que la pompe ne se charge que lorsqu'un régime spécifique est atteint, procédant à l'inverse à l'arrêt, de manière à réduire les charges au moment du démarrage et de l'arrêt. Si l'enquêteur soupçonne un problème de pression hydraulique, il convient d'analyser en détail le système de pompage. Les quatre types de pompes utilisés sont décrits ci-dessous.

Pompes à débit continu

13.2.14 Une pompe à débit continu fonctionne à une pression système constante et à un débit constant. Lorsque les exigences du système demeurent constantes, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de changements opérationnels, le système utilise des clapets de dérivation pour contourner les éléments du système ; le liquide retourne au réservoir où il est réutilisé. Si une manœuvre l'exige, un clapet s'ouvre pour permettre au liquide d'entrer dans la chambre requise par la course du piston. Le système à débit continu est très compliqué, combinant des dérivations à pression maximale et un système complexe de clapets pour répondre presque immédiatement à la demande.

Pompes à cylindrée variable

13.2.15 Dans ces pompes, le débit est déterminé par les besoins du système. Un régulateur détecte les chutes de pression et apporte les changements nécessaires pour augmenter le débit de la pompe. Cette pompe possède une série de petits pistons qui sont en contact avec un plateau oscillant. Lorsque le système détecte la nécessité d'augmenter le débit et la pression, l'oscillation du plateau augmente avec la demande, ce qui accroît la course des pistons et produit les résultats désirés. Lorsqu'il n'y a pas de demande du système, le plateau n'oscille presque pas, juste assez pour faire circuler le fluide nécessaire à la lubrification et au refroidissement de la pompe.

Pompes à la demande

13.2.16 Ces pompes peuvent être à débit continu ou à cylindrée variable, mais elles ne fournissent de la pression que lorsque le système hydraulique est sollicité. Lorsqu'une manœuvre sollicite un élément qui exige le fluide et la pression hydrauliques, la première réaction du système est de démarrer la pompe. Le système répond ensuite en mode

débit constant ou cylindrée variable tant que le système hydraulique est requis. Une fois la manœuvre terminée et après un délai prédéterminé, le système s'arrête jusqu'à ce qu'il soit de nouveau sollicité. Lorsque le système de rentrée ou de sortie du train d'atterrissage est sollicité, le levier de commande du train est placé dans la position désirée, la pompe démarre et atteint la pression voulue, puis des clapets s'ouvrent pour fournir la pression hydraulique à la partie appropriée du vérin. Le train se déplace jusqu'à la position demandée, un contacteur de position se ferme et le clapet revient à sa position fermée. La pompe continue à fonctionner pendant un court moment puis s'arrête jusqu'à ce qu'elle soit de nouveau sollicitée.

13.2.17 Ces pompes fonctionnent normalement à l'électricité et peuvent être installées n'importe où dans l'aéronef. Elles sont reliées à un sélecteur installé dans le poste de pilotage, qui permet d'activer ou de désactiver la pompe. Un problème courant de ces pompes est de continuer à fonctionner même lorsque la demande a cessé. Comme ces systèmes sont des systèmes à haute pression, ils s'échauffent rapidement et peuvent tomber en panne s'ils fonctionnent constamment. En cas de rupture catastrophique, le liquide hydraulique sous pression peut se répandre près des connexions électriques où peut s'amorcer un incendie. L'enquêteur doit donc examiner les pompes à la demande en cas d'incendie s'il y a des indices de feu à proximité de ces pompes. Si le système hydraulique n'a pas fonctionné lorsqu'il a été sollicité, il faut vérifier la position du sélecteur de la pompe, car le système ne fonctionnera pas normalement si l'équipage ne règle pas le sélecteur de la pompe avant qu'elle ne soit sollicitée. Ce problème peut être signalé comme une « défaillance hydraulique ».

Pompes aspirantes

13.2.18 Certains systèmes hydrauliques, notamment ceux des gros aéronefs, utilisent des pompes aspirantes et des accumulateurs pour fournir un débit constant de fluide hydraulique aux pompes principales. Vu la grande distance qui existe entre les pompes entraînées par les moteurs et les réservoirs, conjuguée au grand volume de fluide requis pour les nombreux sous-systèmes, il est nécessaire d'augmenter l'aspiration du liquide hydraulique. Ces pompes fonctionnent normalement à l'électricité et leur défaillance a généralement une incidence mineure sur le fonctionnement de l'ensemble du système. Les systèmes sans pompes aspirantes utilisent des réservoirs pressurisés ou d'autres moyens mécaniques pour fournir un débit constant de fluide à l'orifice d'aspiration.

Accumulateurs hydrauliques

13.2.19 Les pompes et les régulateurs hydrauliques ne peuvent pas toujours réagir assez rapidement pour fournir les grandes quantités de fluide hydraulique requises. Le résultat peut être une diminution de la pression dans le système, ce qui n'est pas souhaitable même si elle n'est que de très courte durée. Les accumulateurs fournissent l'énergie hydraulique nécessaire durant les premiers moments de l'augmentation de la demande jusqu'à ce que le mécanisme de débit variable de la pompe puisse y répondre. Un autre avantage des accumulateurs est leur capacité naturelle d'amortir les impulsions hydrauliques haute fréquence liées aux systèmes de pompes multipistons. Cette caractéristique peut être extrêmement utile pour réduire les ruptures de fatigue des fixations des tuyauteries et des composants dues à une dynamique hydraulique indésirable.

13.2.20 Les accumulateurs contiennent du fluide hydraulique et de l'azote. Lorsque le système fonctionne normalement, la pression du fluide hydraulique contrebalance celle de l'azote et l'accumulateur est en équilibre.

Régulateurs de pression et soupapes de sûreté

13.2.21 Examiner les régulateurs de pression et les soupapes de sûreté et s'assurer qu'ils ne sont pas bloqués en position ouverte ou fermée ; on peut aussi les essayer pour déterminer leur tarage. Ces éléments contiennent parfois des ressorts puissants ; pour éviter les blessures, le démontage ne doit être effectué que par un personnel qualifié possédant l'outillage approprié.

13.2.22 Le système de pompes hydrauliques possède généralement son propre système de régulation de la pression maximale. Si le système de régulation ne fonctionne pas ou s'il permet des pointes de haute pression qui risquent de causer des dommages, la soupape de sûreté principale de l'aéronef libère le trop de pression pour éviter les surpressions du système. La soupape de sûreté principale est normalement réglée à une valeur supérieure à la pression maximale de la pompe et elle ne fonctionne qu'en cas de problème de la pompe. Une soupape de sûreté soumise de façon prolongée à des surpressions peut présenter des signes de surchauffe. Le passage du fluide hydraulique à haute pression par une petite ouverture produit généralement des températures élevées et peut surchauffer le système hydraulique ou surmener le système de refroidissement du fluide hydraulique, si ce système est installé.

Collecteurs et répartiteurs de pression

13.2.23 Ces centres de distribution doivent être examinés pour déterminer la position des sélecteurs dont ils peuvent être munis. Les répartiteurs de pression sont généralement commandés manuellement ou par un moteur électrique ; il faut déterminer s'ils étaient en position de fonctionnement normal ou d'urgence. Vérifier les connexions et le câblage électrique correspondant, s'assurer qu'ils sont convenablement fixés et montés, et qu'il n'y a pas de dommages d'origine électrique.

Robinets sélecteurs et actionneurs

Robinets sélecteurs

13.2.24 Examiner les robinets sélecteurs pour déterminer leur position et s'assurer de l'intégrité des commandes. Certains robinets sélecteurs sont commandés directement par câble ou biellette depuis le poste de pilotage. Il ne faut pas tirer de conclusions hâtives de la position dans laquelle les éléments de ce genre sont trouvés, car l'accident peut avoir provoqué une traction sur les câbles ou une rupture de ceux-ci, ce qui rend douteuse la position des robinets.

Actionneurs

13.2.25 Le fonctionnement des actionneurs hydrauliques peut être simple ou complexe selon le rôle qu'ils ont à jouer. Pour ouvrir ou fermer une porte, par exemple, la pression est dirigée vers l'ouverture appropriée pour commander l'extension ou la rétraction de l'actionneur. Il n'y a pas de position intermédiaire. Lorsqu'un déplacement variable est requis, comme dans le cas des gouvernes, les systèmes se compliquent. Dans ces cas, lorsqu'un membre d'équipage sollicite une commande dans le poste de pilotage, un signal électrique ou mécanique est envoyé à un doseur monté sur l'actionneur.

13.2.26 Cette description a pour but de guider l'enquêteur vers les éléments qui lui fourniront des renseignements essentiels. Les forces d'impact laissent souvent des dommages ou des marques qui indiquent la position du plongeur ou du piston au moment de l'impact. Si la position n'est pas fermement bloquée, il faudra probablement couper et ouvrir l'actionneur. Les positions de la tige et de la biellette doivent être mesurées à l'extérieur avant d'effectuer l'examen interne afin de comparer les mesures extérieures de référence avec les marques internes de l'impact. L'avionneur devrait avoir des tableaux de correspondance des dimensions (extérieures et intérieures) avec le déplacement de surface. Une fois l'actionneur ouvert, il est possible de voir les marques d'impact. Selon l'âge de l'actionneur, l'intérieur du cylindre peut porter des marques d'usure importantes. Pour les actionneurs à cylindrée variable, la partie la plus usée sera la position neutre ou non assistée. L'usure diminue jusqu'à la limite normale de déplacement. La plupart des marques d'impact se trouveront entre ces deux points. Pour plus d'exactitude, utiliser une règle avec une précision de 1/100 po. La Figure III-13-1 montre trois types d'actionneurs et les mesures disponibles. Les graphiques indiquent les mesures par rapport à la position commandée.

13.2.27 Le raccordement de la tige de l'actionneur et de l'actionneur avec la gouverne est crucial, comme avec n'importe quel élément électrique. Toute marque d'impact à l'extérieur des limites de la course normale doit être évaluée avec prudence. Durant l'impact, les gouvernes peuvent se déplacer au-delà de leur débattement normal et les fixations

des actionneurs peuvent se casser permettant une extension (ou une rétraction) au-delà de la course normale. Il convient de confirmer ces marques d'impact par d'autres indices avant de conclure que l'actionneur se trouvait, en fait, dans cette position. Il peut aussi y avoir une série de marques d'impact ; dans ce cas, la première marque dans la direction de la position finale est normalement la position initiale à l'impact. Les autres marques sont probablement dues à la séquence de dislocation de l'avion.

13.2.28 Deux points sont essentiels pour l'analyse de la position des actionneurs dans l'enquête. D'abord et avant tout, il faut identifier l'actionneur en question. Les avions utilisent généralement un même type d'actionneur à plusieurs endroits. Ces actionneurs peuvent travailler de concert pour déplacer un système où les éléments sont situés à différents endroits, ou ils peuvent actionner des gouvernes complètement différentes. Lorsque ces actionneurs courants sont présents et que l'actionneur trouvé s'est détaché de la gouverne ou de la structure auquel il est normalement raccordé, il peut être difficile de déterminer quel actionneur commandait quelle gouverne. Le deuxième point important est la relation entre les forces d'impact et la position de montage de l'actionneur. La marque d'impact ira normalement dans le sens des forces d'impact. Idéalement, la force d'impact est perpendiculaire à l'actionneur, ce qui laisse une forte marque, mais même les angles d'impact obliques laissent des empreintes. La direction de l'impact est importante pour déterminer le côté du cylindre de l'actionneur qu'il convient de couper. L'analyse des actionneurs en laboratoire doit être faite par des spécialistes. L'enquêteur doit inclure l'identification de l'actionneur ainsi que les informations sur l'assiette de l'aéronef à l'impact pour que le spécialiste puisse déterminer la coupe la plus susceptible de révéler les marques d'impact initiales.

13.2.29 L'enquêteur doit aussi chercher des indices correspondants sur les autres actionneurs ou gouvernes. Par exemple, si un actionneur d'aileron porte une marque d'impact indiquant que l'aileron correspondant était braqué vers le bas au moment de l'impact, l'actionneur de l'autre côté de l'aéronef peut indiquer que son aileron était braqué en sens contraire. Ce type de confirmation améliore la fiabilité de l'analyse.

13.2.30 Une fois la position de la commande de vol déterminée, le braquage de la gouverne peut être corrélé avec l'effet aérodynamique. Un braquage donné à une vitesse anémométrique donnée, par exemple, donne un résultat prévisible. Cependant si l'équipage de conduite ou un sous-système ne sollicite pas la gouverne, celle-ci retourne normalement à sa position neutre. On ne peut pas déduire l'intention de l'équipage à partir d'une position neutre à moins qu'il n'y ait des indices qui montrent le contraire.

Filtres et dérivations

13.2.31 Examiner les filtres et relever la quantité et la nature des dépôts qu'ils peuvent contenir. L'enquêteur doit spécialement rechercher la présence de débris de joints et de garnitures susceptibles d'indiquer une rupture imminente ou existante d'un élément quelconque.

13.2.32 Les filtres maintiennent la propreté du fluide hydraulique. La santé d'un système hydraulique dépend de l'absence de corps étrangers et de contaminants ; ceux qui sont de taille suffisante peuvent interférer avec l'équipement et les dispositifs de précision ou les bloquer. Les filtres hydrauliques peuvent intercepter des particules et des objets microscopiques qui pourraient endommager les systèmes hydrauliques. Le degré de filtration des filtres se mesure en microns et varie selon leur position et les éléments qu'ils protègent. Par exemple, les actionneurs des commandes de vol exigent généralement une protection de 5 microns ou moins. En général, les filtres possèdent un système de dérivation qui entre en jeu lorsqu'ils atteignent un point où ils bloquent l'écoulement du fluide.

13.2.33 La récupération, l'identification et l'analyse en laboratoire de tous les filtres du système sont d'une importance primordiale dans toutes les enquêtes sur une défaillance du système hydraulique. Les matériaux trouvés dans les filtres peuvent indiquer la défaillance d'un élément ou la présence de contaminants en amont. Lorsque le fluide commence à contourner le filtre et à passer par la dérivation, les contaminants peuvent entrer dans les composants. Un fluide hydraulique contaminé peut perturber le fonctionnement d'un élément qui est très sensible aux contaminants tandis que d'autres éléments moins sensibles à la contamination continueront à fonctionner normalement. Dans la mesure du possible, les filtres doivent être récupérés lorsqu'un dysfonctionnement du système hydraulique est soupçonné.

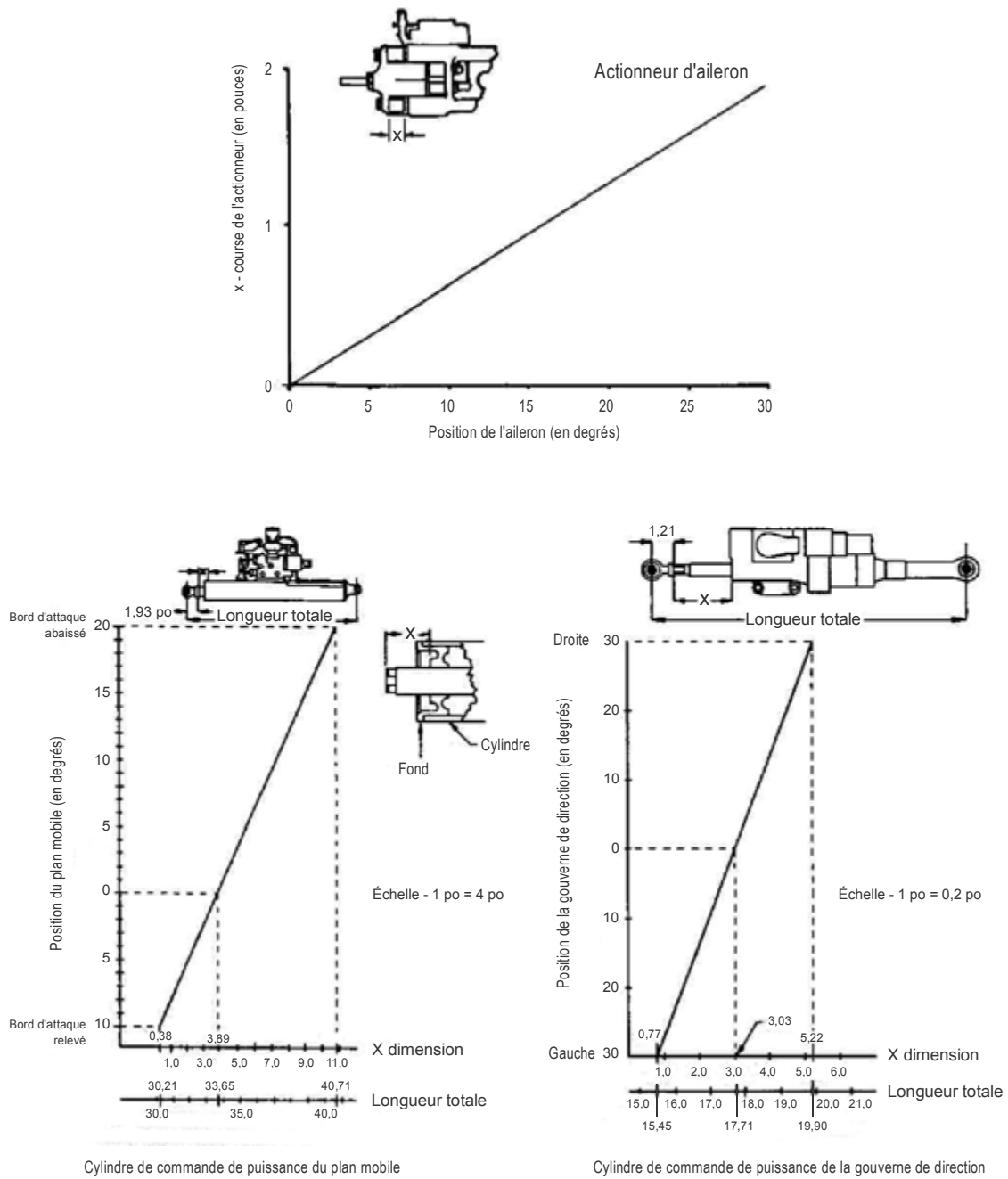


Figure III-13-1. Analyse de la position d'un actionneur

13.2.34 Il n'est pas rare qu'une vanne de commande de précision ou un actionneur de commande de vol possède son propre système de filtration et il faut l'examiner pour vérifier la présence de contaminants.

13.2.35 Les filtres des différents dispositifs doivent être vérifiés par l'organisme chargé du rapport de démontage du dispositif. En fait ces organismes n'approuvent pas que le personnel sur le terrain démonte un dispositif qui doit être analysé. Un des problèmes sur les lieux de l'accident est généralement l'absence de capuchons et de bouchons de raccords hydrauliques utilisés pour fermer les éléments qui doivent être démontés. En fait, ils doivent faire partie du matériel spécifique de l'aéronef à inclure dans la trousse de l'enquêteur.

Canalisations et conduites flexibles hydrauliques

Canalisations hydrauliques

13.2.36 Selon leur fonction et leur application, les canalisations hydrauliques peuvent être en duralium, en acier résistant à la corrosion, en titane ou en d'autres matériaux. Les canalisations en duralium sont généralement utilisées pour les canalisations de retour sous pression, à moins qu'elles ne soient installées dans des zones de haute température. Dans ce cas, même les canalisations de retour sont en acier. Vu que les changements de pression hydraulique déforment quelque peu les canalisations, elles sont fixées à la structure de l'aéronef à l'aide de fixations spéciales qui empêchent le mouvement sans les endommager. Si les fixations ne sont pas installées conformément aux normes techniques, il peut en résulter une rupture ou le ragage des canalisations.

13.2.37 L'intégrité des canalisations de l'aéronef est généralement détruite lors d'un fort impact avec le sol. Les redondances intégrées au système hydraulique normal empêchent généralement les problèmes dus à des canalisations lâches ou brisées de conduire à un accident grave, à moins évidemment que le fluide ne s'enflamme. Le nombre d'incidents liés aux défaillances des canalisations des systèmes uniques semble indiquer que la redondance intégrée accomplit l'objectif souhaité. La seule exception à cette règle est la défaillance d'un actionneur ou d'une vanne double de commande de vol qui utilise un ou plusieurs circuits hydrauliques. Si la rupture ou la défaillance se produit dans une zone ou une paroi commune aux deux circuits, la redondance se perd. En fait, on peut s'attendre à ce qu'une défaillance semblable se produise dans tout système hydraulique de secours installé dans un aéronef.

13.2.38 La maintenance et la réparation de la tuyauterie hydraulique sont des facteurs importants dans les accidents d'aviation. Des tubes de fabrication locale, une substitution incorrecte de métaux, un mauvais cintrage qui oblige à forcer le tube pour qu'il s'aligne correctement, des fixations d'origine non remplacées, le sous-serrage ou le surserrage des raccords ou des erreurs d'installation dans une canalisation qui frotte contre une structure ou un objet adjacent peuvent laisser échapper des jets atomisés de fluide hydraulique haute pression. La tuyauterie hydraulique de l'aéronef est acheminée, fixée et protégée pour éviter le ragage, mais il arrive parfois qu'à la suite de certaines interventions de maintenance, un tuyau hydraulique frotte contre les éléments de l'aéronef ou des moteurs ou contre des objets adjacents, créant de très petites perforations dans le tuyau qui laissent échapper un filet de fluide hydraulique très fin mais à très grande vitesse. Ce fluide est très inflammable dans ces conditions et s'il entre en contact avec un élément chaud comme ceux du moteur, il s'ensuit généralement un incendie. Le feu ressemble à une torche et il y a eu des cas où il a rapidement percé des matériaux résistants à la chaleur.

13.2.39 Examiner les canalisations et les raccords hydrauliques pour vérifier s'ils sont bien fixés, déceler des signes de fuites ou d'autres indices de défaillances qui ont pu se produire avant l'accident. Vérifier aussi si le montage était correct, si les raccords étaient du type requis et si les matériaux des tuyauteries étaient bien ceux qui convenaient.

Flexibles hydrauliques

13.2.40 Les flexibles sont utilisés dans tout le système hydraulique pour raccorder divers éléments au réseau de tuyauterie. Ils ont la souplesse nécessaire pour permettre aux éléments de se déplacer et les isoler des vibrations, et pour d'autres activités qui interdisent l'emploi d'une tuyauterie fixe. Ils varient d'un aéronef à l'autre mais ils ont

généralement constitués d'un tube intérieur en Teflon® recouvert d'un tissu caoutchouté renforcé, qui est à son tour recouvert d'un tressage d'acier. Ils peuvent être assemblés en usine ou localement par les ateliers hydrauliques d'un organisme de maintenance. Certains sont préformés pour s'ajuster à des applications spécifiques. L'utilisation d'un flexible inapproprié pour remplacer un flexible préformé spécifique peut soumettre le flexible à des contraintes indésirables et mener à sa défaillance.

13.2.41 La plupart des flexibles sont normalement raccordés à la tuyauterie et aux éléments de l'aéronef à l'aide de fixations permanentes. Toutefois, certains éléments sont raccordés à l'aide de fixations à déconnexion rapide, qui sont presque toujours utilisées pour raccorder les pompes hydrauliques entraînées par les moteurs au système de bord. Elles sont souvent dotées de dispositifs d'arrêt automatique qui empêchent toute perte significative de fluide hydraulique si elles venaient à se desserrer. Les fixations à déconnexion rapide utilisées dans la tuyauterie des commandes de vol peuvent être munies de dispositifs de décharge de pression qui permettent le fonctionnement sans contrainte de la fonction hydraulique double commande en cas de détachement accidentel. Les fixations à déconnexion rapide peuvent être assujetties à l'aide d'un fil de sécurité, mais elles utilisent le plus souvent un mécanisme de verrouillage interne pour maintenir leur intégrité. Les autres connecteurs du système peuvent être munis ou non de fils de sécurité. Le manuel de maintenance de l'aéronef contient les instructions relatives à l'utilisation des fils de sécurité.

13.2.42 Les flexibles hydrauliques semblent être mieux protégés et mieux inspectés que les tuyaux, mais le ragage est encore très courant. Les flexibles installés près des éléments ou des structures du compartiment moteur sont généralement recouverts d'un revêtement anti-ragage ou combiné à un matériau ablatif. Le mode de défaillance des flexibles haute pression construits de tubes de tresses métalliques à haute résistance est souvent lié au ragage. Il est facile de déceler la défaillance après la rupture, mais pour déceler un ragage ou l'usure de la tresse, l'enquêteur doit utiliser une loupe d'un grossissement de 10x.

13.2.43 Les défaillances des flexibles sont généralement dues au ragage ou à d'une défaillance des extrémités des connecteurs et, parfois, à leur remplacement par des flexibles de mauvaise qualité de fabrication locale. Des erreurs d'installation, comme le fait de ne pas vérifier l'état du flexible avant de serrer les fixations, peuvent forcer le flexible à prendre une position anormale. Ce problème est plus susceptible de se produire si le flexible est raccordé à un dispositif dont la fixation est mobile.

13.2.44 Les défaillances des flexibles préformés présentent un intérêt particulier pour l'enquêteur. Les flexibles utilisés sur les moteurs et dans les espaces restreints des sections de l'aéronef sont parfois fabriqués avec des courbes spécifiques. Malheureusement, le profil n'est pas toujours immédiatement perceptible et le flexible peut être installé à l'envers ou dans le sens contraire du profil désiré. Cette mauvaise installation impose des contraintes au flexible, pose probablement des problèmes de dégagement et réduit sa durée de vie utile. Un flexible préformé est généralement étiqueté et identifié comme tel et mentionné dans les instructions de maintenance. Certains flexibles préformés ont été livrés avec des fils ou des rubans de fixation pour les forcer à entrer dans des boîtes qui n'avaient pas la forme adéquate pour ces flexibles.

13.2.45 La longueur d'un flexible est souvent cruciale : les flexibles trop courts peuvent s'étirer et se rompre et les flexibles trop longs peuvent se coincer dans les composants mécaniques correspondants ou se plier, entraînant la rupture du revêtement intérieur.

13.2.46 Les fixations à déconnexion rapide ont été un facteur dans les incidents et les accidents. Vu leur objectif, elles sont souvent situées à des endroits où il est difficile de les connecter ou de déterminer si elles sont verrouillées ou non. Certains modèles étaient munis d'un dispositif d'auto-verrouillage, mais il a été déterminé par la suite qu'ils auraient dû être munis de fils de sécurité. Que le modèle comporte ou non un dispositif de contrôle de blocage de fluide, un détachement accidentel compromet habituellement la sécurité du vol. Il est généralement utile de déterminer l'état d'une déconnexion rapide après un accident. Si elle est connectée, les canalisations peuvent présenter des signes d'étirement ou de rupture, ou la déconnexion présente des signes de détachement forcé.

13.2.47 La cause la plus fréquente des défaillances hydrauliques dues à une perte de liquide sont liées à l'installation de raccords hydrauliques utilisant des contre-écrous et des joints toriques. Pour accomplir sa fonction, le joint doit être positionné de façon optimale. S'il est installé trop profondément, le serrage du contre-écrou force le joint torique dans la partie supérieure de la section fileté. S'il n'est pas installé assez profondément, le joint torique sera en contact avec la partie inférieure de la section fileté. Les deux positions coupent ou endommagent le joint torique. La position finale correcte du joint torique est au milieu de la section non fileté ou du moins dans une partie où il n'est pas en contact avec le filetage. Si les dimensions et le matériau du joint sont corrects, il faut déterminer si le raccord ou la position posent problème.

13.2.48 Il n'est pas rare durant une enquête de trouver des raccords avec des écrous desserrés, ce qui semble indiquer qu'ils n'avaient pas été convenablement serrés. Durant une rupture, un tube qui est soumis à une charge de traction suffisamment importante s'étire dans la partie évasée et réduit la traction exercée sur l'écrou, qui peut être dévissé à la main ou est desserré. Cette situation est considérée comme normale si un grand nombre d'écrous desserrés sont retrouvés.

Contamination par l'air

13.2.49 Il est généralement difficile ou impossible de confirmer la présence d'air emprisonné dans le système hydraulique après un accident. Les indices d'air piégé et le fluide hydraulique se perdent généralement en cas d'accident grave. Il faut soupçonner la présence d'air dans le système hydraulique lorsque les dossiers de réparation spécifient qu'il a souvent fallu remettre de l'azote dans l'accumulateur ou le réservoir avant l'accident. Il s'agit probablement du problème le plus difficile à cerner lors de l'analyse du système hydraulique durant une enquête. Le piégeage de l'air dans un système hydraulique fermé peut causer plusieurs problèmes, notamment le contrôle irrégulier de la pompe et la cavitation, qui peut endommager le mécanisme de la pompe. Un compte rendu du pilote signalant une fluctuation de la pression du système hydraulique, une réponse irrégulière des commandes ou des vibrations ou des bruits haute fréquence inhabituels lorsque le système hydraulique était sollicité peut indiquer la présence d'air dans le système.

Circuits hydraulique et pneumatique : essais de fonctionnement

13.2.50 Avant de commencer les essais des composants du système hydraulique, prélever des échantillons de fluide hydraulique et les faire analyser pour en déterminer les contaminants, l'acidité, la teneur en eau et la nature. Lorsque le composant soumis aux essais est monté sur un banc d'essai et raccordé aux flexibles de pression, il faut le faire fonctionner pour chasser l'air des tuyauteries. Les premières fractions de fluide hydraulique qui sortent des purgeurs doivent être recueillies dans un contenant approprié et examinées pour déterminer la présence éventuelle de corps étrangers. Un morceau de joint ou autre débris peut s'être logé dans la robinetterie ou les conduites et être expulsé lors de l'opération de purge. Déterminer la pression d'utilisation du composant et s'assurer que l'équipement d'essai peut fournir une pression et un débit suffisants.

13.2.51 Le fluide hydraulique de chaque circuit hydraulique doit être analysé par spectrographie de masse pour déterminer la présence de contaminants, y compris la présence d'additifs et de mélanges de fluides hydrauliques. Les résultats doivent être comparés aux critères d'entretien acceptables établis d'après les spécifications du fabricant et de l'exploitant et le manuel de maintenance.

13.2.52 Les essais des composants hydrauliques et pneumatiques doivent porter sur le fonctionnement des clapets anti-retour, des soupapes de sûreté et des robinets d'arrêt ainsi que sur la mesure des fuites. Les tiges de piston doivent être vérifiées pour déterminer la force requise pour provoquer le déplacement initial à partir de la position de repos. Rechercher les traces de fuites internes excessives ou de dérivation du fluide hydraulique. Si les conditions le justifient, il y a lieu de démonter le composant et d'en examiner l'intérieur. Vérifier spécialement l'état des joints et de la

robinetterie, rechercher les traces de surchauffe, de cavitation et d'usure anormale. La procédure d'essai de fonctionnement utilisée par le fabricant est très détaillée et comprend toutes les tolérances requises. Il convient de se conformer strictement à ces procédures.

13.3 SYSTÈME ÉLECTRIQUE

13.3.1 Les indices extérieurs, les déclarations de l'équipage, les données des enregistreurs de bord, les déclarations des témoins, les enregistrements des communications avec le contrôle de la circulation aérienne, etc., permettent généralement d'orienter l'enquête sur le système électrique. Ces renseignements peuvent être utilisés avec les manuels de maintenance de l'aéronef pour repérer les composants clés du système, les sections de câble, etc., qui doivent être examinés de manière détaillée. Ces éléments doivent être prioritaires durant les opérations de récupération.

13.3.2 Le système électrique est constitué d'un ou de plusieurs dispositifs de production d'énergie et de leurs systèmes de commande, de coupleurs mécaniques ou hydrauliques, d'onduleurs ou de transformateurs-redresseurs, d'équipement d'alimentation de secours, de câblage électrique, de disjoncteurs ou de fusibles, de connecteurs et de bus.

Génératrices, alternateurs et onduleurs

Généralités

13.3.3 Les dispositifs de production d'énergie électrique des aéronefs les plus modernes sont des alternateurs qui fournissent un courant alternatif (CA) de 200/115 volts à 400 hertz (cycles par seconde). Ces dispositifs sont généralement entraînés par les moteurs et le nombre total d'alternateurs sur chaque moteur ou dans chaque aéronef varie largement selon la quantité totale d'énergie requise et la capacité de production d'énergie de chaque alternateur. Plus les besoins sont élevés, plus le nombre d'alternateurs est élevé. Consulter les manuels techniques de l'aéronef pour obtenir des renseignements détaillés.

13.3.4 Certains aéronefs, particulièrement ceux de l'aviation générale, ont des génératrices qui produisent un courant continu (CC) de 12 ou 28 volts. Ces génératrices sont, presque sans exception, directement raccordées au moteur à l'aide d'un coupleur mécanique.

13.3.5 La sortie des alternateurs et des génératrices est réglée par un dispositif de contrôle. Ces dispositifs protègent le système ou le dispositif électrique en cas de dysfonctionnement. Les fonctions de protection portent généralement sur les surtensions, les sous-tensions, les variations de fréquence des génératrices CA (alternateurs), les différences de phase excessives des génératrices CA, les défauts des bus et les courants inversés. Les dispositifs de contrôle ont une sécurité intégrée de sorte qu'une défaillance interne a pour effet de retirer la génératrice CA ou CC du circuit.

Coupleurs mécaniques ou hydrauliques

13.3.6 Le moyen le plus couramment utilisé pour raccorder les alternateurs aux moteurs est un dispositif d'entraînement à vitesse constante (CSD). Il s'agit de coupleurs hydrauliques qui fonctionnent de manière semblable à une transmission dans une automobile et comprennent une pompe hydraulique, un moteur hydraulique et des mécanismes de régulation de la vitesse.

13.3.7 Les coupleurs entraînent l'alternateur à une vitesse presque constante, que le moteur tourne au ralenti ou à pleine puissance. Les CSD ont leur propre alimentation en huile et un échangeur de chaleur huile-air pour refroidir l'huile du coupleur. Ils utilisent l'huile moteur, mais leurs circuits sont complètement indépendants du circuit d'huile

moteur. En cas de dysfonctionnement, de nombreux coupleurs peuvent être déconnectés en vol à distance mais, une fois déconnectés, ils ne peuvent plus être reconnectés en vol. Certains CDS ont aussi une fonction de déconnexion automatique dans les cas de surchauffe extrême.

13.3.8 Le principe de fonctionnement des alternateurs exige une vitesse constante pour assurer une alimentation stabilisée ; ils ne sont donc jamais directement raccordés au moteur à l'aide de coupleurs mécaniques. Le contraire se produit cependant pour les génératrices, qui sont presque toujours directement reliées aux moteurs par des coupleurs mécaniques. L'arbre du coupleur mécanique des génératrices comporte généralement un point de cisaillement ou point faible conçu pour servir de point de rupture contrôlé en cas de rupture ou de grippage mécanique de la génératrice, ce qui déconnecte mécaniquement la génératrice du moteur. Ce point de cisaillement déconnecte mécaniquement la génératrice en cas de défaillance mécanique interne majeure, mais ne la déconnecte pas en cas de dysfonctionnement électrique interne. Sur beaucoup de CSD d'alternateurs, la fonction de déconnexion à distance s'est révélée plus utile que les coupleurs à point de cisaillement des systèmes de génératrices CC plus anciens.

Convertisseurs de courant

13.3.9 Les avions peuvent exiger à la fois un courant de 28 volts CC (VCC) et un courant de 200/115 volts CA (VCA) à 400 Hz. Que l'avion ait des alternateurs 200/115 VCA ou des génératrices 28 VCC, il faut des convertisseurs pour convertir le courant CC en CA et vice versa.

13.3.10 Les transformateurs-redresseurs 28 VCC sont installés sur les avions munis d'alternateurs pour fournir une source fiable d'alimentation CC. Le courant continu est nécessaire pour contrôler de nombreux circuits de commande et d'éclairage et pour recharger les batteries de l'avion.

13.3.11 Les onduleurs 115 VCA, 400 Hz, sont installés sur les avions équipés de génératrices pour fournir le courant CA requis. Un onduleur est un moteur CC connecté à une génératrice CA. Le courant alternatif est nécessaire pour la plupart des systèmes de communication, de navigation et radar.

13.3.12 Les systèmes informatiques modernes exigent en outre une grande variété de tensions d'entrée et de types de courant. Certains systèmes utilisent des microvolts et des milliampères. Les caractéristiques électriques peuvent être cruciales pour le fonctionnement des systèmes et l'enquêteur doit déterminer les exigences du système et la séquence de production d'énergie requise.

Analyse des dysfonctionnements

13.3.13 Les enquêteurs doivent examiner les éléments indiqués ci-dessus en recherchant les signes d'amorçage d'arcs et de grillage, les balais défectueux, les connexions inappropriées de fils et de câbles et les traces de surchauffe. L'examen visuel des génératrices permet parfois de déceler des indices d'un débit excessif. Lorsqu'une génératrice fournit un débit excessif pendant plus de quelques instants, l'élévation de température provoque un changement de couleur des lames du collecteur ou la fusion de la soudure. Dans les cas graves, les lames du collecteur peuvent se soulever jusqu'à coincer les balais ; dans ce cas, les balais cassent et tombent. Si l'on constate un phénomène de ce genre, il est évident que le débit de la génératrice suivait un circuit ayant une résistance plus faible que le circuit prévu, ce qui donne de fortes raisons de penser qu'il y avait un court-circuit en un point quelconque du circuit d'alimentation électrique.

13.3.14 Il convient d'examiner les roulements et paliers pour vérifier leur graissage, leur usure, leur jeu et leur irrégularité. Les roulements usés ou présentant du jeu peuvent amener l'induit ou rotor en contact avec les enroulements de champ ou enroulements du stator et provoquer d'autres dommages internes. Les dommages causés par la rotation (éraflures, rainures périphériques) sur les rotors et/ou les stators des moteurs électriques, des dynamoteurs, des onduleurs et des gyroscopes indiquent que le dispositif tournait au moment de l'impact et que le courant (CA ou CC) était donc présent. Cette conclusion n'est pas infaillible car les gyroscopes peuvent continuer à tourner sur leur lancée pendant longtemps et il est donc possible que l'alimentation du gyroscope ait été interrompue

quelque temps avant l'impact. Les composants qui risquent le plus de présenter des signes de dommages par rotation sont les rotors des pompes de suralimentation carburant, les carters de rotors, les ventilateurs de refroidissement fixés aux induits et les carters correspondants. Les éraflures qui apparaissent sur ces éléments se produisent souvent lorsque l'induit et l'inducteur sont relativement intacts et qu'il n'y a aucun contact physique entre le rotor et le stator. Les dommages par rotation dans les génératrices ou les alternateurs entraînés par les moteurs peuvent confirmer les autres signes indiquant la présence de courant. Ces indices par eux-mêmes montrent seulement que les dispositifs tournaient, mais ils ne prouvent pas nécessairement qu'ils produisaient du courant. Le CSD doit être testé avec l'alternateur CA lorsque les conditions le permettent.

13.3.15 Examiner les rotors et les roulements. Les génératrices, les alternateurs et les moteurs plus gros sont souvent tellement endommagés que le stator heurte le rotor et qu'il est difficile de les séparer. Ils peuvent être séparés à l'aide d'une presse mécanique vu que les éraflures ne seront pas détruites par une séparation forcée. Dans les cas graves, il faudra peut-être scier le stator sur le plan longitudinal pour séparer les deux composants.

13.3.16 Examiner les roulements des composants électriques tournants pour déterminer s'ils ont subi des dommages par rotation durant l'impact. Lorsque les dommages se produisent avant l'impact, il faut déterminer les incidences sur le système lui-même, sur les autres systèmes et sur le fonctionnement de l'aéronef.

13.3.17 Examiner les collecteurs pour déterminer s'il y a des signes d'amorçage d'arcs, de rugosité ou de traînées de cuivre entre les lames ; ces dépôts de poussière de cuivre provoquent des courts-circuits entre les lames et une mise en parallèle non désirée des enroulements d'induit.

Ruptures d'arbres d'entraînement

13.3.18 Les arbres d'entraînement (arbres de torsion creux) des génératrices CC entraînés par les moteurs de l'aéronef peuvent parfois se rompre. Il est important de reconnaître les différents types de rupture.

13.3.19 La rupture d'un arbre qui s'est cassé au point de cisaillement (striction près de l'extrémité de l'arbre) et qui semble avoir été usiné dans un tour s'est probablement produite dans la section de cisaillement prévue par suite d'un arrêt soudain de la génératrice, de contraintes de rotation anormales causées par une surcharge de la génératrice ou par un frottement mécanique excessif dû à une défaillance des roulements et au frottement rotor à rotor qui s'ensuit.

13.3.20 Des incendies ont été amorcés par des génératrices parce que l'arbre ne s'était pas cisailé au point de cisaillement prévu, permettant à l'induit de tourner jusqu'à la destruction de la génératrice ou même après. La chaleur anormale produite par le frottement du rotor contre le stator a enflammé les conduites de carburant, de fluide hydraulique et d'huile situées près de la génératrice. Il y a également des cas où l'arbre s'est cassé à un endroit autre qu'au point de cisaillement en raison d'une surchauffe ou d'un désalignement extrême dus à une défaillance des roulements de la génératrice. Il est normal que l'arbre d'une génératrice se cisaille en cas d'arrêt soudain du moteur. Certaines ruptures d'arbre sont aussi causées par flexion quand la génératrice ou le CSD sont soumis à des charges latérales durant l'impact au sol. Il convient de faire appel à des spécialistes en métallurgie ou en structures lorsqu'il est impossible de déterminer immédiatement les causes de la rupture d'un arbre.

Défaillance des CDS

13.3.21 Les CSD peuvent comporter un arbre à cisailier semblable à celui des génératrices CC. La rupture de l'arbre peut être due à une défaillance interne de la génératrice CA ou au grippage de la génératrice CA durant l'impact. Vérifier la quantité d'huile dans le CSD et son état. Une sérieuse surchauffe peut changer la couleur de l'huile et la dégrader. Le CSD peut être doté d'un indicateur de différence de pression du filtre à huile pour montrer la contamination ou le blocage du filtre. Les CSD contiennent souvent des dispositifs thermiques pour déconnecter automatiquement l'alternateur en cas de surchauffe d'huile et il faut les vérifier. Les CSD non endommagés peuvent continuer à tourner. Dans ce cas, il est possible de vérifier le CSD en détail au banc d'essai. Si l'arbre ne tourne pas, un rapport de démontage officiel peut être nécessaire. Les dysfonctionnements des CSD peuvent forcer la génératrice CA à tourner à

un régime (tour/min) inférieur à celui qui est prescrit, ce qui se traduit par une mauvaise fréquence de sortie de l'alternateur. La fréquence doit être maintenue pour que les alternateurs soient en parallèle et pour que les nombreux composants sensibles à la fréquence fonctionnent correctement.

Batteries

13.3.22 Les batteries sont en général très endommagées lors de forts impacts en raison de leur emplacement et de leurs fixations. Les batteries intactes sont la meilleure source d'information, mais les batteries endommagées peuvent aussi fournir certaines données. L'état des batteries peut être très important puisqu'elles fournissent l'alimentation électrique de secours à l'équipement essentiel dans les situations d'urgence.

13.3.23 On peut utiliser un aréomètre pour vérifier la densité de l'électrolyte des batteries d'accumulateurs plomb-acide. Une densité montrant un état de charge élevé avec une tension maximale disponible indique que les systèmes fonctionnaient normalement. Une batterie avec une faible charge peut indiquer une situation où il a été nécessaire de faire appel à l'alimentation de secours avant l'impact ou que la batterie était vieille et n'était plus utilisable. Il faut faire preuve de prudence en ouvrant les batteries pour en vérifier l'état physique, notamment la désintégration partielle ou complète des plaques positives, le flambage ou la déformation de toutes les plaques ou de grandes quantités de sédiments (particules de sulfate de plomb) au fond du boîtier, qui sont tous des signes de dégradation des batteries.

13.3.24 L'aide d'un spécialiste des batteries est nécessaire pour tester la charge des batteries alcalines (nickel-cadmium, argent, etc.). L'état de la charge de ces types de batteries ne peut pas être déterminé en vérifiant la tension et/ou la densité de l'électrolyte. Les éléments de la batterie ne se chargent pas uniformément parce que chaque élément prend une charge légèrement différente durant le chargement. Un déséquilibre important entre les charges des éléments peut indiquer une batterie à plat même si une pleine charge de 12 ou 24 volts est indiquée. La raison en est que l'élément le plus faible se décharge d'abord. Un élément à plat ne permet pas à la batterie de fonctionner correctement pendant une situation d'urgence.

13.3.25 Il peut se produire des explosions dans les compartiments de batteries, tant avec les batteries plomb-acide qu'avec les batteries alcalines. L'explosion peut être due aux gaz de charge ou à un emballement thermique. L'explosion due aux gaz de charge a l'aspect d'une explosion externe tandis que les problèmes d'emballement thermique ont l'aspect d'une surchauffe et d'une explosion internes. Il convient de consulter un spécialiste si l'emballement thermique est soupçonné.

Transformateurs-redresseurs

13.3.26 Ces dispositifs convertissent le courant alternatif en courant continu et sont utilisés là où l'alimentation électrique de base est fournie par des alternateurs. Ces dispositifs sont à semi-conducteurs et leur capacité de fonctionner ne peut être évaluée que par un essai.

Régulateurs de tension et de fréquence et onduleurs

13.3.27 Des dispositifs tels que les régulateurs de tension, les régulateurs de fréquence, les relais conjoncteurs-disjoncteurs et les tableaux à semi-conducteurs de commande ou de protection des génératrices doivent être testés pour déterminer leur réglage avant l'accident et s'assurer qu'ils fonctionnaient correctement. On peut examiner les contacts et les bobines des relais pour déceler les dysfonctionnements éventuels ; il faut aussi vérifier les circuits internes et s'assurer de leur intégrité. Si des dysfonctionnements ou des anomalies sont relevées, les éléments défectueux doivent être examinés en détail.

Tableaux de distribution

13.3.28 Les barres omnibus, les barrettes à bornes et les boîtes de jonction doivent être examinées pour s'assurer que le câblage et les connexions n'ont pas subi de dommages. L'enquêteur doit également rechercher les indices de desserrage des bornes, les amorçages d'arcs entre bornes adjacentes, les traces de surchauffe et de grillage. Des connexions défectueuses peuvent dégager une chaleur suffisante pour faire fondre les barres omnibus et les barrettes à bornes autour des bornes, ce qui peut provoquer la mise hors circuit de certaines parties du système électrique, ou même une perte totale de l'alimentation électrique. Des anomalies de ce genre ont également provoqué des incendies en vol et au sol. Il y a également lieu d'examiner la possibilité que des corps étrangers aient pu tomber en travers des bornes, provoquant ainsi des courts-circuits et des incendies.

Dispositifs de protection des circuits

13.3.29 Ces dispositifs comprennent les fusibles, les disjoncteurs et les limiteurs de courant. Ils ont pour seul but de protéger le câblage. Les éléments fonctionnant à l'électricité sont généralement équipés d'un dispositif de protection intégré, si le constructeur le juge utile. Tous les dispositifs de protection des circuits doivent être examinés pour déterminer s'ils se sont déclenchés ou si les fusibles ont fondu. Les disjoncteurs peuvent se déclencher s'ils sont chauffés extérieurement, comme cela peut se produire dans un incendie consécutif à l'impact ; ils peuvent également se déclencher sous l'effet de chocs violents. L'enquêteur qui n'est pas sur ses gardes peut interpréter cette indication comme un dysfonctionnement du circuit. Il convient donc d'examiner ce circuit plus à fond avant de tirer une conclusion. Les fusibles et les limiteurs de courant peuvent rester intacts, même en cas de dysfonctionnement du circuit, si l'anomalie électrique disparaît rapidement. Par exemple, un câble d'alimentation mis à la masse peut fondre rapidement avant que le dispositif de protection ait le temps de réagir. Les disjoncteurs sont sujets à détérioration avec le temps, et leur tarage peut se modifier. On a trouvé des disjoncteurs qui présentaient une corrosion interne et qui ne se déclenchaient pas du tout. Si une anomalie de ce genre existe, un défaut électrique peut se transformer en problème grave.

Relais et solénoïdes

13.3.30 Examiner les contacts des relais pour déceler les traces de brûlures et de piqûres. Il arrive parfois même que les contacts soient soudés l'un à l'autre. Rechercher également les ressorts de relais affaiblis ou cassés, ainsi que les spires coupées, grillées ou en court-circuit. Examiner les solénoïdes pour y déceler les traces de surchauffe ou de coupure des spires. Les indications ainsi obtenues permettent parfois de déceler les défauts de fonctionnement du circuit en cause.

Moteurs électriques

13.3.31 Examiner les moteurs électriques pour déceler les indices de panne électrique et les signes de fonctionnement au moment de l'impact. Examiner le câblage, les balais, les collecteurs ou bagues collectrices, et les enroulements de champ et d'induit, et rechercher les signes de surchauffe, de grillage, d'amorçage d'arcs, les connexions défectueuses et les enroulements coupés ou en court-circuit. Examiner l'élément entraîné par le moteur pour déterminer son état, en recherchant tout spécialement les dysfonctionnements qui auraient pu perturber le fonctionnement du moteur. Déterminer si le raccord d'entraînement ou l'accouplement est intact ou cisailé. Si les moteurs entraînent des ventilateurs ou autres appareils rotatifs, ces derniers peuvent fournir des indices de fonctionnement ; les pales du ventilateur peuvent être tordues ou rayées, ou une pièce en rotation a pu être éraflée au moment où elle s'est séparée de son carter. Les pièces en rotation peuvent porter des marques indiquant que l'élément était immobile ou ne fonctionnait pas au moment où le dommage s'est produit. Examiner les roulements des moteurs pour déterminer s'il y a des signes d'usure ou de jeu susceptibles de laisser l'induit porter ou frotter contre les bornes de l'enroulement de champ. Examiner le collecteur et les balais pour déterminer la présence de traînées de cuivre qui peuvent provoquer un court-circuit entre les lames, et rechercher les balais cassés et les fils de balais desserrés.

Câblage électrique

13.3.32 L'examen sur les lieux de l'accident doit se limiter à ce que l'enquêteur peut voir ou mesurer sans l'aide de services d'analyse. Une loupe et un multimètre sont les meilleurs outils pour ce travail. L'examen a pour objectif de repérer le câblage qui doit être récupéré et envoyé au laboratoire pour analyse. Le câblage est important dans l'enquête pour trois raisons : il est la source d'inflammation d'un incendie, il a contribué à la défaillance de systèmes de bord importants ou il fournit des renseignements sur des scénarios d'accident possibles.

13.3.33 Les câbles sont souvent endommagés par un des trois mécanismes de défaillance suivants : électrique, mécanique ou incendie. Il faut en examiner les caractéristiques de rupture et l'état de la rupture. Les caractéristiques de rupture sont les caractéristiques physiques que l'enquêteur peut examiner ou tester. Ces indices matériels peuvent être utilisés pour déduire les conditions qui étaient présentes avant, durant ou après un événement. Chaque caractéristique de rupture est associée à un ou plusieurs ensembles de conditions de rupture possibles. Les conditions de rupture sont les mécanismes qui ont causé le dommage. L'enquêteur utilise ces indices pour déterminer si les conditions de rupture étaient en fait présentes durant l'accident.

Types de câbles

13.3.34 La catégorie de fils la plus importante dans un aéronef est le fil de montage. Ce fil est principalement composé de cuivre et est utilisé dans les câbles d'interconnexion des équipements, des faisceaux fixés à la cellule et à l'intérieur de l'équipement. On trouve aussi des câbles multiconducteurs, des câbles haute tension, des câbles de données à usage spécial et des câbles coaxiaux ou multiaxiaux blindés, et ils doivent être examinés.

13.3.35 Deux alliages de cuivre sont employés dans le câblage de l'aéronef :

- a) le cuivre exempt d'oxygène, à haute conductibilité (OFHC), qui est du cuivre pur à 99,99 % et a une température de recuit de 370 – 650 °C ;
- b) un alliage de cuivre haute résistance (HSCA), généralement un alliage cadmium-cuivre ou cadmium-chrome-cuivre. Cet alliage a amélioré les qualités mécaniques, notamment une meilleure résistance à la traction et une meilleure résistance au recuit aux températures élevées. Le HSCA a une température de recuit de 535 – 760 °C.

13.3.36 Le fil de cuivre employé dans les aéronefs est recouvert d'un revêtement protecteur pour le protéger de l'environnement et améliorer les connexions. Ces revêtements sont appliqués à chaque toron du conducteur, généralement par électroplacage.

13.3.37 Les conducteurs sont recouverts d'un revêtement isolant qui les protège de l'environnement et fournit à la fois une protection mécanique et une isolation électrique. Presque tous les fils utilisés dans les aéronefs sont isolés à l'aide de polymères. Les tresses et les rubans en fibre de verre et d'autres matériaux sont moins utilisés. Il est aussi courant d'entourer les faisceaux de fils dans des gaines enroulées ou extrudées pour protéger davantage les câbles des dommages mécaniques.

13.3.38 Des arcs électriques se forment souvent entre deux conducteurs de polarités opposées qui se trouvent très près l'un de l'autre. Des arcs entre des conducteurs et la cellule en aluminium sont aussi courants vu que la cellule est au potentiel de terre du système électrique. Des contacts intermittents se produisent à cause du ragage des câbles ou de la dégradation de l'isolant. La chaleur est le résultat du courant d'arc et de la chute de tension qui se produit au moment de la formation de l'arc. Le produit tension-courant lié à l'arc représente la puissance thermique disponible pour causer la fusion du conducteur. Par exemple, un court-circuit de 20 A sur un système de 28 V représente une puissance thermique de 560 W. La plus grande partie de cette puissance se dissipera dans une petite zone près de l'arc. L'expérience acquise dans la soudure à l'arc indique que la tension à l'arc se situera entre 10 et 35 V pour des courants allant jusqu'à plusieurs centaines d'ampères. La formation d'arcs est associée à une fusion non uniforme et à une perte de matériau du conducteur.

Caractéristiques de rupture

13.3.39 Les caractéristiques de rupture observées aideront à identifier les conditions dans lesquelles s'est produite la rupture d'un fil donné. Les caractéristiques de rupture sont différentes des conditions de rupture et il n'y a pas de relation univoque entre les conditions et les caractéristiques qui en résultent. Par exemple, la recristallisation peut être le résultat d'une surintensité de courant ou de l'exposition au feu.

13.3.40 Plusieurs caractéristiques des dommages peuvent apparaître dans des zones non uniformes. Il se peut, par exemple, que la partie endommagée du fil ait moins de 2 cm. Dans d'autres cas, les dommages sont uniformes sur une plus grande longueur pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres. L'uniformité ou le manque d'uniformité des dommages peut aider à vérifier le mécanisme de rupture.

- a) La recristallisation est causée par une surchauffe électrique ou par le feu. Le processus d'étirage à froid des fils de cuivre réduit la taille des grains et allonge la structure du grain cristallin le long de l'axe du fil. Si ce fil est ensuite chauffé jusqu'à la température de recristallisation, la structure du grain se transforme.
- b) Les extrémités arrondies indiquent la formation d'arcs. Les arcs produisent une chaleur extrême non uniforme. La chaleur fait fondre le cuivre et forme des globules sphériques sur les extrémités des torons. Les extrémités arrondies sont une caractéristique non uniforme. Cette caractéristique peut aussi parfois être le résultat d'une exposition au feu (voir la Figure III-13-2).
- c) Le transfert de métal indique la formation d'arcs. Il se produit lorsqu'un arc se forme entre deux conducteurs avec une énergie suffisante pour chauffer la surface d'un métal jusqu'à le vaporiser. Dans certains cas, le métal est transféré en gouttelettes qui sont visibles sur les surfaces adjacentes. Les tests de transfert de métal doivent être faits par comparaison avec des échantillons de matériaux non endommagés utilisés comme référence.
- d) Une rupture en coupelle indique une rupture mécanique. Elle peut se produire lorsque le métal ductile du fil subit une charge en traction supérieure à sa résistance en traction. Les contraintes de traction élevées se produisent souvent durant un accident. Soumis à cette contrainte, le fil s'étire ; l'élongation est accompagnée d'une diminution de section appelée striction. Une fois la striction amorcée, il se forme au centre des vides bordés de fissures qui s'étendent radialement. La propagation des fissures forme une lèvres de cisaillement près de la surface à un angle de 45°. La coupelle caractéristique a un centre plat présentant des fossettes et une lèvres de cisaillement extérieure de 45°; l'autre moitié de la rupture a une forme de cône.
- e) La rupture de l'isolant est une condition de défaillance électrique, mais elle peut être amorcée par une abrasion ou un ragage ; il s'agit d'une dégradation catastrophique du matériau isolant. Elle est généralement attribuable à une faible résistance au cheminement d'arc et causée par la carbonisation du matériau isolant. L'isolant carbonisé est conducteur et fournit un chemin au courant entre le conducteur et les autres composants électriques sous tension. La rupture de l'isolant peut se produire avec le temps ou se produire soudainement, par exemple, lorsqu'elle est amorcée par une abrasion mécanique du matériau isolant. La rupture de l'isolant est en général un événement déclencheur et s'accompagne de formation d'arcs.
 - i) Dans les premières étapes de la dégradation de l'isolant, de faibles décharges se produisent entre le conducteur et d'autres éléments sous tension. Ces décharges peuvent se produire à un endroit de l'isolant qui présente des piqûres ou qui est altéré par une contamination chimique.

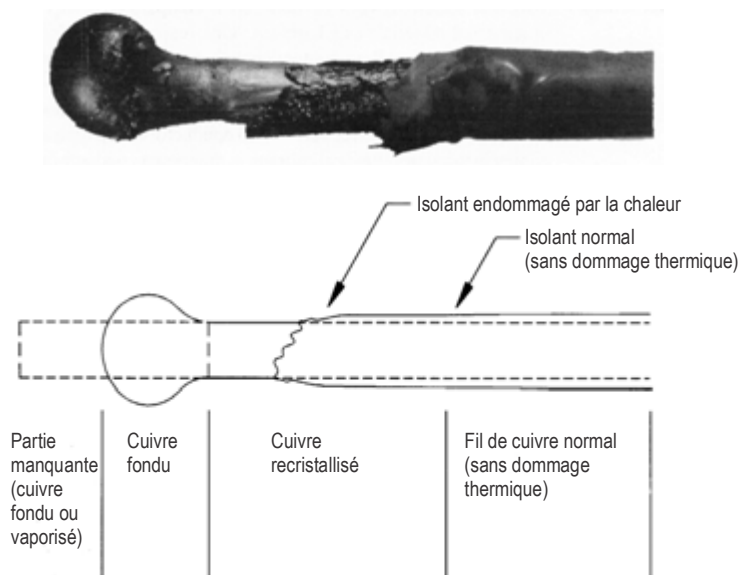


Figure III-13-2. Extrémité arrondie causée par la formation d'arcs

- ii) Aux endroits où le fil forme un coude, des fissures radiales peuvent se développer à partir de défauts de fabrication causés par ragage et se propager complètement dans le matériau isolant jusqu'au conducteur. Le conducteur nu est alors exposé très rapidement, accélérant la rupture de manière catastrophique. Les facteurs environnementaux peuvent grandement accélérer la dégradation des propriétés mécaniques de l'isolant, par exemple, la lumière solaire (rayonnement ultraviolet), l'humidité et divers fluides utilisés dans les aéronefs. Le problème est particulièrement grave dans les environnements humides.
- iii) Les dommages thermiques sont causés par une exposition de l'isolant à une source de chaleur et ne se rapportent pas spécifiquement à une condition de rupture. Les matériaux polymères subissent une dégradation chimique aux hautes températures. Même si chaque matériau est différent, ils ont en commun certains changements de propriétés : changement graduel de la couleur, qui devient généralement plus foncée, perte de souplesse et fissuration, et perte des propriétés de résistance électrique. Lorsque les dommages thermiques sont graves, l'isolant se désagrège ou forme des écailles qui se détachent du conducteur. L'enquêteur doit très soigneusement préserver le matériau isolant en cause pour qu'il soit analysé en laboratoire.
- iv) *Dommage sur la surface interne de l'isolant.* Lorsque l'isolant est séparé du conducteur et que la surface intérieure paraît légèrement décolorée, mais non la surface extérieure, la source de chaleur est le conducteur lui-même, comme dans le cas d'une surintensité de courant.
- v) *Dommage sur la surface externe de l'isolant.* Lorsque seule la surface extérieure de l'isolant est endommagée, la source de chaleur est externe.
- vi) *Modification de la résistance de l'isolant.* Les résistances types des isolants dépassent les 100 mégohms lorsqu'elles sont mesurées entre la surface externe de l'isolant et le conducteur dans des conditions idéales. Après d'importants dommages thermiques, les résistances mesurées peuvent être inférieures à 1 mégohm. Ces mesures peuvent être utilisées pour confirmer les dommages. Le Kapton est un exemple de matériau qui présente ce comportement.

- vii) *Lustrage*. Certains matériaux deviennent brillants ou lustrés lorsqu'ils sont exposés à une source de chaleur rayonnante. Le polyimide est un exemple d'isolant qui présente ces caractéristiques.
- viii) La température maximale à laquelle un isolant a été exposé est une information utile dans une enquête sur un accident. Malheureusement, les dommages thermiques dépendent de la température et du temps d'exposition et il est donc difficile de déterminer la température maximale en procédant à un examen visuel de l'isolant seulement, mais il est généralement possible d'obtenir une idée des températures atteintes en comparant les dommages observés aux propriétés connues du matériau isolant.
- ix) La fusion d'un isolant polymère est un indicateur courant. Les isolants faits de polymères thermoplastiques fondent avant de présenter une dégradation chimique significative. Les températures de certains des matériaux de ce type sont indiquées ci-dessous pour servir de référence approximative durant l'examen :

Polyéthylène	100 – 150 °C
Polychlorure de vinyle (PVC)	221 °C
Nylon	200 – 250 °C
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	327 °C

- x) Les polymères thermodurcissables ne fondent pas aux températures élevées. Les premiers signes de dommages peuvent être une fissuration ou un changement de couleur. Les matériaux ci-dessous ont les températures maximales d'utilisation suivantes :

Silicones	260 °C
Polyimides	60 – 315 °C

- xi) La température de carbonisation des isolants en polyimide aromatique est d'environ 650 °C.
- f) *Changement de couleur du conducteur*. Le changement de couleur d'un conducteur est causé par une exposition à la chaleur ; il est le résultat de l'oxydation et de l'absorption par le cuivre des matériaux de revêtement. Des changements de couleur caractéristiques ont été observés sur les fils à des températures légèrement élevées, même avant tout dommage thermique important. Même si les changements de couleur eux-mêmes n'ont pas vraiment d'importance, ils peuvent donner des indices utiles à l'enquêteur durant un premier examen visuel.

Plusieurs composés chimiques présents dans un incendie après impact peuvent causer un changement de couleur. Les exemples suivants doivent servir de référence générale seulement.

- i) Fil argenté. Entre 200 – 250 °C, l'argent et le cuivre se diffusent l'un dans l'autre. Le fil perd son apparence luisante et devient d'un brun terne.
- ii) Fil étamé. Un mécanisme semblable se produit à des températures plus basses, autour de 150 à 170 °C.
- iii) Des oxydes de cuivre bruns, rouges et noirs se forment sur la surface du conducteur après la disparition du revêtement métallique. La couleur peut dépendre de l'épaisseur de la couche d'oxyde.
- iv) Des composés de cuivre verts se forment lorsque le métal est exposé à l'humidité, à l'eau ou à d'autres liquides, ce qui est parfois le cas lorsque le cuivre est exposé aux éléments après avoir subi un dommage thermique extrême ou la formation d'arcs.

- v) Les fils argentés deviennent souvent d'un jaune terne à des températures relativement basses, ce qui peut être causé par la formation de sulfures ou d'autres composés de l'argent. Le carburant, le fluide hydraulique et la mousse extinctrice peuvent entraîner la formation de divers composés. Une analyse spécifique est nécessaire.

Examen sur les lieux

13.3.41 Il est important de noter où se trouvait exactement le câble avant de le retirer de l'aéronef. Il est recommandé de faire des croquis de la zone et de prendre des photos. Lorsqu'un câble est coupé pour être retiré, les deux extrémités doivent être étiquetées et identifiées par un numéro d'identification unique. Le numéro doit être noté dans les croquis et inclus dans les photos dans la mesure du possible. L'enquêteur doit essayer d'enlever la plus grande portion de câble possible afin de fournir aux analystes du laboratoire des parties utiles de câble intact qui peuvent servir de référence pour les comparaisons. Dans la mesure du possible, enlever complètement, d'une extrémité à l'autre, les faisceaux de câbles et les conducteurs individuels.

13.3.42 Si on soupçonne une défaillance des câbles au point de connexion avec un équipement, celui-ci doit être enlevé avec le câble. Il faut faire attention en retirant l'équipement, particulièrement lorsque la connexion elle-même est en cause. La résistance effective des connexions corrodées, desserrées ou partiellement soudées peut être considérablement modifiée par de petits mouvements.

13.3.43 Si on soupçonne la formation d'arcs, il faut enlever d'autres portions de câble ou de matériau de la cellule qui se trouvent près du câble en plus du câble en cause. Les matériaux des surfaces opposées pourront ainsi être analysés à l'aide d'un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) pour vérifier le transfert de matériaux durant la formation d'arcs. Il faut toujours inclure, dans les échantillons de matériaux qui ont été exposés aux arcs et qui sont soumis pour analyse, des zones non endommagées qui serviront de référence pour l'analyse comparative.

Détermination de la condition de rupture

13.3.44 L'endommagement des câbles est un processus complexe. Il est en général impossible d'associer une caractéristique de rupture à une condition de rupture. La recristallisation, par exemple, est liée aux dommages thermiques et à une surintensité. Les caractéristiques de rupture présentes dans l'accident doivent d'abord être identifiées. Le Tableau III-13-1 donne une liste de ces caractéristiques qui peut être utilisée durant l'examen.

13.3.45 Une fois les caractéristiques de rupture identifiées, la condition de rupture peut être évaluée à l'aide du Tableau III-13-2.

Essais de fonctionnement de l'équipement électrique

13.3.46 Les essais les plus simples peuvent consister à faire fonctionner les génératrices, alternateurs et onduleurs au banc d'essai pour vérifier s'ils fournissent l'énergie électrique voulue à vide et à pleine charge. Les régulateurs de tension et de fréquence ou les tableaux de commande correspondants doivent être utilisés au cours de ces essais si leur état le permet.

13.3.47 Examiner les moteurs électriques pour déceler les enroulements de champ et d'induit coupés ou en court-circuit, les collecteurs et balais défectueux et les signes de dysfonctionnement ayant entraîné une consommation excessive de courant. Lors de l'essai de ces appareils, il faut s'assurer que la tension et la phase de l'alimentation électrique sont correctes. Les relais et les régulateurs, de même que les éléments de commande du circuit électrique de la boîte noire, nécessitent des essais plus détaillés. En général, les relais ont des réglages bien déterminés qu'il convient de retrouver dans les manuels du circuit correspondant ou en se reportant aux renseignements fournis par le constructeur. Pour rechercher ces spécifications, il faut déterminer le type et le modèle du relais.

Tableau III-13-1. Liste des caractéristiques de rupture

CARACTÉRISTIQUE	OUI	NON	OBSERVATIONS
RECRISTALLISATION			
Uniforme			
Non uniforme			
Extrémités arrondies			
Conducteur unique			
Conducteurs multiples			
TRANSFERT DE MÉTAL			
Dépôts de conducteur — EDS			
Dépôts de structure — EDS			
FACIÈS DE RUPTURE EN COUPELLE			
Torons simples/fil			
Torons multiples/fil			
RUPTURE DE L'ISOLANT			
Présence d'isolant carbonisé			
Isolant polyimide			
Ragage			
DOMMAGE THERMIQUE			
Présence d'une source de chaleur externe			
Changement de couleur — extérieur de l'isolant			
Changement de couleur — intérieur de l'isolant			
État			
Température nominale de décomposition ou de fusion			
Décomposition apparente			
Modification de la résistance électrique			
CHANGEMENT DE COULEUR			
Source de chaleur externe			
Source de chaleur interne (conducteur)			
Revêtement des fils			
Température approximative du changement de couleur			
Uniforme			
Non uniforme			

Tableau III-13-2. Liste des conditions de rupture

CONDITION	OUI	NON
SURINTENSITÉ		
Recristallisation		
Changement de couleur du conducteur		
Dommages uniformes		
FORMATION D'ARCS		
Extrémités des fils arrondies		
Transfert de matériau		
Dommage non uniforme		
RUPTURE DE L'ISOLANT		
Ragage		
Isolant carbonisé		
Dommage non uniforme		
RUPTURE MÉCANIQUE		
Faciès de rupture en coupelle		
Étirement de l'extrémité du fil		
DOMMAGE THERMIQUE EXTERNE		
Dommage externe/interne de l'isolant		
Recristallisation		
Dommage non uniforme		
Modifications de la résistance électrique		

13.3.48 Dans le cas des régulateurs de tension et de fréquence à pile de carbone, vérifier l'état de la pile après l'essai pour déterminer s'ils sont capables d'assurer la régulation voulue. La détérioration de la pile provoque un mauvais fonctionnement des régulateurs. Les tableaux de commande et de protection des génératrices et des alternateurs sont avant tout des appareillages électroniques qui nécessitent un équipement d'essai spécial. Se procurer les schémas détaillés des circuits et les spécifications pour effectuer les essais et rechercher les défauts de ces éléments. Les défaillances des relais et des régulateurs ont souvent provoqué la panne d'une alimentation électrique essentielle par suite d'une surchauffe de l'équipement, d'une surtension, d'une consommation de courant excessive, ou même d'un incendie d'origine électrique ayant détruit l'équipement.

Ampoules électriques

Introduction

13.3.49 L'analyse des ampoules électriques a été utilisée pendant de nombreuses années pour aider les enquêteurs à établir la présence ou l'absence de courant dans les divers systèmes de bord. La recherche actuelle montre que l'âge de l'ampoule joue un rôle important dans l'analyse. Les ampoules soumises aux mêmes forces g durant le même nombre de millisecondes présenteront des différences considérables selon leur âge. Les renseignements qui suivent donnent un aperçu des techniques d'analyse des ampoules électriques.

Note.— Les enquêtes sur le terrain portant sur les ampoules électriques doivent se limiter aux indications « classique allumée » ou « classique éteinte » en raison de l'âge inconnu de la plupart des ampoules.

13.3.50 L'analyse des ampoules après l'impact peut être une technique très importante pour interpréter les indices matériels de l'état de l'alimentation électrique de l'aéronef au moment de l'impact. Les techniques et les concepts de base sont relativement simples. Les dommages causés aux filaments durant l'impact sont différents selon que l'ampoule était allumée ou éteinte au moment de l'impact.

13.3.51 Même si les techniques et les concepts sont relativement simples, l'interprétation fiable des dommages causés aux filaments peut être très complexe, en raison de la dynamique de l'impact, des différents types d'ampoules, de l'âge des ampoules et des diverses orientations des ampoules par rapport à l'axe ou aux axes de la force d'impact. Par conséquent, les résultats doivent être soigneusement comparés avec d'autres indices et il faut faire appel à un spécialiste si l'analyse des ampoules contredit d'autres indices ou si les résultats sont cruciaux pour les constatations ou les recommandations de l'enquête sur l'accident.

Terminologie

13.3.52 Voir l'illustration des composants décrits ci-dessous à la Figure III-13-3.

- a) *Enveloppe de verre.* La structure du filament est entourée d'une enveloppe de verre. L'enveloppe est soit vide, soit remplie d'un gaz inerte, pour empêcher l'oxydation du filament.
- b) *Filament de tungstène.* Les filaments des lampes à incandescence sont faits de tungstène quasi pur. Les spécifications de tension et de puissance dictent les dimensions de ce fil qui est généralement tellement long qu'il doit être enroulé en spirale simple ou double pour pouvoir entrer dans l'enveloppe.
- c) *Entrée de courant.* Les conducteurs d'entrée de courant fournissent les points de raccordement avec les extrémités du filament. Ils doivent traverser l'enveloppe pour être reliés au courant externe. Ils sont faits d'un matériau appelé Dumet, qui est un alliage de ferro-nickel cuivré. L'alliage a un coefficient de dilatation thermique correspondant étroitement à celui du verre ; le revêtement de cuivre offre une étanchéité fiable avec l'enveloppe.
- d) *Supports du filament.* Même si l'entrée du courant est le support mécanique principal du filament, de nombreux modèles de lampes exigent un support supplémentaire. Par exemple, la lampe de type 327 a deux supports. Ces supports sont généralement faits de molybdène parce qu'il a une température de fusion élevée (2 410 °C).
- e) *Manchon.* Le manchon fixe l'entrée de courant au culot. Le manchon est fait d'un matériau non conducteur pour assurer la séparation électrique entre l'entrée de courant et le culot.
- f) *Culot.* La plupart des lampes ont un culot métallique qui supporte l'enveloppe de verre et son contenu et contient des contacts électriques. Il y a trois types de culots :

Culot à collerette : ces culots sont entourés d'un bourrelet circulaire près de la base qui permet de retenir la lampe dans la douille.

Culot à baïonnette : ces culots sont munis de deux petits ergots qui s'insèrent dans les contacts correspondants de la douille. Ce type de raccord exige un mouvement de torsion pour fixer la lampe dans la douille.

Sans culot : dans les lampes sans culot, les entrées de courant sont soudées directement aux cartes de circuits imprimés ou aux borniers.

- g) *Contacts électriques.* Chaque type de lampe doit avoir deux contacts électriques. Sur les lampes sans culot, les fils conducteurs servent de contact. Sur les culots à collerette et à baïonnette, le culot métallique constitue un des contacts. Un plot fixé à un isolant à la base du culot est l'autre contact.

Variables

13.3.53 Le type et la nature de la charge d'impact peuvent considérablement changer le mode de rupture du filament. Il convient d'examiner soigneusement l'épave pour déterminer la nature, plus particulièrement l'intensité et la durée, de l'impact pour permettre une analyse fiable des ampoules d'éclairage de l'aéronef.

13.3.54 L'ampoule de base des aéronefs contient un filament de tungstène enroulé en spirale, suspendu entre les entrées de courant. L'enroulement réduit la longueur du filament et permet d'avoir une ampoule plus compacte. Le type d'ampoule le plus courant a un filament spiralé en forme de U inversé dont les extrémités sont raccordées à l'extrémité supérieure des conducteurs d'entrée de courant et la section centrale est maintenue par deux supports. Il y a de nombreux autres types d'ampoules, mais leurs caractéristiques de défaillance sont similaires, certaines ayant des modes de défaillance plus prononcés que d'autres.

13.3.55 Différentes tensions sont utilisées pour les systèmes d'éclairage de l'aéronef, mais leur fonction est essentiellement la même. Lorsque le courant traverse le filament, celui-ci s'échauffe jusqu'à une température de fonctionnement d'environ 1 600 °C. La température est inférieure près des bornes et des supports du filament parce qu'ils servent de dissipateurs thermiques. Le filament chauffé est facilement déformé à chaud lorsqu'il est soumis à des forces extérieures extrêmes. Lorsque la tension baisse au-dessous de la tension de fonctionnement nominale, la température du filament baisse aussi. La tension appliquée et le courant qui en résulte déterminent la température du filament et par conséquent sa ductilité au moment de l'impact. Ce fait est le principe de base des techniques d'analyse des ampoules.

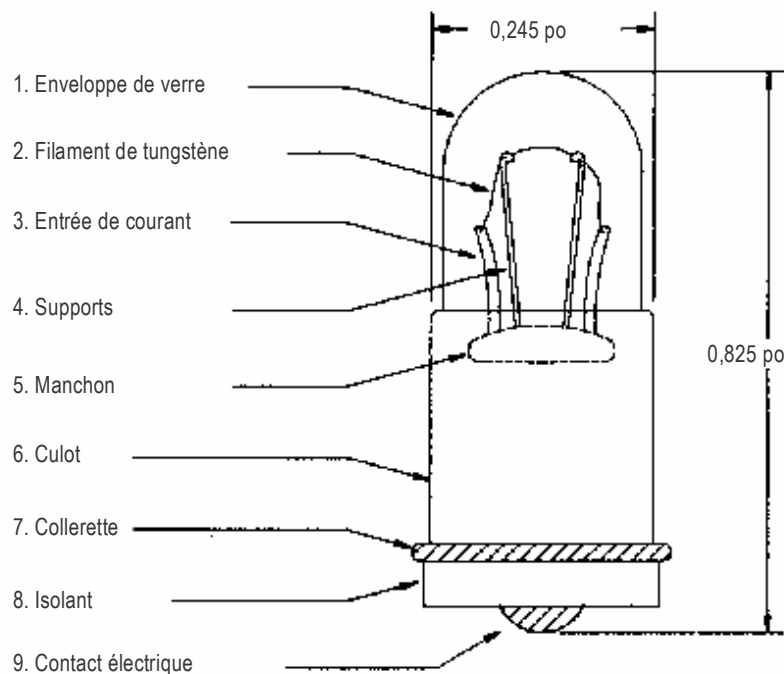


Figure III-13-3. Composants d'une petite ampoule à incandescence à collerette

13.3.56 L'âge de l'ampoule a aussi une incidence sur son mode de défaillance. Les températures et les courants élevés provoquent avec le temps un phénomène d'érosion dans tous les filaments fins, qui fait apparaître sur la totalité ou sur une partie de la surface du filament des irrégularités en dent de scie après que l'ampoule a été utilisée pendant un certain temps. Ce phénomène est plus prononcé dans les ampoules alimentées par un courant CC que par celles qui utilisent un courant CA. L'âge de l'ampoule (nombre de dentelures) a aussi une incidence sur les caractéristiques de rupture des filaments. Les filaments froids très dentelés ont éclaté lors de forts impacts. Le vieillissement peut aussi déformer le filament en y formant des boucles ou en l'incurvant, mais en laissant la spirale du filament intacte. Ces boucles et ces courbures dues au vieillissement sont différentes de celles qui sont causées par les ruptures d'impact des ampoules allumées et elles peuvent être identifiées.

13.3.57 L'orientation de l'ampoule peut être importante selon que les forces sont exercées dans l'axe ou perpendiculairement à l'axe. Comme il se produit plusieurs impacts dans la plupart des accidents où interviennent des forces g élevées, la défaillance de la lampe est causée par des charges multiples et variées contrairement à une force unique avec une orientation fixe.

Examen

13.3.58 L'enquêteur doit recueillir et étiqueter le plus grand nombre d'ampoules possible pour permettre d'établir des comparaisons lors de l'analyse des ampoules. Indiquer si les ampoules devaient être allumées ou éteintes au moment de l'impact facilitera l'analyse des ampoules. Il est très important de bien indiquer l'emplacement de l'ampoule à examiner.

13.3.59 Les filaments doivent être examinés à l'aide d'une loupe avec un grossissement de 8 à 10x. Les laboratoires ont des instruments plus puissants qui peuvent donner plus de renseignements dans les cas cruciaux.

13.3.60 Les filaments des ampoules électriques sont généralement enroulés en spires également espacées entre la base et les crochets de fixation du filament. Lorsqu'un filament chaud est soumis à un choc suffisamment violent, il perd la symétrie des spires et s'étire et se déforme aléatoirement. L'ampleur de l'étirement ou de la déformation dépend de la force et de la direction de l'impact ou du facteur de charge. Un filament chaud ne se rompt pas généralement, mais il ne faut pas hâtivement conclure que l'ampoule n'était pas allumée parce que le filament est cassé.

- a) Les filaments qui ont des ruptures nettes et brillantes, sans qu'il y ait décoloration de l'enveloppe de verre, indiquent que l'ampoule était éteinte au moment de l'impact.
- b) Si les extrémités de filament cassées forment des gouttes ou des globules fondus et que l'enveloppe de verre est décolorée, c'est que le filament a grillé, probablement avant l'impact.
- c) Des filaments très étirés (déroulés) indiquent que l'ampoule était allumée au moment de l'impact.
- d) Les filaments d'ampoules dont le verre est brisé peuvent être étirés par contact avec des corps étrangers. Dans ces cas, le filament ressemble à un ressort trop étiré et la distance entre les spires sera très grande mais fondamentalement symétrique. Le filament peut changer de couleur s'il est chaud au moment de la rupture de l'enveloppe.

Commutateurs

13.3.61 Les commutateurs des aéronefs sont de différents types et sont commandés par un levier ou un bouton rotatif. La position de tous les commutateurs au moment où ils ont été trouvés doit être consignée. Dans la mesure du possible, ils doivent être récupérés en les laissant sur leur tableau de montage, ce qui permettra à l'enquêteur de conserver l'information et la pertinence des autres commutateurs du même tableau.

13.3.62 Lorsque la position d'un commutateur devient un élément important dans l'enquête, la position des commutateurs avoisinants doit aussi être prise en compte. Les membres de l'équipage de conduite qui essaient d'actionner un commutateur en particulier sans l'identifier correctement peuvent actionner le mauvais commutateur par inadvertance. Cette commande ne leur donne pas la réponse souhaitée et complique parfois leur analyse d'une situation causée par un mauvais choix. Les enquêteurs se demandent habituellement pourquoi l'équipage n'a pas pris les bonnes mesures (c'est-à-dire pourquoi il n'a pas actionné le bon commutateur) et, après examen des commutateurs adjacents, se rendent compte que l'erreur était seulement dans le choix du commutateur.

13.3.63 L'apparence extérieure des commutateurs touchés par un incendie change en raison de la fusion de l'isolant phénolique. L'état et la position des commutateurs au moment de leur récupération sont importants pour déterminer la position réelle du commutateur avant l'incendie. Lorsqu'il y a des signes évidents d'incendie, il est important d'analyser l'intérieur des commutateurs.

Commutateurs à levier

13.3.64 Les commutateurs à levier peuvent avoir deux ou plusieurs positions. Ils conservent normalement la dernière position sélectionnée à moins d'être heurtés par un corps étranger ou d'être soumis à de fortes charges d'impact dans la direction du mouvement du commutateur, auquel cas ils conserveront certaines traces de ces événements. Si les forces d'impact sont suffisantes pour déplacer le commutateur, d'autres commutateurs de même type et ayant la même direction de mouvement seront déplacés de la même manière. Si des corps étrangers heurtent un commutateur et en modifient la position, il y aura probablement une marque témoin du côté approprié.

13.3.65 Les dimensions du levier ont une incidence importante sur les charges requises pour modifier la position sélectionnée. Certains commutateurs sont conçus pour être repérés par le toucher et ont donc un levier plus gros pour leur donner une forme qui facilite l'identification tactile. Plus le levier est gros, plus il a de masse et plus il peut être déplacé facilement durant les impacts. Il faut tenir compte des caractéristiques spécifiques des modèles :

- a) *Commutateurs à cran d'arrêt.* Dans ce type de commutateurs, il faut d'abord tirer sur le levier avant de pouvoir le déplacer ; cette configuration vise à éviter toute activation accidentelle. Ces commutateurs résistent donc mieux aux forces d'impact ou à un changement de position causé par l'impact d'un corps étranger, et portent généralement une marque si ces forces étaient présentes. Certains commutateurs à cran d'arrêt ont un mécanisme de verrouillage dans un sens; dans l'autre sens, ils sont munis d'un dispositif qui permet d'actionner le levier sans avoir à le tirer d'abord ; dans ce cas, les forces d'impact ou des corps étrangers peuvent modifier la position du levier dans le sens du dispositif.
- b) *Commutateurs à verrouillage électrique.* Certains commutateurs sont conçus avec une tension de ressort qui maintient le commutateur dans une position donnée, à moins que la position du commutateur ne soit maintenue par la présence d'un courant électrique (parfois provenant d'un autre circuit). Si le courant est interrompu, le commutateur retourne à la position non alimentée sans intervention de l'opérateur. Le fait qu'un commutateur soit dans la position non alimentée ne signifie donc pas qu'elle ait été sélectionnée par l'opérateur.
- c) *Commutateurs sous cache.* Les commutateurs conçus pour n'être utilisés que dans des situations qui exigent des décisions précises, telles qu'une procédure d'urgence, sont parfois placés sous une cache. Pour les actionner, l'opérateur doit d'abord soulever la cache. Ces caches peuvent être protégées en position fermée par un fil de sécurité, ce qui permet confirmer l'intervention de l'opérateur. Certaines caches possèdent une fente qui leur permet de se refermer sur le commutateur après son actionnement. Dans d'autres cas, la cache est pleine et doit demeurer ouverte tant que le commutateur est utilisé. Ces caches pleines peuvent être utilisées avec des commutateurs à cran d'arrêt munis d'un dispositif de déverrouillage qui leur permet de retourner à leur position protégée simplement en abaissant la cache. Cette configuration permet aussi aux forces d'impact ou aux corps étrangers qui sont alignés sur le mouvement de retour de modifier la position sélectionnée du commutateur puisque les forces

nécessaires pour déplacer la cache sont considérablement inférieures à celles qui sont requises pour déplacer le commutateur lui-même. L'état des fils de sécurité des caches doit être évalué avant de conclure que le commutateur n'a pas été actionné avant l'impact.

Commutateurs rotatifs

13.3.66 Les commutateurs rotatifs conservent généralement la dernière position sélectionnée à moins qu'ils n'aient été heurtés par un corps étranger, ce qui sera très évident par la marque témoin laissée sur le commutateur.

Disjoncteurs

13.3.67 Les disjoncteurs jouent deux rôles dans les circuits électriques de l'aéronef. Leur rôle premier est de protéger le câblage de l'aéronef contre les surintensités. Leur second rôle est de couper le courant dans les circuits électriques qui n'ont pas d'autres mécanismes d'interruption.

13.3.68 Les disjoncteurs peuvent être la cause d'accidents. Ils peuvent se déclencher à une valeur inférieure à celle du courant nominal ou ne pas se déclencher lors d'un court-circuit. Ces défaillances peuvent être causées par des problèmes mécaniques ou électriques qui entraînent une perte d'alimentation ou une surchauffe des circuits de l'aéronef.

Construction

13.3.69 La construction des disjoncteurs thermiques pour les avions dépend de l'avionneur, du calibre des disjoncteurs et de l'application. Les structures mécaniques ont changé au fil des ans ; l'âge est donc aussi un facteur. La Figure III-13-4 montre un type de disjoncteur.

Fonctionnement

- 13.3.70
- a) *Déclenchement manuel.* Le bouton permet d'ouvrir le disjoncteur manuellement. La position du bouton indique la position du disjoncteur. Appuyer sur le bouton ferme le circuit et enclenche le mécanisme du bouton. On peut tirer sur le bouton pour ouvrir le circuit. Le corps du bouton a une bande blanche qui n'est visible que lorsque le bouton est tiré ; elle fournit donc une indication supplémentaire que le disjoncteur est ouvert.
 - b) *Déclenchement par une surintensité.* S'il se produit une surintensité lorsque le disjoncteur est en position fermée, les contacts électriques s'ouvrent et le bouton sort. Le disjoncteur doit être réarmé manuellement en poussant sur le bouton jusqu'à ce qu'il s'enclenche.
 - c) *Mécanisme de déclenchement.* L'ensemble de contact mobile est un élément essentiel du mécanisme de déclenchement du disjoncteur lorsqu'il se produit une surintensité. Il contient les contacts mobiles qui touchent les contacts fixes lorsque le disjoncteur est fermé.

Le courant de charge passe entre les contacts mobiles par un bilame situé au centre de l'ensemble de contact. Deux tiges de retenue métalliques partent du bilame et s'appuient sur l'ensemble bouton.

À mesure que la température du bilame s'élève, la composante métallique ayant le coefficient de dilatation thermique le plus élevé (CTE) se dilate plus rapidement que la composante ayant le CTE le plus bas. Cette différence de dilatation déforme le bilame et sépare les extrémités des tiges. Lorsque les deux tiges sont suffisamment séparées en présence d'une surintensité, un mécanisme à ressort se déclenche dans l'ensemble composant le bouton. Tout l'ensemble se déplace vers l'avant du disjoncteur en s'éloignant des contacts fixes et le bouton est poussé vers l'extérieur. De nombreux disjoncteurs ont une vis de réglage qui permet d'ajuster le courant de surcharge qui déclenchera le disjoncteur.

Un poussoir à ressort force le cadre coulissant des contacts mobiles à s'éloigner des contacts fixes et ouvre le circuit. Il pousse le cadre jusqu'à une butée située près du bouton. Le disjoncteur ne peut être réarmé que lorsque le bimétal et les tiges reprennent leur état normal

- d) *Caractéristiques du délai de déclenchement.* La donnée la plus importante pour l'enquêteur est le temps qu'exige le disjoncteur pour interrompre une surintensité.

Le Tableau III-13-3 indique la gamme des délais requis pour un type de disjoncteur. Les délais d'interruption sont plus longs pour les courants plus faibles, ce qui permet un appel de courant pour un démarrage de moteur, un transformateur, etc. On utilise pour cela la réponse naturelle temporisée de surintensité du bilame. Les courants plus forts déforment le bilame et déclenchent le disjoncteur plus rapidement que les courants plus faibles.

Tableau III-13-3. Délai de déclenchement requis

TEMPS À 25 °C	
% du courant nominal	Délai de déclenchement
115	Maintien : 1 heure minimum
150	Déclenchement : 1 heure maximum
200	de 2 à 20 secondes
500	de 0,016 à 2,0 secondes
1 000	de 0,046 à 0,8 secondes
TEMPS À -55 °C	
135	Maintien : 1 heure minimum
180	Déclenchement : 1 heure maximum
TEMPS À 71 °C	
90	Maintien : 1 heure minimum
130	Déclenchement : 1 heure maximum

Caractéristiques de défaillance

13.3.71 Les disjoncteurs ont des mécanismes raisonnablement fiables et à sécurité intégrée, et les paramètres électriques du circuit de charge n'ont relativement pas d'incidences sur l'état des mécanismes. Par contre, les contacts peuvent présenter des signes d'usure, d'arcs et d'autres caractéristiques qui se rapportent au nombre, au type et à l'intensité de courant des opérations électriques. Les surfaces des contacts contiennent donc des informations sur l'état de l'équipement électrique connecté au disjoncteur et c'est pour cette raison qu'ils sont traités dans la présente section. Les caractéristiques de défaillance des contacts peuvent être examinées à l'aide d'un microscope optique ou d'un microscope électronique à balayage (SEM).

- a) *Usure des contacts.* L'usure des contacts est le résultat de la formation d'arcs et/ou d'une abrasion mécanique. Il en résulte un changement visible de l'apparence des contacts qui peut donner des indices sur le nombre d'opérations et les types de charges. Une usure excessive indique un déclenchement répété par surintensité et peut signaler des conditions électriques anormales dans les charges fournies par le disjoncteur. Le fonctionnement mécanique au-dessous du courant nominal ne cause pas d'usure appréciable des contacts. Généralement, les contacts des disjoncteurs peuvent être utilisés jusqu'à 5 à 10 mille cycles sans qu'ils présentent d'usure anormale.
- b) *Transfert de matériau.* Le transfert de matériaux entre des contacts correspondants d'un disjoncteur est dû à la formation d'arcs sur les contacts sous charge. Leur apparence peut donner des indices sur

la direction du courant dans les circuits CC et des renseignements sur certains types de conditions anormales. Le transfert du métal est causé par le fonctionnement répété des contacts du disjoncteur dans les circuits CC. Le transfert se fait généralement dans la direction conventionnelle de la circulation du courant. Il est possible que le courant traverse le disjoncteur en sens inverse durant des conditions anormales, y compris les conditions résultant de la chaîne d'événements de l'accident, et peut se produire lors d'une rupture et de l'impact avec le sol. Ces situations ne doivent pas être négligées lors de l'examen des contacts du disjoncteur. Le transfert de matériaux peut ne pas être apparent lors que disjoncteur coupe des circuits de courant CC élevé.

- c) *Surintensité.* Les contacts d'un disjoncteur peuvent être endommagés par l'interruption de courants considérablement plus élevés que le courant nominal. Leur apparence peut indiquer une interruption en surintensité et indiquer des événements électriques anormaux. Les dommages par surintensité peuvent être causés par une défaillance d'équipement, des courts-circuits dans le câblage ou des connexions électriques accidentelles. N'importe lequel de ces événements peut se produire pendant un accident. Les défaillances de composants ou de câbles électriques peuvent causer des surintensités qui entraînent le déclenchement du disjoncteur. Le mécanisme de base résultant d'une surintensité est une formation d'arc prolongée, qui fait fondre et redistribue les matériaux des contacts. Les contacts ont une apparence « éclaboussée ». L'enquêteur doit toujours examiner tous les contacts d'un disjoncteur pour augmenter la fiabilité des constatations. Les contacts correspondants doivent être convenablement identifiés en indiquant leur emplacement et leur but dans le circuit. La plupart des disjoncteurs auront fonctionné pendant plusieurs cycles normaux avant un déclenchement par surintensité. Cet effet de vieillissement masquera les dommages causés par des surintensités plus récentes et compliquera l'analyse. Lorsque le vieillissement est un problème, l'enquêteur devra peut-être effectuer certains tests pour recréer les caractéristiques des dommages subis par le disjoncteur en cause.
- d) *Soudure des contacts.* Il arrive parfois que les contacts des disjoncteurs se soudent en position fermée, en raison généralement d'une défaillance interne massive du disjoncteur. Une soudure des contacts peut indiquer des problèmes de disjoncteur ou des courants de surcharge inhabituels. Elle peut aussi être causée par un mauvais alignement mécanique. Il peut en résulter une diminution de la zone de contact si les matériaux se solidifient avant que le disjoncteur ne s'ouvre et la défaillance se produit à la prochaine surintensité ou à la prochaine défaillance de l'équipement. La migration du métal peut joindre mécaniquement les contacts correspondants et les faire fonctionner comme des contacts soudés. Les contacts soudés sont très fragiles et peuvent être endommagés par les procédures de montage standard utilisées dans la préparation des échantillons métallographiques. Vérifier la soudure visuellement et par rayons X avant de retirer les contacts du disjoncteur.
- e) *Contamination.* La présence de contaminants à l'intérieur du disjoncteur peut augmenter la résistance des contacts en position fermée. Ils peuvent aussi entraîner la formation d'arcs entre les contacts et entraver le fonctionnement mécanique du disjoncteur. Les contaminants peuvent être repérés visuellement ou avec un SEM. Ils peuvent être identifiés à l'aide du SEM ou de la spectrographie infrarouge. Ils peuvent aussi avoir été piégés à l'intérieur du disjoncteur durant la fabrication. La contamination peut aussi être due à des arcs intenses qui peuvent brûler et déloger les matériaux du boîtier. S'ils sont conducteurs, ces corps étrangers peuvent causer des courts-circuits entre les contacts lorsque le disjoncteur est ouvert. S'ils ne sont pas conducteurs, les matériaux peuvent empêcher un bon contact électrique lorsque le disjoncteur est fermé. Ces matériaux peuvent aussi entraver le fonctionnement mécanique normal du disjoncteur. Les contaminants environnementaux, tels que la poussière, l'humidité et les agents de nettoyage peuvent entrer dans le disjoncteur si le boîtier n'est pas bien scellé ou s'il est endommagé durant l'installation.

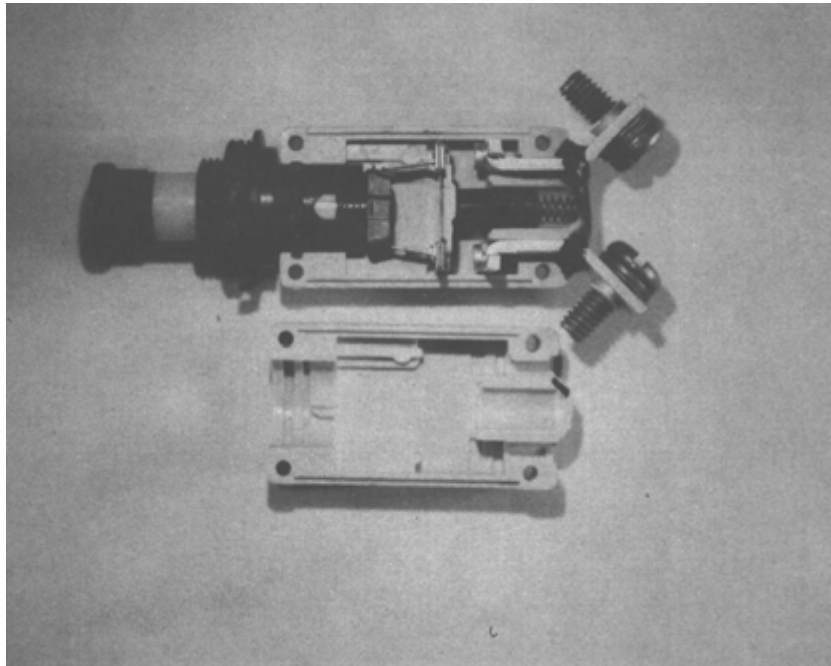


Figure III-13-4. Photo d'un disjoncteur de 10A, en position ouverte, fabriqué par Klixon, une division de Texas Instruments

- f) *Défaillance mécanique.* Même si elles sont moins courantes que les défaillances électriques, les défaillances mécaniques des disjoncteurs peuvent aussi se produire. Elles peuvent être dues à des anomalies de fabrication, à l'usure, à la corrosion ou à la présence de contaminants qui obstruent le mécanisme. Elles peuvent être causées par la corrosion du mécanisme interne du disjoncteur. La contamination interne et les défauts de fabrication peuvent aussi causer une défaillance mécanique. Les défaillances des éléments mécaniques ne sont pas fréquentes et doivent être vérifiées en testant d'autres disjoncteurs du même lot de fabrication. Un examen du disjoncteur aux rayons X avant de le démonter peut révéler d'éventuels problèmes mécaniques.

13.4 SYSTÈMES DE PRESSURISATION ET DE CLIMATISATION

Compresseurs

13.4.1 Ces appareils fournissent de l'air sous pression pour la climatisation et la pressurisation. Ils sont généralement entraînés par les commandes d'accessoires des moteurs de l'aéronef et peuvent être débranchés en vol en cas de dysfonctionnement ; ils ne peuvent être remis en marche qu'après l'arrêt complet des moteurs. Il faut examiner les compresseurs pour déterminer s'ils ont été débranchés ou si le mécanisme d'entraînement s'est brisé, si leur lubrification était correcte et s'il y a des traces de détérioration ou de surchauffe des paliers. Examiner les aubes pour déceler des dommages qui révéleraient que le compresseur fonctionnait au moment de l'accident.

Système de prélèvement d'air sur le compresseur des turbomachines

13.4.2 Des quantités contrôlées d'air sont prélevées sur la section du compresseur des turbomachines pour assurer la climatisation et la pressurisation ainsi que la protection contre le givrage et la pluie. Les groupes auxiliaires destinés essentiellement à fournir l'air pour la mise en marche des turbomachines peuvent également être utilisés pour contribuer à l'alimentation du circuit de climatisation surtout lorsque l'aéronef est au sol. Les robinets de commande de débit d'air, tels que les robinets d'arrêt ou les robinets coupe-feu, les robinets de distribution d'air, les manodétenteurs, les robinets d'interconnexion, les clapets de commande de température et les clapets anti-retour doivent être examinés pour déterminer la position de la glace de distribution et vérifier l'intégrité de leur raccordement aux canalisations correspondantes. Les positions des glaces de distribution des robinets doivent être comparées aux positions des commandes dans le poste de pilotage. Les soupapes de sûreté des prises d'air sur le compresseur doivent être retrouvées et examinées pour en vérifier l'intégrité. Il faut également retrouver les éléments de commande tels que les commutateurs de surchauffe et de surpression et les thermostats, et les mettre en lieu sûr en vue d'un examen ultérieur s'il y a lieu.

13.4.3 Si l'on soupçonne que la présence de vapeurs ou d'oxyde de carbone dans la cabine a contribué à l'accident, il faut examiner les gaines d'amenée d'air et particulièrement celles qui sont le plus près de la prise d'air sur le compresseur pour déceler les dépôts de suie et d'huile. Il faut aussi aviser les enquêteurs du Groupe des groupes motopropulseurs de la nécessité d'examiner les bagues d'étanchéité d'huile du moteur. Dans ce cas, il est également nécessaire de travailler en liaison avec le Groupe des facteurs humains.

Système de climatisation

13.4.4 Ce système comprend tous les robinets de commande de débit tels que le robinet mélangeur de la cabine, les robinets de distribution d'air, les vannes groupe et les vannes de régulation de température. Il comprend également les compresseurs, condenseurs et évaporateurs au fréon, les machines à détente d'air ou turbines de refroidissement, les turbocompresseurs, les décanteurs et les échangeurs de chaleur. Il faut noter toutes les positions des robinets et leur état, et établir la relation avec les positions des commandes dans le poste de pilotage. Les machines à détente d'air et les turbocompresseurs doivent être examinés pour déterminer s'ils fonctionnaient ou s'ils présentent des indices de dysfonctionnements. Il faut également examiner l'état des roulements et des rotors et s'assurer que la lubrification était convenable ; vérifier également les branchements des gaines sur ces appareils.

13.4.5 Les robinets de commande de débit sont généralement de deux types : ceux qui sont actionnés par un moteur électrique et ceux qui sont actionnés par un système pneumatique à commande électrique. En général, ce dernier type revient à la position fermée lorsqu'on coupe le courant. Il est important d'identifier ces différents types de robinets pour établir le rapport entre leurs positions et celles des commandes correspondantes dans le poste de pilotage. Il faut retrouver les différents éléments électriques des circuits de commande et d'avertissement tels que les thermocouples, les interrupteurs à mercure et les manocontacts, et il faut les identifier, les étiqueter et les mettre en lieu sûr au cas où un essai ou un examen détaillé serait nécessaire.

Pressurisation

13.4.6 Les éléments essentiels de ce système sont les commandes mécaniques et électriques, qui sont généralement montées dans le poste de pilotage et les armoires d'équipement électrique, ainsi que les valves de régulation de la pression, les soupapes de décharge et les vannes de dépressurisation d'urgence. Examiner ces éléments pour déterminer leur état et leur position, l'intégrité des liaisons mécaniques, les connexions électriques et les raccords des canalisations des sondes de pression. Rechercher les indices de dysfonctionnements, par exemple les soupapes grippées et les diaphragmes déchirés. Certaines valves de régulation de pression peuvent être fermées en cas d'urgence, par exemple lors de l'extinction d'un incendie dans un compartiment placé sous le plancher. La position des commandes de la valve peut permettre de déceler un cas de ce genre.

Gaines

13.4.7 Toutes les gaines doivent être retrouvées et examinées pour déterminer si elles ont éclaté sous l'effet d'une surpression ou d'une défectuosité des matériaux ; s'assurer de l'intégrité des brides d'assemblage des gaines. L'air chaud provenant d'une fuite ou d'une rupture d'un joint de gaine peut avoir un effet préjudiciable sur l'équipement, le câblage électrique ou les tuyauteries de fluides situés à proximité. Si le câblage a été chauffé, il peut se produire une instabilité de fonctionnement de certains éléments à commande électrique. Examiner l'intérieur des gaines pour déceler les traces de suie ou autres dépôts. Examiner l'isolant des gaines pour déceler les changements de couleur susceptibles d'indiquer un échauffement excessif ; s'assurer que l'isolant n'est pas imprégné de carburant ou de fluide hydraulique provenant de fuites de tuyauteries voisines de la gaine.

13.5 SYSTÈME DE PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE ET LA PLUIE

13.5.1 Ce système comprend l'équipement de dégivrage pneumatique et thermique, les essuie-glaces et les dispositifs antipluie.

Équipement de dégivrage pneumatique

13.5.2 Les anciens dispositifs de dégivrage de la voilure utilisent l'air du circuit pneumatique provenant des pompes à vide. Examiner l'état des boudins de dégivrage, les conduites d'amenée d'air et la position des valves de commande. Examiner l'accouplement d'entraînement de la pompe à vide ; s'assurer de l'intégrité du bouchon fusible et du fonctionnement éventuel de la pompe au moment de l'accident.

Équipement de dégivrage thermique

13.5.3 La protection thermique de la voilure contre le givrage est assurée par de l'air chaud fourni par des réchauffeurs à essence ou prélevé sur le compresseur des turbomachines. Dans le cas de réchauffeurs à combustion, s'assurer qu'ils ne sont pas percés par la flamme et qu'il n'y a pas de traces d'incendie provoqué par des fuites de carburant. Les circuits d'antigivrage alimentés par l'air du compresseur sont dotés de robinets de régulation de débit pour la voilure et pour l'empennage ; il convient de noter la position de ces robinets et de s'assurer qu'elle correspond au réglage des commandes dans le poste de pilotage. Les tuyauteries d'antigivrage de la voilure doivent être examinées pour déceler des traces de rupture, des joints desserrés qui auraient pu laisser l'air chaud s'écouler sur les faisceaux de câbles et des tuyauteries de liquide ou d'autres éléments dont le fonctionnement a pu être perturbé par un échauffement excessif. Dans certains cas, cet air chaud carbonise l'isolant des câbles électriques.

Essuie-glaces et dispositifs antipluie

13.5.4 Les essuie-glaces peuvent être à commande hydraulique ou électrique. Vérifier la position des bras et des commandes d'essuie-glaces ; dans certains cas, le dysfonctionnement des moteurs hydrauliques des essuie-glaces a provoqué dans le circuit une chute de pression qui a rendu impossible la sortie et le verrouillage du train d'atterrissage dans des cas d'urgence. Le dispositif antipluie peut être constitué par un jet d'air provenant du compresseur projeté sur le pare-brise ou par un produit chimique en aérosol. Les récipients contenant ce produit doivent être retrouvés et examinés pour voir s'ils n'ont pas éclaté en vol. Ils sont généralement placés dans le poste de pilotage et constituent donc un danger en cas d'éclatement, même si le produit n'est pas toxique.

13.6 INSTRUMENTS

Généralités

13.6.1 Il faut retrouver tous les instruments, noter leurs indications et leur état, et examiner leurs connexions. Les tuyaux souples des instruments fonctionnant par pression doivent être examinés pour déterminer s'ils présentent des traces de fuite ou des raccords défectueux. Les connexions électriques doivent être examinées pour rechercher les broches desserrées et les soudures défectueuses ; les faisceaux de câbles placés derrière les tableaux de bord doivent être examinés pour rechercher les courts-circuits, les traces de surchauffe et les isolants carbonisés. Les faisceaux retenus par des colliers doivent être examinés aux points situés sous les colliers, car c'est en ces points que se produit le plus fréquemment une usure de l'isolant.

13.6.2 Plusieurs méthodes peuvent être employées pour déterminer l'indication des instruments au moment de l'impact ou de la perte des signaux : 1) indications visuelles présentées, 2) examen microscopique du cadran et de l'aiguille du cadran pour repérer des marques d'impact, 3) examen interne des engrenages et des mécanismes pour repérer les marques d'impact ou de blocage sur une indication et 4) lecture électrique du synchro. Dans la mesure du possible, toutes ces méthodes doivent être employées pour vérifier les constatations. Les instruments sont très délicats et ils sont vulnérables aux forces d'impact et à la chaleur. Normalement, la précision de l'étalonnage ne peut pas être déterminée après un accident grave.

Peinture fluorescente et utilisation de dispositifs d'éclairage ultraviolet

13.6.3 La plupart des instruments des aéronefs modernes n'ont pas de cadrans ni d'aiguilles peintes avec une peinture fluorescente. Dans ces cas, l'éclairage ultraviolet (lumière noire) n'est pas très utile pour déterminer si l'aiguille est entrée en contact avec le cadran. Cependant, quelques instruments portent encore des marques fluorescentes jaunes et ils doivent être examinés sous la lumière noire pour déterminer si l'aiguille est entrée en contact avec le cadran.

Domages causés aux instruments par l'impact

13.6.4 Les renseignements suivants s'appliquent fondamentalement à tous les instruments de bord. La réaction des instruments aux forces d'impact varie selon la nature de l'impact. Les indications d'instruments les plus précises sont probablement celles qui sont relevées sur un aéronef ayant subi un fort impact frontal, suffisant pour détruire les instruments. Normalement, la validité de l'indication d'un instrument est proportionnelle aux dommages causés par l'impact. Les lectures les moins fiables sont probablement celles des aéronefs qui n'ont subi que de faibles forces d'impact ou qui ont subi des impacts multiples. Dans tous les cas, les instruments doivent être analysés et les constatations doivent être comparées aux conditions, connues ou soupçonnées, existant au moment de l'impact. La conception des instruments est telle que tant que le signal d'entrée est présent, les mécanismes internes offrent une résistance considérable aux changements résultant des forces d'impact. Normalement, si le facteur de charge est suffisant pour vaincre le couple des instruments et changer l'indication, il causera des dommages et le cadran ou le mécanisme interne témoigneront des conditions au moment de l'application des grandes forces g. Dans tous les cas, à l'exception des instruments qui utilisent un train d'engrenages ou d'autres dispositifs de retenue tels que les potentiomètres de réaction, l'aiguille peut se déplacer lorsqu'elle est heurtée par un corps étranger, mais la modification est infime. Si le signal d'entrée de certains instruments est perdu avant l'impact ou avant qu'il ne soit figé, l'instrument peut se remettre à l'état des conditions ambiantes ou à zéro, selon leur conception ; ce point est traité dans les sections appropriées.

Forces g sur les aiguilles

13.6.5 Si le signal d'entrée se perd avant qu'il ne soit figé dans des instruments qui n'utilisent pas d'engrenages mais qui conservent généralement leur dernière indication, les réactions peuvent être les suivantes. Si les forces g de l'impact s'exercent à angle droit avec l'indication de l'aiguille, celle-ci se déplace rarement de plus de 90°. Les forces exercées sous un autre angle réduisent le déplacement proportionnellement jusqu'à ce qu'il n'y a aucun changement,

c'est-à-dire lorsque la force est appliquée dans le plan de l'aiguille. Tout mouvement circulaire de l'indicateur autour de l'axe de l'aiguille peut considérablement modifier la position de l'aiguille. Les instruments munis d'engrenages ou d'un autre type de dispositif de retenue conservent normalement les conditions existantes lorsque le signal d'entrée est perdu. Les cadrans de la plupart des instruments sont peints en noir mat. Lorsque l'aiguille entre en contact avec le cadran, une marque luisante apparaît souvent sur la peinture. Normalement, la masse de l'aiguille n'est pas suffisante pour couper ou laisser une empreinte sur le cadran. Les aiguilles qui ont des contrepoids pour assurer l'équilibre peuvent laisser une empreinte lorsqu'elles heurtent le cadran. Il faut faire très attention lorsqu'une ombre complète de l'aiguille apparaît sur le cadran. Cette marque peut être le résultat d'une décoloration de la peinture par suite de l'exposition directe au soleil pendant que l'aéronef est stationné. Ces ombres sont souvent sur le zéro ou sur la valeur existant au moment de l'arrêt de l'aéronef.

Éraflures sur le cadran

13.6.6 La plupart des éraflures notées sur les cadrans sont causées par des éclats de verre. L'examen des cadrans révélera souvent une zone protégée des éclats de verre par l'aiguille. Si l'aiguille est trouvée, elle peut être positionnée à l'endroit où il est possible d'aligner les éraflures qui apparaissent sur le cadran et celles qui apparaissent sur l'aiguille. La position des marques laissées par le verre peuvent souvent indiquer la direction dans laquelle l'aiguille a été déplacée. L'examen du cadran sous grossissement permet souvent de voir l'endroit où le dos peint de l'aiguille a heurté le cadran avec une force suffisante pour laisser une trace de peinture sur le cadran mais non pour y laisser une éraflure visible.

Marques multiples laissées par les aiguilles

13.6.7 Si une aiguille laisse plusieurs marques d'impact, il faut déterminer laquelle a été laissée en premier. Examiner la marque luisante ou la marque d'impact laissée par le contrepoids. L'impact initial de l'aiguille est normalement plus prononcé et s'estompe dans la direction du déplacement. Certains instruments sont munis de ressorts et tendent à retourner à zéro sur perte du signal d'entrée. Si ce ressort produit un couple appréciable, il sera suffisant pour vaincre la force g. S'il y a plusieurs marques d'impact, la plus prononcée sera donc probablement la première. Certains cadrans sont fixés à l'aide de vis qui le traversent. Vérifier le dos de l'aiguille pour voir si elle est entrée en contact avec la tête de la vis. S'il y a une éraflure, l'aiguille est probablement passée sur la vis. L'absence d'éraflure ne signifie pas qu'elle ne soit pas passée sur la vis ; il se peut qu'elle n'ait pas été suffisamment déformée pour entrer en contact avec la tête de la vis.

Engrenages d'entraînement et synchros

13.6.8 L'intérieur des instruments qui ont subi des dommages d'impact considérables peut être examiné pour chercher des indices de marques de dents d'engrenage ou du mécanisme de fonctionnement. Les divers engrenages à l'intérieur de l'instrument ont été conçus de manière à ce que chaque dent corresponde à une certaine valeur numérique ou angulaire de l'information présentée. Comme ces dents s'engrènent étroitement, elles se séparent souvent en s'éraflant ou en se déformant. Il faut souvent les examiner sous grossissement pour détecter le point de désengrenage. Comme elles sont normalement emboîtées à un point qui correspond à une indication de l'aiguille par rapport à une butée inférieure ou supérieure, le mécanisme de l'instrument peut normalement être reconstitué pour montrer l'indication de l'aiguille au moment où l'engrenage s'est séparé. Il faut cependant faire attention car la mise en prise des engrenages a pu être décalée de quelques dents au moment de la révision de l'instrument, mais l'indication obtenue serait approximativement l'indication existant au moment du désengrenage. Si l'examen interne révèle que la position d'un synchro de sortie est figée, la corrélation des degrés angulaires avec la valeur appropriée indiquée dans le manuel de maintenance applicable pourrait donner une indication de la position du synchro de l'instrument. Lors de la mise sous tension du synchro de l'instrument, vérifier si l'engrenage ou l'arbre du synchro est figé afin d'éviter que le synchro d'essai n'entraîne le synchro de l'instrument. Lors du démontage d'un mécanisme capable de changer de position, identifier les différentes parties afin de pouvoir le remonter dans la position initiale exacte.

Système pitot-statique

13.6.9 Tous les aéronefs possèdent un système Pitot et un système de pression statique qui fournissent la pression à tous les instruments mécaniques indiquant la vitesse anémométrique, le nombre de Mach, l'altitude, la vitesse verticale, la tenue de Mach, la tenue d'altitude, etc. Cette pression est également requise pour la centrale aérodynamique et le pilote automatique. Le système pitot-statique peut être séparé, la pression pitot provenant du tube de Pitot et la pression statique arrivant aux prises statiques. Dans certains aéronefs la pression pitot et la pression statique sont mesurées par un tube pitot-statique combiné. Une inspection complète du système pitot-statique doit être effectuée. Si un tube de Pitot est bloqué par des corps étrangers ou par une accumulation de givre, toutes les indications de vitesse seront erronées. Si le tube est complètement bloqué, soit par l'aspiration d'un insecte ou par un nid construit dans l'ouverture, les indications de vitesse n'augmenteront pas et ne diminueront pas sauf en réponse à l'indication du système statique lors d'un changement d'altitude. Dans ce cas, une augmentation d'altitude se traduira par une lecture de vitesse légèrement supérieure et une diminution d'altitude se traduira par une lecture de vitesse inférieure. S'il se produit une fuite dans une zone pressurisée de la canalisation de pression pitot, l'anémomètre indiquera une vitesse supérieure à celle qui existe vraiment. Le seul cas où un dysfonctionnement du système pitot-statique peut causer une indication incorrecte de vitesse élevée est une fuite dans une zone pressurisée de la canalisation de pression pitot ou une obstruction complète de cette canalisation et une augmentation d'altitude. Si seule l'admission d'air du tube de Pitot est bloquée, la pression dynamique se perd normalement par l'orifice d'évacuation de l'humidité.

13.6.10 Il y a eu des cas où la prise statique était bloquée par le givre et où la condensation à l'intérieur du tube et des gouttelettes d'eau adhéraient aux prises statiques. Il s'est produit des cas aussi où des techniciens de maintenance ont recouvert les prises statiques de ruban adhésif pour faciliter les opérations de lavage ou de peinture et ont oublié d'enlever le ruban. Si une prise statique se bloque, la vitesse anémométrique indiquée sera lente et aucun changement d'altitude ou de vitesse verticale ne sera observé. Si une fuite se produit dans une zone pressurisée de la canalisation de pression statique, l'anémomètre indiquera une valeur inférieure à la valeur réelle, la vitesse verticale indiquera une descente et l'altimètre indiquera une altitude inférieure à l'altitude réelle.

13.6.11 Retrouver le plus grand nombre de parties possibles du système pitot-statique et vérifier s'il y a des connexions desserrées, des canalisations désaccouplées, des tubes mal évasés, des évasements fissurés, des serrages excessifs ou des obstructions qui auraient pu exister avant l'impact. À noter que les écrous de raccordement et les fixations sont souvent desserrés par suite de l'impact ou de la chaleur. Normalement si la fixation peut être resserrée d'un $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ tour supplémentaire, il faut soupçonner une fixation lâche et le système doit être complètement analysé. Il faut réserver le jugement final jusqu'à ce tous les faits concernant le système soient réunis et analysés.

13.6.12 Examiner également les canalisations du système pitot-statique pour déceler les ruptures ou les raccords desserrés. Dans certains cas, on a constaté que, par suite de l'emploi de techniques de pose ou de réparation incorrectes, les tubes présentaient un flambage ou une torsion à proximité d'un raccord. Examiner les tubes souples placés derrière les tableaux de bord et s'assurer qu'ils ne sont pas tordus ni percés par vieillissement. Noter également si le sélecteur de prise de pression statique est réglé sur la prise normale ou sur la prise auxiliaire

13.6.13 Examiner les tubes de Pitot pour déceler les obstructions et utiliser un ohmmètre pour vérifier l'intégrité de l'élément chauffant du tube. L'une des méthodes permettant de vérifier le fonctionnement du réchauffeur du tube de Pitot au moment de l'impact consiste à examiner les végétaux ou les matériaux ligneux qui se sont logés dans le tube au moment de l'impact. Si ces matériaux sont carbonisés ou ont changé de couleur sous l'effet de la chaleur, l'élément chauffant fonctionnait probablement.

Altimètres

13.6.14 Les altimètres indiquent habituellement l'altitude-pression du lieu de l'accident à moins qu'ils n'aient subi des dommages ou que l'indication n'ait été figée. Normalement, si l'impact est insuffisant pour le blocage, le secteur denté se sépare du pignon et l'aiguille donne une indication extrêmement élevée en raison de la précharge du ressort du mécanisme de l'aiguille.

13.6.15 Lors de l'analyse de l'altimètre standard à trois aiguilles, noter le calage barométrique et examiner le cadran pour voir s'il présente des marques d'impact d'aiguille. L'analyse de l'intérieur des altimètres consiste essentiellement à examiner l'engrenage pour rechercher la présence de dommages sur les dents d'engrenage et trouver la correspondance de cette position endommagée sur un altimètre semblable en état de fonctionnement.

13.6.16 L'analyse d'un altimètre à compteur et aiguille consiste à examiner le cadran pour y rechercher une marque d'impact de l'aiguille des centaines de pieds (100 ft), la position du compteur numérique des milliers de pieds (1 000 ft) et le calage barométrique.

13.6.17 L'analyse du compteur à tambour et aiguille consiste à examiner le cadran pour y rechercher un marque d'impact de l'aiguille des 100 ft, la position des compteurs des 100, 1 000 ou 10 000 ft, le calage barométrique, la position du sélecteur de fonction et la position du mot « standby ». Si le mot « standby » était visible avant l'impact, l'altimètre fonctionnait directement à partir du système statique. Si ce mot n'est pas visible, l'altimètre reçoit son signal d'un transducteur altimétrique et il est présenté électriquement sur le cadran. Les indications notées sont celles qui existaient au moment de la perte de l'alimentation ou du signal électrique. Comme le mot « standby » n'est pas visible en présence d'alimentation électrique, il devient visible s'il y a perte du signal électrique à moins qu'il n'y ait blocage.

13.6.18 Il faut être prudent lors de l'évaluation des altimètres mécaniques qui ont été exposés au feu sans subir de dommages d'impact. La capsule intérieure se dilate sous l'effet de la chaleur et les indications augmentent en conséquence. Des altimètres retrouvés sur les lieux de l'accident indiquaient jusqu'à 100 000 ft en raison de ce phénomène.

Anémomètres

13.6.19 L'anémomètre indique généralement la vitesse de l'aéronef jusqu'à une valeur de zéro à moins qu'il n'ait subi des dommages ou que l'indication n'ait été figée. La vitesse notée ne peut être que celle qui existait au moment où l'instrument s'est bloqué sur l'indication et peut être le minimum indiqué au moment de la rupture. Une manœuvre inhabituelle ou exagérée de l'aéronef avant l'impact peut modifier les indications de l'anémomètre.

13.6.20 Dans le cas des anémomètres à une aiguille, examiner le cadran pour déterminer si l'aiguille a laissé des marques d'impact sur le cadran et examiner l'intérieur de l'instrument pour voir s'il y a des marques d'impact sur le secteur denté et le pignon. L'analyse de l'aiguille, du tambour et de l'indicateur de vitesse maximale admissible doit comprendre l'examen du cadran pour voir si l'aiguille d'indication de la vitesse ou de la vitesse maximale admissible est entrée en contact avec le cadran et si l'indicateur de mach maximal admissible est correctement réglé. Examiner la partie exposée du tambour pour voir si elle est figée, ou si elle est éraflée ou pliée. Examiner l'intérieur du tambour pour déceler des marques d'impact causées par la grande proximité de l'aimant amortisseur et le contrepoids de la capsule. Vérifier l'engrenage denté, la roue plate et le pignon pour voir si les dents sont endommagées, ce qui pourrait indiquer la position de l'engrenage au moment de la séparation. Établir la correspondance entre la zone endommagée et la même zone sur un engrenage en bon état.

13.6.21 L'anémomètre-machmètre indique la vitesse et le nombre de Mach ; la vitesse est indiquée par une double aiguille en pointe de flèche sur une échelle fixe tandis que le nombre de Mach tourne au-dessous de l'aiguille. Examiner le cadran pour voir s'il y a des marques laissées par l'aiguille. Certains anémomètres-machmètres ont un indicateur circulaire avec une ouverture en secteur et une aiguille comportant deux pointes. Examiner le cadran pour voir si des

marques ont été laissées par le verre cassé ou un autre matériau provenant de l'impact, laissant une zone non endommagée sauf pour l'ouverture en secteur. Examiner l'engrenage denté et le pignon pour déterminer s'ils présentent des marques d'impact.

13.6.22 Certains aéronefs ont des indicateurs de vitesse qui donnent une lecture numérique de la vitesse sol et de la vitesse vraie. Ces indicateurs sont normalement entraînés par engrenage et leur position n'est pas modifiée par l'impact. Si la partie visible du cadran est illisible, marquer les chiffres pour référence et démonter le mécanisme jusqu'au point nécessaire pour lire les chiffres non endommagés et déduire les chiffres qui étaient présentés sur la partie visible. Les chiffres présentés étaient ceux qui étaient indiqués au moment de la perte de l'alimentation électrique.

Variomètres

13.6.23 L'analyse des variomètres (VSI) consiste à examiner le cadran pour voir s'il y a des marques d'impact laissées par l'aiguille et à faire un examen interne du secteur denté et du pignon pour trouver des traces d'impact sur les dents de l'engrenage. Le variomètre possède un temporisateur intégré et peut ne pas suivre l'aéronef en cas de changements brusques.

Compas

13.6.24 Déterminer les indications fournies par les indicateurs de cap, tels que le compas magnétique, l'indicateur-directeur de cap (CDI), l'indicateur radiomagnétique (RMI), le compas gyroscopique et le gyroscope directionnel à commande pneumatique. Noter le cap choisi et la position de l'index. Certains de ces appareils comprennent des gyroscopes incorporés tandis que d'autres sont commandés par des gyroscopes directionnels montés à distance. Examiner les gyroscopes pour déterminer s'ils fonctionnaient. Démonter l'appareil et rechercher sur le rotor et sur l'intérieur du carter du rotor des rayures provoquées par la rotation au moment où les pièces sont entrées en contact lors de l'accident. Étudier les indications des instruments par rapport au cap de l'aéronef au moment de l'impact. Les indications peuvent ne pas correspondre et, dans ce cas, il se peut que le compas ait cessé de fonctionner un certain temps avant l'accident. Cette anomalie peut également être provoquée par des dommages subis au cours de l'impact. Tous ces cas doivent être envisagés.

13.6.25 Certains instruments tels que le CDI sont équipés d'indicateurs de distance placés sur l'un des bords de l'instrument, alors que l'avion est parfois équipé d'un autre indicateur de distance monté sur le tableau de bord. Vérifier les indications de distance par rapport à la distance entre le lieu de l'accident et l'installation choisie. Les indicateurs VOR peuvent parfois fournir des renseignements sur le relèvement de l'avion par rapport à un VOR donné. Les mêmes renseignements peuvent aussi être fournis par les aiguilles du RMI. Ces aiguilles peuvent être utilisées aussi bien pour les relèvements sur VOR et sur radiogoniomètre automatique (ADF), la sélection s'effectuant au moyen de commutateurs montés sur le tableau de bord. Déterminer le mode de fonctionnement choisi et établir la corrélation avec l'installation choisie.

13.6.26 Examiner le compas magnétique pour déceler s'il était en état avant l'accident, par exemple, s'il y avait suffisamment de liquide ; s'assurer également que l'installation était correcte. Il faut vérifier si la carte de correction du compas est à jour et ne pas oublier que le fonctionnement du compas peut être perturbé par la présence de métaux ferreux à proximité immédiate.

Indicateurs d'assiette

13.6.27 Il y a fondamentalement quatre types d'indicateurs d'assiette utilisés actuellement. Le plus simple, tant du point de vue de la construction que de la présentation des indications, est le type J-8. Il s'agit d'un dispositif autonome ne donnant que les informations de roulis et de tangage. L'indicateur le plus perfectionné est un indicateur directeur d'assiette à trois axes qui reçoit les données de divers systèmes pour représenter le roulis, le tangage, le cap, la pente

de descente, le virage et la glissade, l'inclinaison longitudinale et latérale, l'écart d'alignement de descente et les avertissements correspondants. Quelle que soit la complexité des indicateurs, la logique et les techniques d'analyse des instruments sont les mêmes. Les renseignements obtenus sont normalement les conditions existantes au moment de la perte du signal ou de l'alimentation électrique ou au moment où l'instrument s'est figé. Les exceptions à cette règle sont les indicateurs autonomes de type J-8 et certains indicateurs miniature de secours. Ces indicateurs autonomes peuvent représenter l'assiette des instruments après la perte de l'alimentation électrique en raison de l'inertie gyroscopique qui continue à repositionner les indications.

13.6.28 Il est souvent possible d'obtenir des renseignements utiles des indicateurs d'assiette quelle que soit l'étendue des dommages. Le mécanisme interne de la plupart des indicateurs contient des engrenages à rapport élevé pour indiquer l'information de roulis et de tangage. La sphère peut se déplacer durant l'impact lorsqu'elle est heurtée par un corps étranger s'il y a perte du signal électrique et qu'elle ne s'est pas figée. L'expérience montre que ce mouvement causé par des corps étrangers est relativement mineur et que la quantité de mouvement peut être déterminée par l'analyse des dommages d'impact.

13.6.29 L'analyse des indicateurs consiste à examiner le cadran (la sphère) pour déterminer si la maquette avion a heurté la sphère, si l'indicateur d'inclinaison latérale est entré en contact avec l'échelle d'inclinaison latérale, si la barre directrice de roulis et de tangage a heurté la sphère ou si l'indicateur de pente de descente est entré en contact avec la cache, et pour déterminer les positions des drapeaux d'avertissement. Une fois démontée, examiner la sphère pour déterminer si la cache, les vis de fixation, le cadre de roulis, les vis de montage du cadre ou le mécanisme d'entraînement du cadre de roulis sont entrés en contact avec la sphère. Lorsque les marques d'impact sont bien alignées, il est normalement possible de déduire les indications qui existaient au moment de l'impact. L'examen de l'engrenage du cadre de roulis présente souvent des dommages suffisants pour permettre la reconstitution du roulis indiqué au moment de l'impact.

13.6.30 Les barres directrices de pente de descente, d'inclinaison latérale et d'inclinaison longitudinale sont normalement des mouvements d'Arsonval ; elles sont donc capables de changer de position avec seulement un léger mouvement sur perte du signal électrique. La position des aiguilles dans ce type de mouvement ne signifie rien à moins que l'avion ne subisse un impact avec rupture instantanée. Durant l'examen interne, le câblage et les circuits électroniques doivent être examinés pour voir s'il y a des fils brisés, des connexions desserrées, des surcharges électriques et des défaillances évidentes de résistances, transistors, bobines, condensateurs, etc. Si on ne dispose pas du cadran, on peut trouver le centre approximatif du cadran en tirant des élastiques entre les trous de montage de l'instrument ou, s'ils n'y sont plus, entre les quatre coins de la bride de fixation et du support du cadre de roulis. Veiller à ce que les lignes formées par les élastiques ne soient pas faussées. Si l'alimentation électrique n'est pas perdue à l'impact, les gyroscopes montés à distance peuvent tomber et entraîner une mauvaise indication d'assiette. La nature de l'impact doit être prise en compte avant que l'assiette de l'aéronef ne puisse être déterminée de manière définitive.

Indicateurs de virage et de glissade

13.6.31 Quelques indicateurs de virage et de glissade utilisés dans l'aviation générale fonctionnent à dépression, mais la plupart de ces indicateurs fonctionnent électriquement. Cet indicateur comprend un gyroscope autonome capable de fonctionner durant plusieurs secondes après une perte d'alimentation. À moins qu'il n'ait été établi que l'aéronef a subi un impact très violent, il est probable que les indications notées ne représentent pas les conditions existantes au moment de l'impact. Par contre, si l'impact est confirmé, le cadran de l'indicateur de virage et de glissade doit être analysé pour voir s'il y a des marques laissées par l'aiguille de virage. Il faut démonter l'indicateur pour déterminer si le rotor du gyroscope présente des rainures causées par la rotation et si le cardan du gyroscope est figé ou s'il présente des indices d'impact. Les conditions notées peuvent être reproduites sur un indicateur similaire et la vitesse angulaire de virage peut être déterminée. Très peu de renseignements peuvent être obtenus de l'inclinomètre, parfois appelé indicateur de glissade, pour indiquer l'angle de glissade de l'aéronef pendant un virage.

Indicateurs d'angle d'attaque

13.6.32 Les types les plus communs de capteurs d'angle d'attaque, ou capteurs d'incidence, sont la girouette et la sonde. Le capteur de type girouette a un profil d'aile et s'aligne sur le vent relatif. Le type sonde détecte le vent relatif au moyen de la pression différentielle de l'air passant par une série d'orifices ou de fentes à l'avant de la sonde. Quand le capteur s'aligne avec le vent relatif, un signal électrique est transmis à l'indicateur du poste de pilotage, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un convertisseur de données aérodynamiques. Le transmetteur du type girouette est probablement plus susceptible d'être modifié à l'impact vu que ce capteur fait saillie dans le flux d'air et peut être facilement déplacé lorsqu'il est heurté par des objets. Si l'impact est suffisant pour figer la position de la girouette sans la déplacer, la position relative peut être déterminée en mesurant les degrés angulaires de la sortie du synchro et en les mettant en correspondance avec les unités indiquées dans le manuel de maintenance applicable. Le type sonde n'est pas aussi sensible aux changements à la suite d'un impact. Le transmetteur interne est constitué d'un potentiomètre et d'un petit engrenage. La position du curseur du potentiomètre peut être mesurée et la lecture de la résistance peut être corrélée avec les unités d'angle d'attaque conformément aux instructions données dans le manuel de maintenance approprié. L'analyse des indicateurs d'angle d'attaque consiste à examiner le cadran pour déterminer si l'aiguille a laissé des marques sur le cadran et la position des index ajustables de montée, de croisière et de décrochage. L'examen interne consiste à déterminer la position du potentiomètre de réaction et de corrélérer la résistance relevée avec les unités indiquées dans le manuel de révision applicable. Il en va de même pour l'indicateur du synchro-répétiteur sauf que les degrés angulaires du synchro doivent être mesurés à l'aide d'un synchro-testeur et corrélés avec ceux des girouettes spécifiés dans le manuel applicable.

13.6.33 Vu que le lacet de l'aéronef peut avoir une incidence sur l'angle d'attaque, la plupart des aéronefs modernes sont munis de capteurs des deux côtés. Ces capteurs évaluent non seulement l'angle d'attaque mais aussi les différences entre les deux de manière à afficher la meilleure valeur possible de l'angle d'attaque vrai. Sur les aéronefs équipés d'un seul capteur, ou s'il y a deux capteurs indépendants possédant chacun son indicateur, les enquêteurs doivent évaluer d'autres indices avant d'accepter les renseignements sur l'angle d'attaque.

Radioaltimètre

13.6.34 Cet indicateur est normalement constitué d'un moteur synchro qui commande une aiguille par l'intermédiaire d'une petite chaîne d'entraînement. Lorsqu'un petit engrenage est employé, l'aiguille est difficilement déplacée par les forces d'impact. Examiner le cadran pour voir si l'aiguille a laissé des marques d'impact. Mesurer les degrés angulaires du synchro et les corrélérer avec l'altitude conformément au manuel applicable. La lecture notée devrait être l'altitude au-dessus du terrain au moment de la perte de l'alimentation ou au moment où l'instrument s'est figé. Vérifier le voyant d'avertissement de basse altitude et la position du drapeau « Off ». Ce drapeau est visible lorsque le système ne fonctionne pas ou en cas de perte d'alimentation électrique.

Systèmes intégrés de vol aux instruments (IFIS)

13.6.35 Le système IFIS comprend un directeur de vol et des instruments à échelle verticale. Le directeur de vol comprend un calculateur de directeur de vol, un indicateur directeur d'assiette (ADI) et un indicateur de situation horizontale (HSI). Les instruments à échelle verticale comprennent un anémo-machmètre (AMI) et un altimètre-variomètre (AVVI).

Calculateur de directeur de vol

13.6.36 Le calculateur de directeur de vol reçoit les données de navigation du système de navigation et les données d'assiette du gyroscope d'assiette. Les fonctions du calculateur varient selon les systèmes et le nombre de données d'entrée telles que celles des aides de navigation, de la liaison de données, de la navigation par inertie, du système doppler, etc., qui peuvent être traitées électroniquement par le système. Consulter les données techniques

applicables pour obtenir des renseignements sur le système sous enquête. Le calculateur de directeur de vol est fondamentalement électronique et très peu de renseignements peuvent en être tirés. Si les dommages d'impact sont mineurs, le fonctionnement du dispositif devrait être vérifié. Il faut vérifier l'intérieur de l'équipement endommagé pour déterminer s'il y a eu surchauffe électrique, si les joints soudés présentent des problèmes, s'il y a des connexions brisées, etc.

Indicateur directeur d'assiette (ADI)

13.6.37 L'ADI comprend un indicateur d'assiette, un indicateur de virage et de glissade, un indicateur d'alignement de descente, des barres directrices d'inclinaison longitudinale et latérale, un drapeau d'avertissement d'altitude, un drapeau d'avertissement d'alignement de descente et un drapeau d'avertissement de déviation de cap. L'analyse de cet indicateur est traitée sous la rubrique *Indicateurs d'assiette* (§ 13.6.27 à 13.6.30).

Indicateur de situation horizontale (HSI)

13.6.38 L'indicateur de situation horizontale combine un indicateur de cap, un indicateur radiomagnétique, un indicateur de direction et un indicateur de distance. Le cap de l'aéronef s'affiche sur la rose tournante du compas sous la ligne de foi supérieure. L'aiguille de relèvement indique le relèvement magnétique de l'aéronef par rapport à une station sol sélectionnée (VOR, TACAN ou ADF) ou à un point de référence au sol (actuellement le GPS, mais auparavant l'INS ou le LORAN). La maquette avion fixe et l'indicateur de déviation affichent la position relative de l'aéronef par rapport à la direction choisie telle qu'elle est indiquée par l'afficheur numérique de direction et la flèche de direction. Lorsque le VOR ou le TACAN sont indiqués, chaque point sur l'échelle de déviation indique une déviation de 5° dans la plupart des aéronefs. Lorsqu'ils sont utilisés avec l'ILS, chaque point représente, selon le système, une déviation d'environ 1¼°. L'indicateur de distance affiche la distance oblique en milles marins par rapport à la station TACAN ou DME choisie. Certaines installations sont conçues de manière à aussi afficher ces informations lorsque le mode ILS est sélectionné. Lorsqu'un autre mode est employé (navigation par inertie, GPS, etc.), le manuel technique applicable doit être consulté pour déterminer la fonction de chaque élément.

13.6.39 Le bouton du sélecteur de direction est utilisé pour choisir une direction parmi 360 directions. Lorsque la direction désirée est choisie, la fenêtre du sélecteur donne une lecture numérique de la direction choisie et la flèche pointe vers la direction choisie. L'indicateur TO-FROM a la forme d'un petit triangle. Lorsque l'indicateur pointe vers la tête de la flèche, la direction choisie a été interceptée et est suivie par l'aéronef. Le bouton du sélecteur de cap est utilisé pour positionner le curseur de cap sur le cap choisi. Lorsque le mode voulu est sélectionné sur le tableau de commande du directeur de vol, le curseur de cap peut être asservi au calculateur de directeur de vol. Lorsque le cap est réglé, la barre directrice d'inclinaison latérale commande l'assiette latérale requise pour suivre et maintenir le cap choisi.

13.6.40 La rose tournante du compas est entraînée par un engrenage et devrait conserver le cap existant au moment de la perte d'alimentation électrique ou au moment où l'indication s'est figée. La direction indiquée dans la fenêtre numérique doit être notée et comparée à la position de la flèche indiquant la direction.

13.6.41 Examiner l'indicateur de distance et noter la distance par rapport à la station TACAN ou DME. L'examen interne doit comprendre une inspection générale du circuit électrique pour voir s'il y a eu surchauffe, un court-circuit, des connexions brisées, etc. Si la rose du compas est absente, les engrenages doivent être examinés pour voir si les dents d'engrenage ont été endommagées. L'Indication de cap peut souvent être déterminée avec une petite reconstitution en utilisant les dommages observés comme référence.

Anémo-machmètre

13.6.42 L'anémo-machmètre présente les informations sur un indicateur vertical à bande. Les pressions différentielles sont traitées par un calculateur de données aérodynamiques qui convertit la pression d'entrée mesurée en signaux électriques, qui commandent les afficheurs verticaux. Des drapeaux d'avertissement apparaissent sur les échelles de l'indicateur lorsque l'alimentation électrique est coupée ou lorsque les données provenant du calculateur ne sont pas fiables.

- a) *Anémomètre*. L'anémomètre présente une vitesse corrigée sur une échelle à bande mobile qui se déplace par rapport à une ligne d'index fixe. Le sélecteur de directive de vitesse permet de régler manuellement le curseur de directive de vitesse. La valeur sélectionnée est affichée dans la fenêtre de lecture numérique de la directive de vitesse. Le curseur est entraîné par la bande. Lorsque le curseur est aligné sur la ligne d'index fixe, il indique que la vitesse choisie est atteinte et qu'elle est maintenue. Lorsque le curseur est au-dessus de la ligne d'index fixe, la vitesse choisie a été dépassée et l'inverse lorsqu'il est au-dessous. Lorsque le sélecteur est placé dans le cran latéral, le curseur s'aligne et se maintient sur la ligne d'index fixe, ce qui permet l'affichage continu de la vitesse, à un nœud près, dans la fenêtre de lecture numérique de la vitesse. Lorsque le sélecteur est dans le cran latéral, la fonction de commande est désactivée et le curseur de directive de vitesse reste sur la ligne d'index fixe.
- b) *Machmètre*. Cet indicateur est semblable à celui de l'anémomètre, sauf qu'il indique le nombre de Mach. Il ne comporte pas de sélecteur de directive de Mach. Le curseur de directive de Mach est réglé et présenté dans la fenêtre de lecture numérique de directive de Mach. Le curseur de nombre de Mach maximal admissible est préréglé à la valeur maximale pour l'aéronef. Lorsque l'aéronef atteint le maximum admissible, le curseur s'aligne sur la ligne d'index fixe.
- c) *Indicateur d'angle d'attaque*. L'indicateur d'angle d'attaque est une échelle comportant des symboles, des unités ou des degrés. Les indicateurs qui utilisent les symboles ont un symbole de vitesse minimale de sécurité qui indique l'avertissement de décrochage, un symbole d'approche finale qui indique les angles d'atterrissage et d'arrondi et un symbole d'angle d'attaque zéro. D'autres instruments indiquent une marge positive et négative de l'angle d'attaque. Certaines versions comprennent un accéléromètre à bande et un affichage numérique d'accélération.

13.6.43 L'analyse de l'anémo-machmètre peut fournir de précieux renseignements dans une enquête sur un accident. Ces bandes conservent l'information présentée en cas de perte de l'alimentation électrique. Si la face de l'indicateur a été considérablement endommagée, l'indicateur doit être convenablement indexé et démonté. La bande peut être intacte à l'intérieur. Les positions des bandes doivent être reproduites sur un instrument analogue pour obtenir l'indication exacte qui était présentée ou pour déduire approximativement ces informations.

Altimètre-variomètre (AVVI)

13.6.44 L'AVVI indique l'altitude et la vitesse verticale au moyen d'une bande verticale mobile. Certains AVVI indiquent aussi l'altitude brute, l'altitude cabine et l'altitude cible. Les signaux électriques pour changer les indications sont reçus du calculateur de données aérodynamiques. Si l'information présentée n'est pas fiable ou s'il y a coupure de l'alimentation électrique, un drapeau d'avertissement apparaît. Cet instrument contient une échelle mobile de vitesse verticale, un index de vitesse verticale, une échelle d'altitude, un drapeau d'avertissement d'altitude, une échelle fixe de vitesse verticale, une ligne d'index fixe, un curseur d'altitude cible, une échelle d'altitude brute, un curseur de directive d'altitude, un curseur d'altitude brute, une échelle mobile de vitesse verticale, un curseur d'altitude cabine, un fenêtre d'affichage numérique de l'altitude cible, une fenêtre d'affichage numérique de directive d'altitude, une fenêtre d'affichage de la pression barométrique, un sélecteur de directive d'altitude et un bouton de réglage de la pression barométrique.

- a) *Altimètre*. L'altitude corrigée est indiquée sur une échelle à bande mobile qui se déplace par rapport à une ligne d'index fixe. Certaines échelles portent une indication numérique aux milliers de pieds et l'espace entre les milliers est divisé en 10 unités égales. Des indicateurs plus récents ont des échelles séparées pour les milliers et les centaines de pieds afin de présenter l'information de manière plus précise. Le calage barométrique est une fenêtre d'affichage numérique. Un sélecteur de directive d'altitude permet de régler manuellement le curseur de directive d'altitude. Le curseur de directive d'altitude glisse sur la bande et lorsqu'il est aligné sur la ligne d'index fixe, il indique que l'altitude choisie est atteinte et qu'elle est maintenue. Certains indicateurs sont munis d'un sélecteur avec un cran latéral.

Lorsque ce sélecteur est actionné, le curseur de directive d'altitude s'aligne et se maintient sur la ligne d'index fixe et la fenêtre de lecture numérique affiche l'altitude de manière continue.

- b) *Variomètre*. Un curseur de vitesse verticale indique la vitesse ascensionnelle ou descensionnelle par rapport à une échelle à bande fixe. Lorsque les limites sont atteintes, le curseur devient fixe et le changement de vitesse verticale est indiqué par rapport à une échelle à bande mobile. L'analyse du variomètre est la même que celle de l'anémo-machmètre, c'est-à-dire que les bandes conservent les indications existant au moment de la perte du signal électrique. S'il est impossible de voir la partie visible de la bande, démonter l'indicateur jusqu'à ce qu'il soit possible de voir la partie intacte ou lisible de la bande, et déduire les valeurs qui y étaient présentées.

Système d'instruments de vol électroniques (EFIS)

13.6.45 La plupart des avions actuels présentent les informations à l'équipage sur des écrans plats ou des indicateurs multifonctions affichés sur un écran. Les données présentées sur les écrans sont produites par les mêmes types d'appareils que ceux qui sont utilisés par les systèmes d'instruments plus classiques, mais elles sont affichées sur des écrans. Un avion disposant de plusieurs écrans peut adapter l'agencement des instruments selon les préférences du pilote ou la politique de l'organisation. Cependant, comme les écrans sont des représentations dynamiques des données, une fois que l'alimentation électrique est perdue, tous les affichages disparaissent. Aucun mécanisme ne permet d'obtenir des indices sur les conditions existantes au moment de l'impact.

13.6.46 La même technologie qui produit les images pour l'EFIS a conduit à l'utilisation de mémoires non volatiles dans les composants générateurs d'images. C'est vers ces puces mémoires que les enquêteurs doivent se tourner pour trouver des indices (voir le § 13.15 et le Chapitre 7 pour les renseignements sur la récupération des données de mémoires non volatiles).

Instruments de moteurs

13.6.47 Il est extrêmement important, dans toutes les enquêtes sur les accidents, de déterminer les performances réelles des moteurs des avions. Une bonne analyse des instruments peut très souvent donner des indices sur les conditions de fonctionnement des moteurs au moment de l'impact ou de la perte du signal d'entrée, ce qui est particulièrement vrai en cas d'impact très violent. La plupart des instruments des moteurs sont des répéteurs des transmetteurs des instruments et n'utilisent aucun engrenage. Dans ce cas, les indications des instruments peuvent changer durant l'impact si l'alimentation électrique est coupée et qu'elles n'ont pas été figées. Certains indicateurs sont remis au zéro mécanique ou aux valeurs des conditions ambiantes sur perte de l'alimentation électrique, à moins qu'ils ne soient figés. Tous ces éléments doivent être pris en compte durant l'analyse des instruments. Les transmetteurs des instruments doivent aussi être retrouvés et analysés pour déterminer la position de différents engrenages et des mécanismes d'actionnement au moment de l'impact.

Tachymètres

13.6.48 Les indicateurs tachymétriques reçoivent leur signal électrique de la génératrice tachymétrique et fonctionnent indépendamment du système électrique de l'avion. Ils sont généralement munis d'un ressort et retournent extrêmement rapidement à la position zéro sur perte du signal d'entrée à moins qu'ils ne soient figés. Cependant, ces indicateurs sont très délicats et l'impact cause souvent le blocage de l'engrenage principal et des engrenages vernier. L'examen du cadran révèle souvent des traces laissées par le contact de l'aiguille ou du contrepoids de l'aiguille sur le cadran. L'analyse interne consiste à examiner les engrenages pour déterminer s'ils sont figés et l'emplacement de la butée mécanique de l'aiguille principale. La position de la butée mécanique doit être marquée et le mécanisme de l'aiguille principale tourné jusqu'à la butée pour déterminer si l'aiguille a glissé sur son axe. Si l'aiguille manque, la butée mécanique peut être utilisée comme référence de l'aiguille, c'est-à-dire si la butée est

atteinte, l'aiguille est normalement juste au-dessous de 0 % du régime. Certains tachymètres utilisent deux aiguilles. L'une d'entre elles présente le pourcentage du régime de 0 à 50 %. Lorsqu'elle atteint 50 %, elle entraîne une autre aiguille plus grosse qui donne les indications de 50 à 110 %. Lors de l'examen de l'intérieur du tachymètre, noter la position relative du mécanisme d'entraînement par rapport à une position connue, par exemple 50 %, pour déterminer si l'aiguille a glissé sur son axe. Si les aiguilles manquent, une d'elles peut être réinstallée au point d'entraînement de 50 % puis remise à la position retrouvée et le pourcentage de régime lu directement sur le cadran. Vu que les tachymètres ont un ressort de rappel qui les remettent à la position zéro et que le moment exact où la position a été figée est inconnu, la lecture obtenue doit être considérée comme le régime minimal au moment de l'impact.

Rapport de pression moteur (EPR)

13.6.49 Le système EPR détermine le rapport entre la pression d'admission et la pression d'éjection du moteur ; cette valeur est le facteur de puissance du moteur. Tous les indicateurs de rapport de pression sont fondamentalement conçus de la même manière, c'est-à-dire des synchro répéteurs n'utilisant qu'un petit ou aucun engrenage. Leurs indications doivent être déterminées d'après les renseignements donnés plus haut sur les indicateurs de synchro répéteurs. Certains indicateurs EPR ont des fenêtres de lecture numérique pour les valeurs cibles de croisière et de décollage et sont réglés manuellement par l'équipage. Ces indications ne sont pas directement liées aux indications EPR. Un type utilise un circuit de rétroaction de condensateur et l'autre un pivot et vérin à vis pour positionner le transmetteur de réaction.

13.6.50 Le mécanisme interne des deux types utilise des trains d'engrenage. Si l'impact est violent, le condensateur entre souvent en contact avec le support de la base. La position de contact peut être notée et simulée en atelier sur un transducteur en état de fonctionnement et on peut lire l'EPR directement sur l'indicateur de l'atelier. S'il n'y a pas de dommages, la position du condensateur peut donner une indication EPR plus élevée sur perte du signal électrique à cause de la tension du ressort dans cette direction. Il faut prendre soin dans ce domaine de déterminer si le mécanisme interne est libre et capable de changer. Le transducteur utilisant le mécanisme pivot et vérin à vis conserve les indications existantes au moment de la perte du signal électrique. Il est presque impossible que l'impact modifie la position du pivot sur le vérin à vis. Il convient de noter cette position et de la reconstituer en atelier avec un dispositif en état de fonctionnement et lire l'indication directement sur l'indicateur EPR de l'atelier.

13.6.51 Vu que l'EPR est une fonction du rapport entre la pression d'admission et la pression d'éjection (P_t), toute obstruction présente au détecteur de pression d'admission ou d'éjection (semblable à un tube de Pitot) modifiera les indications en conséquence, mais le système EPR requiert une alimentation électrique. Examiner le détecteur de pression pour déterminer s'il est obstrué ou déformé. L'obstruction du détecteur de pression d'admission augmentera l'indication EPR tandis qu'une obstruction du détecteur de pression d'éjection diminuera l'indication EPR. L'écrasement d'un Boeing 737 d'Air Florida au décollage de l'aéroport Washington National, à Washington (D.C.) en 1982 a été attribué en partie au fait que le détecteur EPR d'admission était bloqué par le givre accumulé pendant les opérations au sol. L'équipage s'est fié à l'EPR, qui donnait une indication élevée, mais erronée, et a décollé avec moins de la moitié de la puissance disponible.

Système d'indication de débit carburant

13.6.52 Le système d'indication de débit carburant comprend un indicateur de débit carburant, un transmetteur et normalement une source d'alimentation de 26 VCA. Les indicateurs sont des synchro-répéteurs. Certains utilisent des engrenages et d'autres non. L'analyse des synchro-répéteurs qui n'utilisent pas d'engrenages consiste à examiner le cadran pour déterminer si l'aiguille a laissé des marques d'impact sur le cadran et la position électrique du synchro. Les possibilités que les indications soient modifiées par l'impact sont les mêmes que celles des autres synchro-répéteurs indiquées plus haut. Les indicateurs utilisant des engrenages devraient conserver les indications qui existaient au moment de la perte de l'alimentation électrique.

13.6.53 L'analyse comprend l'examen du cadran et l'examen interne d'un potentiomètre de réaction, qui peut être corrélé avec le débit carburant d'après les données spécifiées dans le manuel technique de révision ou qui peut être

reconstitué sur un dispositif semblable en état de fonctionnement. Trois types de transmetteurs de débit carburant sont fondamentalement utilisés. L'un d'eux utilise un rotor, des palettes rotatives et un synchro-transmetteur. Le rotor est entraîné électriquement à un régime constant. Le liquide passe par le rotor puis par les palettes rotatives, et les force à tourner et à s'aligner avec le débit du rotor. Le synchro est connecté à l'arbre des palettes, qui transmet un signal à l'indicateur dans le poste de pilotage. Les palettes sont normalement munies d'un ressort de rappel et retournent à la position zéro lors de la perte du débit, à moins qu'elles ne soient figées. En cas de perte de l'alimentation électrique, le rotor ne tourne pas au régime requis mais il peut tout de même tourner à cause du liquide qui traverse les palettes. Vu que le rotor et les palettes sont extrêmement près du carter du transmetteur, les dommages de l'impact causent souvent la rupture des pivots de montage, ce qui permet aux palettes d'entrer en contact avec le carter et d'y laisser des marques. La présence de rainures profondes sur le rotor signifie que le transmetteur était alimenté électriquement. Vu que les palettes ne tournent qu'en fonction du débit, les dommages d'impact notés peuvent être corrélés avec la position de la butée mécanique ; il est donc possible d'effectuer une reconstitution sur un transmetteur qui fonctionne et le débit peut être lu directement sur l'indicateur de débit carburant. Il est aussi possible de lire les degrés électriques du synchro et de les convertir en débit carburant conformément aux données techniques applicables.

13.6.54 Le deuxième type de transmetteur comprend une palette qui s'ouvre et se ferme en réponse à l'écoulement du carburant dans le transmetteur. Un synchro-transmetteur est raccordé à la palette qui envoie un signal à l'indicateur de débit carburant. Cette palette comporte aussi un ressort de rappel qui retourne à la butée de limite inférieure. L'analyse consiste à examiner la cavité interne pour déterminer si la palette est entrée en contact avec le carter. Les points de contact les plus fréquents sont l'extrémité de la palette et derrière le pivot de palette. Une fois que les marques d'impact ont été repérées, la position notée peut être corrélée avec l'indication du débit carburant de la manière indiquée plus haut pour le rotor.

13.6.55 Le troisième type de transmetteur est composé d'un rotor qui tourne lorsque le carburant passe par les palettes. Cette rotation établit un débit qui est converti en tension CC. Lorsque le débit étalonné passe dans le transmetteur, une tension CC est appliquée à un relais pas à pas qui soustrait la quantité de carburant qui reste d'un indicateur préréglé dans le poste de pilotage. Peu d'informations peuvent être tirées du transmetteur. Cependant l'indicateur a une fenêtre d'affichage numérique qui devrait donner une idée approximative de la quantité de carburant qui restait au moment de la perte de l'alimentation électrique.

Systèmes d'indication de la température des gaz d'échappement, de l'entrée moteur, de la tuyère et de la culasse

13.6.56 Ces systèmes fonctionnent tous sur le principe du thermocouple, c'est-à-dire de la tension produite par un capteur bimétallique exposé à la chaleur. Cette tension est transmise à un voltmètre de type d'Arsonval qui possède un cadran étalonné en degrés Celsius. Aucune information utile ne peut être tirée du filage ni du thermocouple. Ces indicateurs sont très résistants aux changements qui peuvent être causés par les forces d'impact tant que le signal électrique parvient à l'indicateur. Si l'alimentation électrique est coupée avant que l'instrument ne soit bloqué sur l'indication captée ou si l'indication n'est pas captée, l'aiguille oscille normalement sur un grand arc même si les mouvements induits à l'indicateur sont légers. L'analyse de l'indicateur consiste à examiner le cadran pour repérer des marques d'impact qu'auraient pu laisser l'aiguille. Une fois l'indicateur démonté, examiner l'inducteur de l'aiguille pour voir si le bras de levier de l'aiguille a laissé des marques d'impact. Ce bras est normalement orienté dans la direction de la pointe de l'aiguille ; ne pas l'oublier lors de la corrélation des marques d'impact avec l'indication de l'aiguille.

13.6.57 Si l'aiguille et le bras de levier sont détruits, démonter l'inducteur et noter la position de la bobine mobile. La bobine se trouve normalement dans le même plan que l'aiguille. Reproduire la position observée sur un indicateur semblable et lire la température directement sur le cadran. Si les dommages sont suffisants pour détruire tous les éléments de référence à la pointe de l'aiguille, la lecture peut être à 180° de celle qui est observée. Tenir compte de tous les renseignements et choisir celui qui est le plus logique d'après les facteurs connus ou soupçonnés. Il ne faut pas oublier que tant que le thermocouple demeure intact, l'indicateur donnera la température ambiante quel que soit l'état du système électrique de l'avion.

13.6.58 Certains indicateurs de température plus récents utilisent des aiguilles entraînées par un grand engrenage couplé à une fenêtre de lecture numérique et à un sélecteur de température qui envoie un signal à un enregistreur de température. Certains comprennent aussi un drapeau d'avertissement de température excessive qui apparaît lorsqu'une température préréglée est atteinte. L'analyse de ce type d'indicateur consiste à examiner le cadran pour déterminer s'il y a des marques d'impact laissées par l'aiguille et les positions de l'affichage numérique. L'examen interne consiste à noter la position du sélecteur. Le manuel de maintenance applicable donnera généralement des renseignements suffisants pour déduire la position du sélecteur par rapport à la température indiquée. Vu la conception de ce type d'indicateur, les indications notées sont celles qui existaient au moment de la perte d'alimentation électrique de l'aéronef vu que cette alimentation est nécessaire à leur fonctionnement.

Systèmes d'indication de la pression (huile, carburant, eau, fluide hydraulique, etc.)

13.6.59 Ces indicateurs sont normalement des synchro-répétiteurs qui n'utilisent pas d'engrenages. La réaction des synchro-répétiteurs aux dommages causés par l'impact est traitée plus haut. L'analyse consiste à examiner le cadran pour déceler des marques d'impact laissées par l'aiguille et la position électrique du synchro. Les transmetteurs de pression utilisent généralement un secteur denté pour positionner un pignon sur un arbre de synchro-transmetteur. Examiner le secteur et le pignon pour déterminer si l'impact a été suffisant pour endommager les dents des roues dentées. Si le dommage peut être observé, reproduire la position de l'engrenage sur un dispositif en état de fonctionnement et lire la pression directement sur l'indicateur applicable ou mesurer les degrés angulaires du synchro et les corrélérer avec la pression conformément au manuel de maintenance de l'équipement. À moins que l'indication n'ait été figée, ces transmetteurs retournent à zéro lorsqu'il n'y a pas d'entrée de pression en raison de la précharge du ressort et de l'affaissement de la capsule.

Indicateurs verticaux à bande

13.6.60 Certains aéronefs de transport présentent l'EPR, le régime des rotors basse et haute pression (N1 et N2), la température des gaz d'échappement et le débit carburant sur un indicateur vertical à bande. Ces indicateurs sont conçus pour retourner au zéro mécanique dans les deux secondes qui suivent la perte de l'alimentation électrique et un drapeau « OFF » apparaît. Si ces indicateurs sont figés lorsqu'ils sont trouvés, mais que le moment où l'indication a été figée ne peut être déterminé avec certitude, les indications notées représentent la performance minimale du moteur au moment où l'instrument s'est figé. L'analyse de ces indicateurs verticaux est traitée dans les § 13.6.35 à 13.6.44.

Indicateurs de position (volet de capot, échangeur thermique intermédiaire, tuyères d'échappement, etc.)

13.6.61 La plupart de ces indicateurs ont des circuits à pont de Wheastone, des mouvements d'Arsonval ou des synchro-répétiteurs. L'analyse de ces instruments est fondamentalement la même que celle d'autres types d'indicateurs traités plus haut.

Systèmes de jaugeage carburant

13.6.62 Quelles que soient les circonstances de l'accident, il est important dans la plupart des enquêtes de déterminer la quantité de carburant à bord de l'aéronef et la répartition du carburant. La plupart des systèmes de jaugeage carburant sont des circuits capacitifs conçus pour mesurer la densité du carburant et convertir le résultat en livres. Lorsqu'un pont capacitif est utilisé, il y a normalement un circuit de rétroaction dans l'indicateur pour équilibrer le pont. Pour réaliser l'équilibre ou le retour à zéro, de nombreux trains d'engrenage et un potentiomètre de réaction sont incorporés dans l'indicateur. Lorsque ce type de configuration est utilisé, les indicateurs devraient conserver les indications existantes au moment où l'alimentation est coupée.

13.6.63 Si l'aéronef se disloque autour des réservoirs de carburant avant la perte de l'alimentation électrique, les changements suivants peuvent se produire dans l'indication du carburant, mais ils se produisent lentement. En cas de rupture du fil du réservoir ou du fil blindé, l'indicateur retourne à zéro. En cas de rupture du fil du compensateur, normalement les indications augmentent. En cas de court-circuit à la terre du fil du réservoir ou du fil du compensateur, les indications diminuent. En cas de court-circuit à la terre du fil blindé, les indications augmentent. En cas d'une combinaison quelconque de court-circuit du fil du réservoir, du fil blindé et du fil du compensateur en même temps, les indications diminuent. Le changement de plein à vide se produit en environ 35 secondes dans tous les cas, sauf dans le cas d'un court-circuit à la terre du fil blindé. Dans ce cas, le temps est d'environ 85 secondes. Vu que le temps entre l'impact et la perte d'alimentation se mesure normalement en fractions de secondes, les changements d'indications devraient être négligeables. Il existe des exceptions ; si la séquence de rupture est plus longue, il est possible que l'alimentation électrique ne soit pas coupée pendant la rupture.

13.6.64 Certains aéronefs utilisent peut-être encore un système de jaugeage à pont de Wheatstone avec un transmetteur à flotteur. Dans ces systèmes, les indicateurs retournent généralement au zéro mécanique sur perte de l'alimentation électrique. L'analyse de l'indicateur consiste à examiner le cadran de l'instrument pour détecter des marques d'impact laissées par l'aiguille sans oublier que les forces d'impact peuvent faire osciller l'aiguille.

Horloges de bord

13.6.65 Les horloges de l'aéronef sont des instruments très délicats et s'arrêtent généralement lorsqu'elles sont exposées à des forces d'impact ou à une chaleur modérées. L'analyse consiste à examiner le cadran pour déceler les marques d'impact laissées par les aiguilles et vérifier si les aiguilles sont desserrées. Les informations qui peuvent être obtenues de l'examen externe sont limitées.

Indicateurs de position (volet, train d'atterrissage, déporteurs, gouvernes, etc.)

13.6.66 La plupart de ces indicateurs sont des synchro-répétiteurs sans trains d'engrenages et les indications sont susceptibles de changer sous l'effet des forces d'impact. L'analyse consiste à examiner les cadrans pour déceler des marques d'impact laissées par l'aiguille et à mesurer la position électrique du synchro sans oublier que l'instrument a pu subir des changements durant l'impact. La plupart des indicateurs de position des atterrisseurs retournent à une position intermédiaire sur perte de l'alimentation électrique. Les changements d'indications de rentré/sorti (UP/DOWN) à la position intermédiaire se produisent extrêmement rapidement.

Manomètres de pression hydraulique

13.6.67 Certains manomètres de pression hydraulique sont des synchro-répétiteurs des transmetteurs hydrauliques et n'utilisent pas de trains d'engrenages ; d'autres sont des instruments à lecture directe utilisant un tube de bourdon qui se contracte ou s'allonge pour positionner l'aiguille sur un cadran étalonné. L'analyse des manomètres à synchro-répétiteur est la même que celle qui est indiquée plus haut pour les autres indicateurs à synchro-répétiteurs.

13.6.68 L'analyse du manomètre à lecture directe est un peu différente, car certaines circonstances peuvent modifier les indications durant l'impact. Comme ils ne fonctionnent pas électriquement, ces manomètres continuent à prendre des mesures tant que le système est intact. Si l'instrument se détache de son support de montage en restant fixé à la canalisation, celle-ci peut déformer le tube de bourdon suffisamment pour changer l'indication. Si le manomètre est exposé à un incendie après impact, la chaleur peut allonger le tube de bourdon et donner une indication plus élevée.

13.6.69 Le seul moment où les manomètres à lecture directe donnent des renseignements utiles est probablement dans le cas d'un impact instantané. Examiner le cadran pour déceler toute trace d'impact laissée par l'aiguille ou une position figée, et corrélérer cette information avec d'autres conditions connues ou soupçonnées du système applicable. Le

transmetteur de pression des indicateurs à synchro-répétiteurs peut souvent fournir des renseignements utiles si l'impact est suffisant pour gravement endommager le mécanisme interne. L'analyse doit consister en un examen interne du secteur denté et du pignon pour déceler toute marque d'impact laissée par l'aiguille. S'il y a des marques d'impact, reporter leur position sur un dispositif intact et lire la pression directement sur le manomètre du système applicable, ou mesurer les degrés angulaires du synchro et les traduire en pression conformément aux valeurs indiquées dans les documents techniques applicables.

Mesures du système électrique (tension, fréquence, charge, etc.)

13.6.70 Ces indicateurs fonctionnent selon le concept du mouvement d'Arsonval. Lorsque les indicateurs sont alimentés, certains changements dus à la force g de l'impact sont inhérents. Si l'alimentation est perdue et l'indicateur n'est pas bloqué sur l'indication captée, les aiguilles sont libres d'osciller et elles retournent normalement au zéro mécanique. L'analyse doit consister à effectuer un examen pour déterminer la position de la bobine de l'appareil de mesure. Cette position doit être reportée sur un instrument semblable pour obtenir la position relative de l'aiguille.

13.7 SYSTÈMES DE NAVIGATION

Équipement de radiocommunication et de navigation

Émetteurs et récepteurs

13.7.1 Lors de l'examen du poste de pilotage, les tableaux sélecteurs de fréquence doivent être examinés pour déterminer les fréquences choisies. Comparer ces fréquences avec celles des installations radio dans la région. Vérifier également la position des boutons de commande de volume sur les tableaux sélecteurs et sur les tableaux de commande d'audiofréquences pour déterminer le volume choisi.

13.7.2 On peut examiner visuellement l'équipement radio VHF de communication et de navigation pour déterminer les fréquences pré-réglées en retirant le couvercle avant et en lisant les fréquences sur les deux indicateurs. Si le panneau avant a disparu, les commutateurs de sélection de quartz doivent être examinés pour déterminer les quartz qui avaient été choisis. Les valeurs des deux quartz peuvent ensuite être transmises au constructeur, qui indiquera alors la fréquence sur laquelle l'équipement était réglé. Une autre méthode consiste à examiner la position des bielles et des cames du sélecteur de fréquence, en notant également la position des tiges de réglage. Si l'on dispose d'un équipement analogue dans un atelier radio, on peut modifier le réglage de l'équipement jusqu'à ce que les cames et les tiges de réglage soient dans la même position que ceux de l'équipement de l'aéronef accidenté, et lire la fréquence sur l'équipement en bon état.

Radiogoniomètre automatique (ADF)

13.7.3 Déterminer la bande et la fréquence choisies en examinant le tableau de commande du radiogoniomètre automatique, puis essayer de corréliser les indications ainsi relevées avec la fréquence d'une installation basse fréquence voisine. Si le radiogoniomètre automatique ne fonctionne plus, noter la position des condensateurs d'accord variables en traçant un trait sur les plaques des condensateurs pour retrouver leur position, puis accorder un autre récepteur du même type jusqu'à ce que les plaques des condensateurs soient dans la même position relative, ce qui permet d'obtenir la fréquence avec une bonne approximation.

13.7.4 Il est également possible de noter le relèvement indiqué par l'aiguille du radiogoniomètre automatique sur l'indicateur radiomagnétique et d'établir la relation avec le relèvement du lieu de l'accident par rapport à l'installation de navigation choisie. Cette opération peut être effectuée en utilisant les relèvements indiqués par l'aiguille du VOR ; elle permet de vérifier la navigation de l'équipage de conduite, ce qui est particulièrement utile dans le cas des accidents en

croisière. Il est également possible d'obtenir des renseignements de cap d'après la position des cadres mobiles des radiogoniomètres automatiques, si l'état de ces cadres le permet.

Dispositif de mesure de distance (DME)

13.7.5 Il faut noter la position du sélecteur de canal dans le poste de pilotage. Le module de distance situé à l'avant de l'appareil peut fournir une indication de la distance parcourue ; certains équipements fournissent également l'indication du canal choisi, mais ce n'est pas le cas des équipements à semi-conducteurs. Un équipement utilisant des pièces mobiles peut également fournir une indication permettant de déterminer si l'appareil était ou non verrouillé sur un canal.

13.7.6 Déterminer la fréquence choisie pour le VOR et vérifier si l'installation correspondante était équipée pour fournir une réponse au DME. Le canal de mesure de distance assigné à la fréquence correspondante peut alors être comparé à celui sur lequel était réglé l'équipement DME. Comparer la distance indiquée par l'équipement DME à la distance entre le lieu de l'accident et l'installation au sol choisie.

Antennes et câbles

13.7.7 Vérifier les connexions des câbles d'antenne pour déceler toute trace de dommage ou de connexions défectueuses. Examiner les antennes des émetteurs pour déterminer si elles ont été frappées par la foudre ou autres décharges statiques.

Systèmes de bord autonomes

Systèmes de navigation par inertie

13.7.8 Les aéronefs équipés de systèmes de navigation par inertie reçoivent des signaux de gyroscopes à trois axes qui traduisent la précession du gyroscope en mouvement, ce qui permet de calculer la route avec la loxodromie ou avec le grand cercle. Les systèmes de navigation par inertie sont sujets aux erreurs de précession si un mécanisme n'actualise pas la position du gyroscope ou si l'équipage ne détecte pas les erreurs de position et n'effectue pas le réétalonnage.

Systèmes de navigation inertiels à gyrolaser

13.7.9 Certains aéronefs sont équipés de systèmes de navigation qui emploient des modules de référence inertiels à gyrolasers. Un gyrolaser est un capteur de vitesse angulaire qui mesure la déflexion d'un rayon lumineux circulaire à l'intérieur du dispositif ; il n'a pas de gyroscopes tournants et il est donc très fiable. Même s'ils sont extrêmement précis en vol, ces dispositifs doivent être alignés avec précision avant le décollage. L'alignement peut aussi être actualisé en vol. Dans certaines enquêtes, il peut être nécessaire d'examiner les données de position initiales et les procédures d'alignement ou d'actualisation utilisées par l'exploitant. Il faut utiliser un banc d'essai du fabricant pour faire des essais de fonctionnement des gyrolasers.

Système mondial de localisation (GPS)

13.7.10 La navigation au GPS devient de plus en plus courante. Le GPS utilise un réseau de satellites de navigation très précis. Un aéronef équipé du récepteur approprié peut recevoir simultanément des signaux de plusieurs satellites et déterminer sa position par triangulation géométrique. Ce système est très précis et élimine certaines des contraintes imposées par les systèmes de navigation au sol. Il faut faire appel au fabricant pour évaluer la précision et la fonctionnalité des composants GPS.

13.7.11 Les GPS utilisent des affichages électroniques, mais on peut obtenir des données en analysant leur mémoire non volatile. L'afficheur visuel ne conserve aucune information une fois l'alimentation coupée. Il est peut-être possible de le mettre sous tension pour lire les données, mais il faut le faire en laboratoire dans des conditions contrôlées.

13.7.12 Les enquêteurs doivent être attentifs à la présence de systèmes GPS lorsqu'ils évaluent d'autres moyens de navigation. En raison de la précision de ces systèmes et des calculs instantanés de destinations et de position, il est arrivé que des pilotes se fient à tort à ces systèmes alors qu'ils avaient d'autres systèmes de radionavigation plus classiques. Les approches effectuées en utilisant des données GPS et des approches publiées non certifiées pour le GPS peuvent donner lieu à des erreurs de position et contribuer aux accidents.

13.8 COMMANDES DE VOL

Introduction

13.8.1 Les enquêtes sur les systèmes de commande de vol demandent beaucoup de temps. Vu que le système de commande de vol est réparti sur toute la structure de l'aéronef, l'identification, la récupération et l'examen de tous ses éléments est une tâche imposante. Avant de commencer, examiner les dossiers de maintenance de l'aéronef pour déterminer s'il y a déjà eu des problèmes de commandes de vol ou si des travaux récents ont été effectués dans ce domaine. Ne former aucune idée préconçue sur la base des dossiers. L'examen approfondi des dossiers de l'avion exigera un temps considérable. Rassembler ensuite toutes les données techniques nécessaires pour identifier les éléments des commandes de vol sur les lieux de l'accident. Il est possible que le constructeur ait déjà préparé un ensemble de données sur les commandes de vol à utiliser en cas d'accident. Dans ce cas, il faut s'assurer qu'elles sont disponibles. Il est essentiel de faire appel à des techniciens expérimentés dans le domaine des commandes de vol pour cette partie de l'enquête. Ils connaissent le système et l'aspect des divers éléments. Ne pas oublier que les forces d'impact et les incendies peuvent considérablement modifier la forme et l'aspect des pièces. Il est donc important d'avoir les numéros des pièces à portée de la main. Commencer l'enquête sur les lieux de l'accident avec les données techniques et l'aide d'un technicien de maintenance des commandes de vol.

Systèmes de commandes de vol

13.8.2 Vu que le système de commandes de vol varie considérablement d'un type d'aéronef à l'autre, les paragraphes qui suivent n'examineront que trois systèmes de commandes de vol types : le système mécanique, le système hydromécanique et le système hydroélectrique (commandes de vol électriques). Le système d'augmentation de la stabilité et du contrôle et le pilote automatique sont traités séparément dans le présent chapitre.

13.8.3 Les systèmes de commande de vol commandent le mouvement sur les axes longitudinal, latéral et vertical de l'aéronef. Les gouvernes peuvent être divisées en deux grandes catégories : les gouvernes primaires et les gouvernes secondaires (ou auxiliaires).

13.8.4 Les gouvernes primaires et secondaires sont commandées et actionnées à l'aide d'un grand nombre d'éléments, notamment des actionneurs, des articulations, des supports, des guignols, des bielles double effet, des tirants, des câbles, des poulies, des contrepoids et des masselottes. Dans les hélicoptères, les systèmes et les composants des commandes de pas collectif et de pas cyclique, y compris le rotor principal et le rotor de queue, font partie intégrante du système de commandes de vol. Il faut essayer d'identifier et de récupérer tous ces éléments sur les lieux de l'accident.

Gouvernes primaires

13.8.5 Les gouvernes primaires comprennent les ailerons, les gouvernes de profondeur ou plans mobiles et les gouvernes de direction. La plupart des gouvernes sont similaires mais elles ont des dimensions, des méthodes de fixation et des méthodes d'actionnement différentes. Elles sont généralement faites d'un alliage d'aluminium ou d'un matériau composite et sont construites autour d'un seul longeron ou tube de torsion. Des nervures sont fixées aux bords d'attaque et de fuite et sont jointes par des lisses. Sur certains aéronefs, une gouverne peut avoir une fonction double : par exemple, les élevons combinent la fonction des ailerons et des gouvernes de profondeur. Les flaperons sont des ailerons qui peuvent aussi jouer le rôle de volets. Un plan mobile est une partie horizontale de l'empennage qui sert de stabilisateur horizontal et de gouverne de profondeur.

Gouvernes secondaires

13.8.6 Les gouvernes secondaires sont les volets compensateurs de régime, les volets compensateurs d'évolution, les servo-tabs, les volets, les déporteurs, les aérofreins et les dispositifs de bord d'attaque. Elles ont pour fonction de réduire la force nécessaire pour actionner les gouvernes primaires, équilibrer l'aéronef en vol, réduire la vitesse d'atterrissage et la longueur du roulement à l'atterrissage, et modifier la vitesse de l'aéronef en vol. S'assurer que toutes les gouvernes primaires et secondaires sont retrouvées durant l'enquête.

Éléments de base

13.8.7 Certains éléments de base, décrits ci-après, sont communs à tous les systèmes.

Câbles

13.8.8 L'ensemble de câble classique comprend un câble souple, des fixations d'extrémité pour le raccordement à d'autres éléments et des tendeurs.

Poulies

13.8.9 Les poulies sont utilisées pour guider les câbles et pour changer la direction du mouvement des câbles. Les roulements de poulies sont étanches et ne nécessitent aucune lubrification autre que celle qui est faite durant la fabrication. Les poulies sont fixées à la structure de l'aéronef par des supports. Les câbles qui passent sur les poulies sont maintenus en place à l'aide d'un garde-câbles. Ces garde-câbles sont ajustés pour empêcher le blocage des câbles ou éviter qu'ils ne glissent hors de la poulie lorsqu'ils se dilatent par suite des changements de température. Les passages de poulies sont des endroits où risquent de se loger des corps étrangers. Voir la Figure III-13-5.

Guide-câbles

13.8.10 Les guide-câbles sont faits d'un matériau non métallique (matériau phénolique, par exemple) ou de métal (aluminium doux, par exemple). Ils entourent complètement les câbles qui traversent des cloisons ou d'autres parties métalliques. Ils sont utilisés avec des câbles en ligne droite qui traversent des éléments structurels ou qui sont placés entre des éléments structurels. Ils ne doivent jamais modifier la direction du câble de plus de trois degrés (Figure III-13-6).

Joints d'étanchéité

13.8.11 Les joints d'étanchéité sont installés aux endroits où des câbles ou des bielles traversent des cloisons de pressurisation. Le joint est assez serré pour éviter des pertes de pression d'air mais pas assez pour entraver le mouvement du câble ou de la bielle.

Biellettes de commande

13.8.12 Les biellettes de commande servent de liaison avec les commandes de vol et sont utilisées pour les mouvements de va-et-vient. Elles peuvent être ajustées à une extrémité ou aux deux. Elles sont constituées d'un tube dont les extrémités sont filetées et où sont fixés des embouts antifriction ou des chapes. L'embout ou la chape raccorde le tube aux éléments du système de commandes de vol. Lorsqu'il est serré, le contre-écrou empêche l'embout ou la chape de se desserrer (Figure III-13-7).

Guignols de renvoi

13.8.13 Un guignol de renvoi change la direction du mouvement et transmet le mouvement aux biellettes de commande, aux câbles et aux tubes de torsion (Figure III-13-8).

Tube de torsion

13.8.14 Les tubes de torsion sont installés aux endroits du système de commandes de vol où il est nécessaire d'assurer un mouvement angulaire ou de torsion (Figure III-13-9).

Tendeurs

13.8.15 Les tendeurs sont utilisés dans les systèmes de câbles pour ajuster la tension des câbles. La cage du tendeur est filetée, avec filetage à gauche à une extrémité et filetage à droite à l'autre extrémité. Pour ajuster la tension, les extrémités du câble sont vissées à chacune des extrémités de la cage, de manière égale en tournant la cage. Une fois ajusté, le tendeur doit être freiné.

Vérin à vis

13.8.16 Un vérin à vis est un mécanisme ajusté par vissage pour appliquer de la pression sur une surface. Les vérins à vis sont normalement actionnés par un moteur électrique et sont utilisés pour positionner les volets et les volets de compensation.

Gouvernes à commande hydraulique

13.8.17 Dans un système à commande hydraulique, la commande sollicitée par le pilote a pour effet d'ouvrir des vannes qui dirigent le fluide hydraulique jusqu'aux actionneurs, qui sont raccordés aux gouvernes par des biellettes de commande. Les actionneurs placent la gouverne dans la position de vol souhaitée. La commande peut être sollicitée manuellement à l'aide de manettes de commande ou électriquement, comme dans les systèmes de commandes électriques.

Enquête sur les lieux de l'accident

13.8.18 Quel que soit le type de système de commandes de vol qui fait l'objet de l'enquête, le travail sur les lieux de l'accident est semblable. Si des membres de l'équipage de conduite ont survécu, leur témoignage est un excellent point de départ ; certains enquêteurs préfèrent cependant examiner les déclarations des témoins après avoir effectué leur examen initial sur place. En l'absence de témoins, la première visite sur les lieux de l'accident peut révéler des indices de problèmes causés par les commandes de vol.

- a) Identifier, étiqueter et photographier le plus grand nombre possible d'éléments du système. Durant cette partie de l'enquête, il faut s'assurer de noter et de photographier tout indice observé qui semble inhabituel.

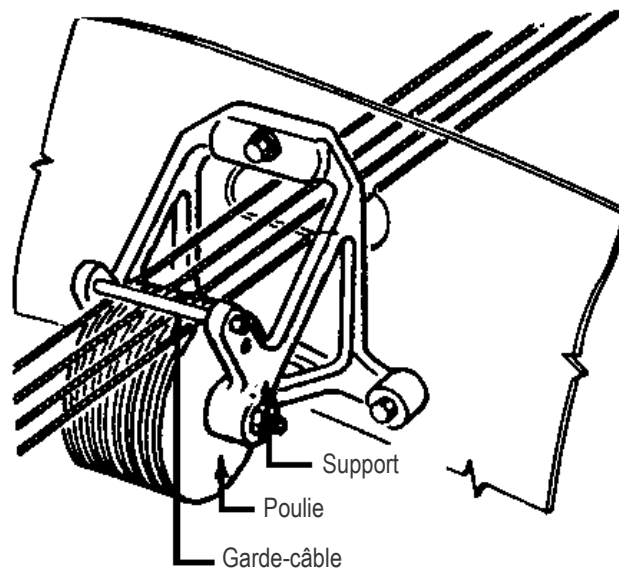


Figure III-13-5. Assemblage de poulie

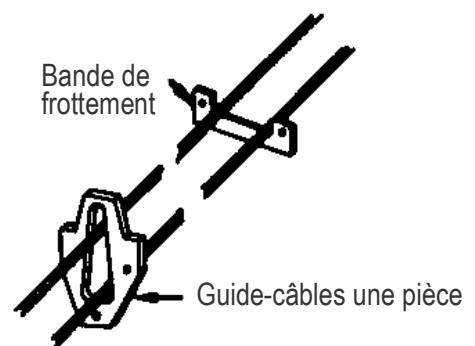
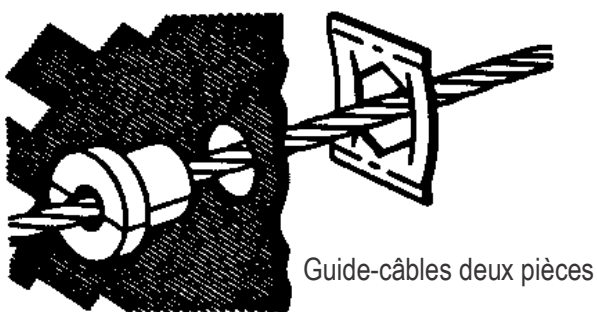


Figure III-13-6. Guide-câbles

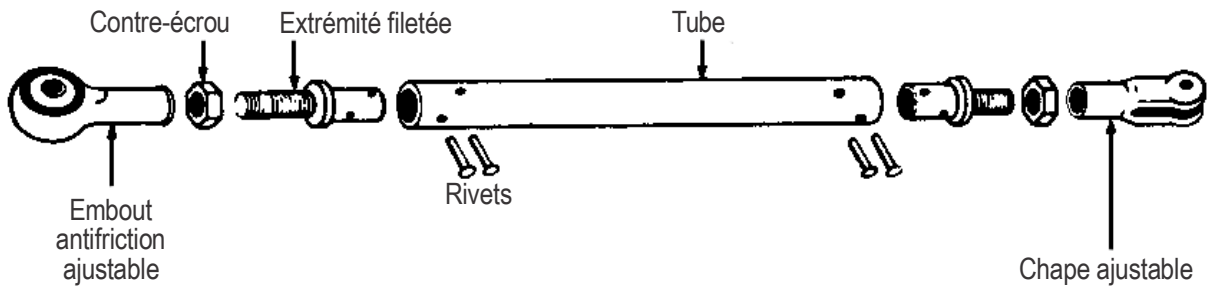


Figure III-13-7. Bielle de commande type

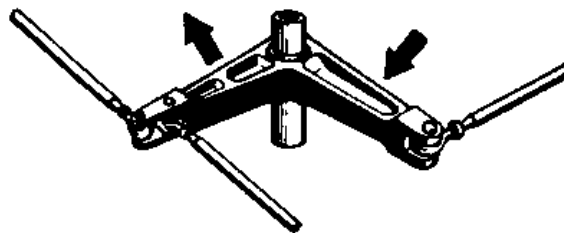


Figure III-13-8. Guignol de renvoi

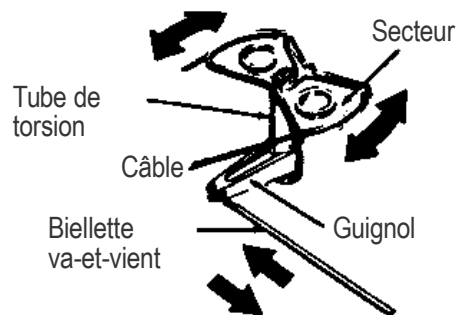


Figure III-13-9. Ensemble type de tube de torsion

- b) S'il faut déconnecter des parties du système, marquer chaque côté du raccordement afin de pouvoir le reconstituer. Toutes les déconnexions doivent être notées.
- c) Marquer la position de tout élément qui pourrait se déplacer durant la récupération de l'épave.
- d) Pour bien examiner tout le système, faire un dessin ou un croquis grandeur réelle des fragments des composants. Ces dessins permettent aussi de déterminer quelle proportion du système a été récupérée. Établir un endroit sécurisé et y apporter tout ce qui a été trouvé sur les lieux de l'accident afin d'effectuer un examen détaillé.

Le système mécanique

13.8.19 Le système de commandes de vol le plus simple est strictement mécanique. Les ailerons, les gouvernes de profondeur et les gouvernes de direction sont raccordés au levier ou au volant du pilote par des ensembles de câbles qui agissent par l'intermédiaire de bielles de commande, de guignols de renvoi et de tubes de torsion.

Généralités

13.8.20 Après avoir identifié les gouvernes et la plus grande partie possible du système de commandes de vol sur les lieux de l'accident, commencer l'examen détaillé. Durant l'enquête, il faut tout faire pour :

- a) retrouver toutes les gouvernes, y compris les volets compensateurs ;
- b) déterminer s'il y a des corps étrangers ;
- c) s'assurer de la continuité de chaque commande de vol, du levier de commande ou du palonnier jusqu'à la gouverne ;
- d) déterminer la position de chaque gouverne au moment de l'impact ;
- e) déterminer la position des volets compensateurs au moment de l'impact.

Enquête détaillée

13.8.21 Établir la disposition du système de commande dans un endroit sécurisé, en utilisant des schémas grandeur réelle dans la mesure du possible, et procéder comme suit :

- a) Examiner de près la structure adjacente à toutes les gouvernes pour y déceler des marques de contact qui pourraient indiquer la position de la gouverne au moment de l'impact. L'utilisation des marques de contact pour déterminer la position des gouvernes au moment de l'impact part du principe que l'impact avec le sol est si rapide (des millisecondes) que le système d'actionnement et l'inertie de la masse des gouvernes empêchent tout mouvement appréciable durant l'impact initial. Cependant, les marques laissées par les gouvernes sur les structures adjacentes peuvent aussi se produire durant la dislocation de la cellule après l'impact, donnant de faux indices ou des indices inutiles.
- b) Examiner de près tous les câbles des commandes de vol pour déceler des indices de blocage, de coincement ou de rupture avant l'impact. Le blocage ou le coincement des câbles durant le vol peut généralement être détecté par les marques laissées à l'avant et à l'arrière sur les structures adjacentes. Les marques qui ne vont que dans une direction indiquent normalement un blocage résultant de l'impact avec le sol. De même, une fixation cassée ou déconnectée devrait laisser des marques appréciables sur les structures adjacentes si la rupture s'est produite en vol et si les

gouvernes ont été déplacées par les charges aérodynamiques ou un système de câble connexe. Les câbles sont normalement faits de matériaux résistants (tels que l'acier inoxydable) tandis que les poulies, les manchons et les structures adjacentes sont normalement faits d'un alliage d'aluminium. Une analyse spectrale aux rayons X peut déterminer s'il y a eu des transferts de métal inhabituels indiquant un coincement ou un blocage du câble. La même analyse aux rayons X aide à déterminer si un corps étranger trouvé dans l'épave a pu bloquer une commande. Il faut savoir ce qui arrive à chaque gouverne en cas de rupture d'un câble. Dans certains aéronefs, il n'y a pas de déplacement de la commande. Les câbles téléflex peuvent se rompre pour diverses raisons, notamment :

- 1) Forte usure causée par des contaminants tels que le fluide hydraulique s'infiltrant dans les fixations des extrémités du câble. Le contaminant peut durcir avec le temps et causer un frottement qui, à son tour, entraîne une friction excessive près de l'extrémité. La friction peut imposer une charge élevée sur l'âme, qui se courbe puis se coince et/ou se bloque.
- 2) Les broches ou les trous de fixation peuvent se rompre.
- 3) L'âme peut se rompre.
- 4) N'importe quel point de raccordement peut se rompre.
- 5) Le câble peut se rompre par suite d'un défaut d'installation.
- 6) Les corps étrangers peuvent bloquer ou rompre le câble.

Note.— L'examen à l'aide d'un microscope et d'un microscope électronique à balayage des câbles rompus peut détecter des fissures de fatigue ou d'autres ruptures par fissure. Les câbles qui doivent être soumis à cet examen doivent être laissés le plus possible dans l'état où ils ont été trouvés, avec tous les éléments de fixation qui y sont raccordés, afin de faciliter l'identification précise du câble.

c) Examiner la continuité du système de commande des ailerons :

- 1) s'assurer que les boulons des articulations des ailerons sont bien installés ;
- 2) vérifier la fixation des biellettes de commande des ailerons ;
- 3) vérifier la fixation des guignols des ailerons ;
- 4) vérifier les fixations directes et croisées des câbles des ailerons aux guignols ;
- 5) vérifier tous les supports de poulies, les poulies et les boulons de fixation ;
- 6) vérifier tous les supports à roues dentées et paliers pour détecter s'il y a des dents endommagées ou manquantes ;
- 7) vérifier l'intégrité des leviers de commande ; ils sont parfois raccordés à la commande de l'aileron par des chaînes et des tendeurs.

d) Examiner la continuité du système de commande de la gouverne de profondeur :

- 1) s'assurer que la commande de la gouverne de profondeur est bien fixée à l'empennage horizontal ou à la gouverne de profondeur ;

- 2) s'assurer que les bras des contrepoids et les contrepoids d'équilibrage sont bien fixés à la gouverne de profondeur ;
 - 3) vérifier l'ensemble des biellettes de commande de la gouverne de profondeur ;
 - 4) vérifier le raccordement des guignols et des câbles de la gouverne de profondeur ;
 - 5) vérifier les poulies et les supports de poulies. Les poulies doivent être bien protégées. Vérifier les protections couvrant l'extérieur de la poulie pour voir s'il y a des éraflures ou des marques inhabituelles.
- e) Examiner la continuité du système de commande de la gouverne de direction :
- 1) s'assurer que tous les paliers, boulons et écrous sont en place ;
 - 2) vérifier si les biellettes de commande sont bien raccordées au guignol de la gouverne de direction ;
 - 3) vérifier la sécurité des supports et du raccordement du guignol de la gouverne de direction ;
 - 4) vérifier si les câbles qui traversent l'empennage horizontal sont bien fixés ;
 - 5) vérifier si les supports des poulies de la gouverne de direction sont bien fixés et si les poulies, les boulons et les écrous sont en place ;
 - 6) vérifier si les garde-câbles sont en place.
- f) Si l'examen révèle qu'un de ces éléments est déconnecté, vérifier si les boulons sont encore en place ou si les points de déconnexion présentent des indices évidents de rupture ou d'autres dommages d'impact. En l'absence de ces indices, il y a lieu de soupçonner fortement une déconnexion en vol ; dans ce cas, il faut déterminer les conséquences d'un tel événement et comment elles cadrent dans le scénario de l'accident.

Système hydromécanique

Généralités

13.8.22 Le système hydromécanique type s'applique aux commandes de vol primaires de l'aéronef, notamment le plan mobile ou la gouverne de profondeur, la gouverne de direction et les ailerons et/ou déporteurs. Les commandes sont actionnées par des vérins hydrauliques irréversibles. Des systèmes de sensation artificielle créent des efforts aérodynamiques simulés sur le levier de commande et les pédales du palonnier vu que les vérins de commande de puissance ne produisent pas de forces aérodynamiques de réaction. Les systèmes de sensation artificielle comportent des actionneurs de compensation qui, par l'intermédiaire des vérins, déplacent toute la gouverne. La sensation artificielle est généralement créée par des ressorts et des masselottes. La plupart des systèmes de compensation utilisent des vérins à vis ou des actionneurs de compensation séparés.

- a) Les vérins des ailerons reçoivent des fluides hydrauliques dosés des distributeurs de commande. Ces distributeurs sont commandés par des biellettes à double effet actionnées à l'aide de guignols et du levier de commande. La partie du vérin qui contient la tige du piston est raccordée par un étrier à la structure de l'aéronef. La partie cylindre du vérin est raccordée à l'aileron.

- b) Les éléments du plan mobile et de la gouverne de profondeur comprennent le levier de commande, des biellettes à double effet, des câbles, des guignols, des distributeurs de commande et des vérins. Lorsque le levier de commande est actionné sur le plan longitudinal, le mouvement est transmis au guignol par les biellettes, puis transmis par un câble à un autre ensemble de biellettes à double effet. Le deuxième ensemble de biellettes actionne le distributeur de commande, qui dose le fluide hydraulique et l'achemine au vérin.
- c) Le système de commande de la gouverne de direction comprend les pédales du palonnier, des biellettes à double effet, des guignols, un amortisseur de gouverne de direction, des distributeurs de commande et un vérin. Lorsque les pédales sont sollicitées, le mouvement est transmis par les biellettes à double effet, les guignols et les câbles au distributeur de commande ; celui-ci dose le fluide hydraulique et l'achemine au vérin, qui positionne la gouverne de direction. Il est généralement possible d'avoir un contrôle mécanique limité sur la gouverne de direction en cas de défaillance du système hydraulique.

Enquête détaillée

13.8.23 L'enquête détaillée du système hydromécanique est très semblable à celle du système mécanique. Il est évident, d'après la description qui est donnée ci-dessus, que le système est constitué de câbles, de poulies, de guignols, de biellettes de commande et de tubes de torsion. Ces éléments doivent être retrouvés et examinés de la même manière que celle qui est décrite dans les § 13.8.19 à 13.8.21. La principale différence est que les interventions de l'équipage ne positionnent pas directement les gouvernes, mais ont plutôt pour effet d'acheminer le fluide hydraulique par l'intermédiaire des distributeurs de commande jusqu'aux vérins qui font le travail. Il est donc possible qu'il existe des indices additionnels sur le fonctionnement des commandes de vol et de position des gouvernes. La position des bras d'actionnement peut être figée à l'impact et leur course peut être mesurée pour déterminer la position de commande. Les points suivants s'appliquent directement au système de commandes de vol :

- a) Vérifier si l'alimentation électrique et l'alimentation hydraulique fonctionnaient pour le système de commandes de vol.
- b) Dans le cas des actionneurs commandés par câble, les câbles se détachent inégalement de l'aéronef au moment de l'impact et forcent généralement l'actionneur à aller jusqu'à la fin de sa course.
- c) Après la rupture des canalisations hydrauliques, la position des pistons dans les actionneurs peut être trompeuse. La perte de la pression hydraulique peut causer l'extension complète de certains actionneurs et la rétraction complète de certains autres.
- d) La pureté du fluide hydraulique est cruciale. La contamination du fluide hydraulique par des particules de sable, de la poussière ou de l'huile de silicone peut causer le dysfonctionnement des actionneurs ou un fonctionnement non commandé.
- e) De nombreux servomécanismes hydrauliques possèdent des servovalves qui sont centrées par des ressorts et qui retournent à leur position de détente ou de verrouillage lorsque la pression hydraulique tombe.
- f) Si le corps des actionneurs est en acier inoxydable plutôt qu'en aluminium, l'impact est moins susceptible de laisser des traces à l'intérieur. La probabilité de la présence de marques d'impact est directement proportionnelle à la force de l'impact.
- g) Toujours envisager la possibilité de vérifier le fonctionnement des servos et des actionneurs hydrauliques au banc d'essai. Il n'est pas toujours possible de déterminer d'après leur apparence si l'essai est possible ou non.

- h) Toujours photographier, radiographier et indexer les actionneurs avant de les démonter ou de couper le cylindre.

Système hydroélectrique

13.8.24 Le système de pointe en matière de commandes de vol électriques est un système d'augmentation du contrôle et de la stabilité à quatre canaux (quadruplex). L'effort exercé sur les commandes par le pilote est transmis par des signaux électriques sur quatre canaux plutôt que par une liaison mécanique. Le câblage est divisé en branches. Il y a de deux à quatre branches de chaque côté de l'aéronef pour éviter qu'un dommage d'un côté ne cause la perte du système. Les capteurs de déplacement minimal des commandes du poste de pilotage (essentiellement un ensemble fixe de levier de commande et de pédale de palonnier) convertissent les commandes du pilote en signaux électriques. Ces signaux de commande sont traités par un calculateur de commandes de vol avec les signaux provenant des gyroscopes, des accéléromètres et du système de données aérodynamiques, qui fournit les pressions dynamique et statique ainsi que l'angle d'attaque. Les signaux électriques traités sont transmis par câblage électrique aux vérins hydrauliques, qui transmettent ensuite le mouvement mécanique aux gouvernes.

13.8.25 Les procédures standard indiquées dans le présent chapitre s'appliquent aussi au système de commandes électriques vu que ce système utilise des actionneurs hydrauliques pour positionner les gouvernes. Cependant, après avoir obtenu tous les renseignements de l'examen et de l'analyse des actionneurs, l'enquêteur doit procéder à une analyse du système électrique et à l'extraction de données.

Vérins à vis

13.8.26 On peut obtenir la position des commandes à l'aide des vérins à vis retrouvés en comptant le nombre de filets exposés en sus de ceux qui sont associés à l'écrou ou au boîtier. Ce type de mécanisme n'est pas susceptible de changer après l'impact. Il existe des données techniques qui permettent de convertir le nombre de filets exposés en position de commande.

Systèmes de compensation

13.8.27 Les systèmes de compensation sont à commande mécanique ou électrique. Le système mécanique utilise des biellettes de commande, des poulies, des guignols et des tubes de torsion. Les techniques d'enquête pour ces systèmes sont semblables à celles qui sont exposées plus haut pour le système mécanique de commandes de vol. Dans un système électrique, un actionneur peut être utilisé pour positionner les volets de compensation. Dans ce cas, la position du volet peut être déterminée par la mesure du bras de l'actionneur. Dans la mesure du possible, mesurer la longueur d'ensemble ; le résultat est plus précis parce qu'il est possible d'éliminer les tolérances d'ajustement. Si le volet est positionné par un vérin à vis, compter le nombre de filets exposés comme il est indiqué ci-dessus. Dans un actionneur électrique il peut aussi être possible de vérifier le réglage de la butée. Les actionneurs de volets de compensation sont souvent très endommagés par l'impact. Envisager l'utilisation de la radiographie ou des rayons X pour déterminer la position de l'actionneur.

Pilotes automatiques

13.8.28 Le système type de commandes automatiques de vol (CADV) est un système électromécanique ou hydroélectrique conçu pour assurer la stabilité, la précision et la coordination des manœuvres de vol sans interférer avec les commandes manuelles. La plupart de ces systèmes maintiennent le cap et l'assiette choisies à l'intérieur des limites des CADV et corrigent, à l'intérieur de ces limites, tout écart par rapport au cap ou à l'assiette choisies. Le système comprend normalement un tableau de commande et un amplificateur, des accéléromètres et des gyromètres.

L'amplificateur de commande reçoit les signaux des divers capteurs du système et fournit l'alimentation aux éléments des commandes de vol. Les gouvernes sont positionnées par des servos de commande de vérins séparées ou par des servos intégrés aux vérins. Vu que la plupart des composants des CADV sont électriques, ils produisent peu d'informations utiles sur leur état de fonctionnement au moment de l'impact.

- a) Retrouver le plus grand nombre possible de composants et essayer de les tester au banc d'essai pour vérifier s'ils fonctionnent correctement.
- b) Noter la position des interrupteurs et des commutateurs du tableau CADV sans oublier que l'impact peut modifier la position des sélecteurs et des interrupteurs. Certains sélecteurs de fonctions CADV retournent à la position OFF sur perte de l'alimentation électrique. Vérifier si des voyants d'avertissement du poste de pilotage liés aux CADV sont allumés.
- c) Vérifier tous les servos CADV et les vérins correspondants. Dans la mesure du possible, vérifier les fonctions de déconnexion des servos pour déterminer s'ils sont capables de se déconnecter.
- d) Définir l'ampleur de l'enquête sur le pilote automatique en fonction de la contribution des CADV au scénario de l'accident. S'il est estimé que les CADV peuvent avoir contribué à l'accident et que les composants ne peuvent pas être vérifiés au banc, il faut faire appel à des experts pour déterminer si les défaillances se sont produites avant ou après l'impact.

Systemes d'augmentation du contrôle (CAS)

13.8.29 Le système CAS d'un aéronef est généralement superposé au système hydromécanique de commandes de vol. Le CAS type est un système à deux canaux et à trois axes. Il répond aux signaux électriques produits par l'effort exercé sur le levier de commande ou les pédales de palonnier. Ces signaux modifient l'angle de braquage des gouvernes commandé par le système hydromécanique pour fournir les qualités de vol recherchées. Le CAS augmente aussi l'amortissement dans les trois axes. Vu que les signaux CAS sont appliqués directement aux actionneurs de commande et qu'ils sont dus à l'effort exercé et n'exigent pas de mouvement de commande, le CAS permet de contrôler pleinement l'aéronef même avec la perte de tout ou partie des liaisons mécaniques. En cas de défaillance, la fonction de double canal désactive les axes.

- a) Vérifier la position des commutateurs sur le tableau de commande CAS, sans oublier que l'impact peut modifier la position des sélecteurs.
- b) Vérifier si des voyants liés au CAS sont allumés.
- c) Vérifier tous les servos CAS et essayer de déterminer leur état de fonctionnement.
- d) Vérifier toutes les connexions des servos avec les vérins.
- e) Consulter les experts s'il est estimé que les composants du CAS ne fonctionnaient pas correctement avant l'impact et que leur dysfonctionnement est lié à l'accident.

Note.— Les systèmes CAS fonctionnent à un nombre très élevé de cycles par seconde. À moins que l'impact n'ait lieu à très grande vitesse, la probabilité d'obtenir un grand nombre de renseignements utiles est très faible.

Systèmes d'augmentation de la stabilité (SAS)

13.8.30 Les SAS utilisent des gyromètres et des accéléromètres latéraux pour capter le changement de mouvement sur leurs axes respectifs et envoyer des signaux aux gouvernes pour compenser tout écart détecté par rapport à l'assiette de vol normale. Ce système réduit la tendance de l'aéronef à osciller en roulis, en lacet ou en tangage ou à développer des forces latérales qui causent des glissades et des dérapages.

- a) À l'aide des données techniques, examiner l'autorité du SAS pour déterminer s'il est capable de produire des positions de gouvernes qui pourraient être un facteur dans l'accident.
- b) Vérifier la position des commutateurs sur le tableau de commande SAS, sans oublier que leur position a pu être modifiée par les forces de l'impact.
- c) Vérifier si des voyants de commande ou d'avertissement liés au SAS se sont allumés à l'impact.
- d) Vérifier toutes les connexions des servos avec les vérins.
- e) Vérifier tous les servos SAS et essayer de déterminer leur état de fonctionnement.
- f) Consulter les experts s'il est estimé que les composants du SAS ne fonctionnaient pas correctement avant l'impact et que leur dysfonctionnement est lié à l'accident.

Note.— Les systèmes SAS fonctionnent à un nombre très élevé de cycles par seconde. À moins que l'impact n'ait lieu à très grande vitesse, la probabilité d'obtenir un grand nombre de renseignements utiles est très faible.

Éléments divers

13.8.31 Les éléments à commande électrique, tels que les électrovalves, les robinets de commande et les circuits avertisseurs doivent aussi être examinés. Certains robinets fonctionnent automatiquement en cas de dysfonctionnement ou de défaillance d'une servocommande ou d'un autre dispositif. Récupérer ces robinets et noter leur position. Noter aussi l'état du système de sensation artificielle et des amortisseurs.

Essais de fonctionnement des éléments des commandes de vol

13.8.32 Il est parfois possible de faire subir des essais de fonctionnement complets aux éléments hydro-mécaniques et électro-hydro-mécaniques, par exemple aux servocommandes et aux vérins du stabilisateur.

13.8.33 On peut concevoir des essais spéciaux qui fournissent des renseignements plus complets que les essais normaux. Par exemple, on peut contrôler le fonctionnement du vérin du stabilisateur dans certaines conditions de charge de l'empennage. Le vérin étant monté sur le banc d'essai, il est possible de lui imposer une charge statique en traction et en compression pour reproduire l'effet du débattement de la gouverne de profondeur dans les deux sens à certaines vitesses. On peut alors faire fonctionner les commandes hydrauliques, électriques et mécaniques pour déterminer la manière dont le vérin fonctionne dans ces conditions.

Systèmes de commandes de vol électriques

13.8.34 L'analyse des systèmes électriques de commandes de vol ou de commandes de moteur exige une combinaison de techniques : il faut évaluer le fonctionnement des capteurs et des transducteurs de commandes, vérifier la continuité et l'état du câblage, analyser les indices électromécaniques des servocommandes et vérifier les actionneurs hydrauliques, pneumatiques ou électriques tournants, selon le cas.

13.9 SYSTÈMES DE DÉTECTION ET DE PROTECTION INCENDIE

Détecteurs d'incendie

13.9.1 Les détecteurs d'incendie peuvent être des détecteurs à conducteur ininterrompu ou des détecteurs séparés branchés en série. Vérifier la continuité et la mise à la masse des circuits avertisseurs ainsi que la présence de courts-circuits ; vérifier le fonctionnement des relais du détecteur.

Note.— Les circuits de détection et d'extinction d'incendie deviennent de plus en plus complexes. Il peut donc être nécessaire de faire appel aux connaissances spécialisées et à l'équipement d'essai du constructeur.

Systèmes d'extinction d'incendie

13.9.2 Ces systèmes utilisent du dioxyde de carbone, du fréon ou, plus souvent, du halon. Les moteurs et les groupes auxiliaires sont normalement protégés contre l'incendie. Dans un grand nombre d'aéronefs plus anciens, les soutes situées sous le plancher sont également protégées. Dans le cas d'aéronefs équipés de réchauffeurs à combustion pour la climatisation et le circuit thermique d'antigivrage, les réchauffeurs sont également protégés contre l'incendie, généralement par un système à dioxyde de carbone.

13.9.3 Il faut retrouver les extincteurs et vérifier s'ils sont chargés. S'ils sont chargés, prendre les mesures nécessaires pour les conserver en lieu sûr afin d'éviter tout accident de personnes. S'ils sont déchargés, examiner les têtes pour déterminer si la décharge a été volontaire ou non. Dans certains cas, chaque extincteur peut diriger la décharge vers deux zones choisies par le membre d'équipage. Si tel est le cas, il est probable qu'une amorce électrique fonctionne encore et elle doit être désarmée par le personnel compétent. Il existe aussi des dispositifs de décharge à commande thermique ; ce point doit également être examiné. Des disques indicateurs sont placés dans les extincteurs ou près de la zone dans laquelle se trouve le système extincteur pour indiquer si la décharge a été volontaire ou si elle a été provoquée par la chaleur. Il convient de vérifier ces disques.

Extincteurs portatifs

13.9.4 Les extincteurs portatifs fonctionnent au dioxyde de carbone ou au halon. Il convient de les retrouver pour déterminer s'ils ont été utilisés. S'ils l'ont été, il ne faut rien négliger pour déterminer si l'utilisation a eu lieu avant l'accident ou au cours des opérations de sauvetage.

13.10 SYSTÈME DE PRESSURISATION

13.10.1 Les aéronefs qui volent habituellement au-dessus de 3 000 m (10 000 ft) sont normalement équipés d'un système d'oxygène, distribué par des masques ou des tubes (généralement dans les petits aéronefs), ou sont

pressurisés par un système de conditionnement d'air qui utilise l'air fourni par des compresseurs ou l'air de prélèvement. L'air de prélèvement, extrait des moteurs, est réchauffé par la compression puis refroidi par le passage dans un échangeur de chaleur et un groupe turborefroidisseur.

13.10.2 Dans la plupart des avions commerciaux modernes, la pressurisation est maintenue par un contrôleur électronique à deux canaux, appuyée par un système de secours manuel. Ces systèmes maintiennent une pression d'air équivalente à 2 500 m (8 000 ft) ou moins, même durant le vol aux altitudes supérieures à 13 000 m (43 000 ft). Les aéronefs sont équipés d'une soupape de sécurité de surpression au cas où il s'accumulerait une pression excessive dans la cabine. Ce système protège la structure contre les charges excessives. Normalement la différence de pression maximale entre la cabine et l'air extérieur se situe entre 51,7 et 55,2 kPa (7,5 et 8 psi). Si la cabine est maintenue à la pression atmosphérique au niveau de la mer et que l'aéronef vole à 10 700 m (35 000 pi) ou plus, la différence de pression sera supérieure à 62 kPa (9 psi) et la durée de vie structurelle de l'avion sera limitée.

13.10.3 Le système de conditionnement d'air assure une circulation constante d'air pressurisé et conditionné. Normalement, une petite quantité d'air s'échappe par les joints d'étanchéité des portes ou d'autres ouvertures. La pressurisation et la ventilation sont contrôlées par la modulation de la vanne de régulation et de la soupape d'échappement. Une défaillance de la pressurisation au-dessus de 3 000 m (10 000 ft) constitue toujours une situation d'urgence. Dans ce cas, le pilote doit immédiatement effectuer une descente forcée et déclencher les masques à oxygène pour tous les passagers. Il est estimé que deux accidents récents, d'un avion commercial en Europe et d'un avion d'affaires aux États-Unis, ont été causés par des problèmes de pressurisation qui ont fait perdre connaissance à l'équipage de conduite.

13.10.4 Si l'enquêteur soupçonne un problème de pressurisation, tous les éléments du système de pressurisation doivent être examinés. Il faut déterminer si le manque de pressurisation a été causé par une fuite d'air ou parce que le système de pressurisation ne fournissait pas assez d'air pour pressuriser l'aéronef. La cabine pressurisée, les joints d'étanchéité et les canalisations doivent être inspectés pour déterminer s'il y a des fissures ou des perforations. Il faut vérifier le bon fonctionnement du régulateur de pressurisation et des soupapes du système, y compris la vanne de régulation d'échappement. Il convient aussi d'examiner l'état du groupe turborefroidisseur et des différents capteurs du système ainsi que l'intégrité des canalisations.

Circuit d'oxygène du poste de pilotage

13.10.5 Dans les aéronefs modernes, le circuit d'oxygène du poste de pilotage comprend des masques/régulateurs à la demande, à dilution et à pose rapide, situés à chaque poste de membre d'équipage. L'oxygène est fourni par une seule bouteille qui est généralement située dans la soute avant. Une bouteille fournit l'oxygène à tous les membres de l'équipage de conduite. La pression d'oxygène est affichée sur un indicateur situé dans le poste de pilotage. Le débit d'oxygène est commandé par un régulateur fixé au masque ; il peut être réglé pour fournir 100 % d'oxygène. Le fonctionnement des masques et toutes les conduites et fixations entre la bouteille d'oxygène et le masque doivent être vérifiés. Comme le circuit d'oxygène de l'équipage de conduite est un système d'urgence, la redondance n'est pas obligatoire et une bouteille fournit l'oxygène à tous les membres de l'équipage de conduite. Durant la maintenance périodique, les bouteilles sont examinées, la quantité d'oxygène est vérifiée et les bouteilles sont remplacées au besoin. Les enquêteurs doivent vérifier le robinet (ON/OFF) de la bouteille pour s'assurer qu'il a bien été ouvert lors du remplacement. La circulation d'oxygène dans les masques est vérifiée avant le vol mais on a trouvé par le passé des bouteilles d'oxygène dont les robinets étaient fermés.

Bouteilles d'oxygène

13.10.6 Il faut retrouver les bouteilles d'oxygène destinées à l'équipage de conduite ainsi que les bouteilles d'oxygène portatives des passagers pour s'assurer qu'aucune de ces bouteilles n'a éclaté avant l'accident. Toute bouteille encore chargée doit être placée en lieu sûr pour éviter tout accident de personnes. Dans la mesure du possible, vérifier le contenu de la bouteille pour s'assurer que le gaz qu'elle contient est bien de l'oxygène et non un gaz toxique.

Circuits d'oxygène de la cabine de passagers

13.10.7 L'oxygène d'urgence provenant de générateurs chimiques d'oxygène est fourni aux passagers des aéronefs pressurisés pour les protéger de chutes de pression dans la cabine. Ces générateurs ne sont pas utilisés pour l'équipage de conduite. Des masques suspendus et des générateurs d'oxygène sont fournis pour chaque rangée de sièges. En cas de décompression, les panneaux s'ouvrent automatiquement au moyen d'un manocontacteur, ou peuvent être ouverts manuellement à l'aide d'un commutateur, et les masques sortent d'un compartiment situé au-dessus des sièges. Si l'enquêteur soupçonne un problème de pressurisation, il doit vérifier si le système a bien été activé et si les masques ont été utilisés par les passagers. Les générateurs d'oxygène doivent aussi être vérifiés pour s'assurer qu'ils étaient en bon état.

13.11 SYSTÈME DE TRAIN D'ATERRISSAGE

13.11.1 Le système de train d'atterrissage comprend les freins, les systèmes antidérapage, les roues et les pneus. Du point de vue de l'enquête, il est préférable de le considérer comme deux systèmes : celui de l'atterrisseur lui-même et celui des freins, systèmes antidérapage, roues et pneus.

13.11.2 En général, les problèmes de sortie ou de rentrée du train d'atterrissage ne sont pas liés aux problèmes d'accélération ou de décélération de l'aéronef.

13.11.3 Le train d'atterrissage doit absorber le choc de l'atterrissage. On utilise souvent des amortisseurs oléopneumatiques, dans lesquels l'huile est forcée à travers un orifice à un débit contrôlé permettant d'absorber les forces d'atterrissage. Certains aéronefs sont munis d'un amortisseur de type levier, qui est essentiellement un amortisseur oléopneumatique monté sur un levier, et d'autres utilisent un ressort en acier auquel est fixé le train d'atterrissage.

Train d'atterrissage fixe

13.11.4 En cas de défaillance du train d'atterrissage, il faut examiner les amortisseurs, les boulons de fixation et la structure de montage du fuselage. Vérifier si les boulons sont correctement installés, si la corrosion a réduit la résistance des matériaux ou s'il y eu rupture de fatigue des composants. Si l'inspection du train d'atterrissage ne révèle aucun problème, il faut soupçonner un atterrissage dur.

Train d'atterrissage rétractable

13.11.5 Les trains d'atterrissage rétractables modernes sont à commande hydraulique ou électrique. Certains aéronefs plus anciens ont des trains d'atterrissage à commande manuelle. Les systèmes comportent un dispositif pour empêcher de rentrer accidentellement le train lorsque l'avion est au sol. Sur certains aéronefs, cette fonction de sécurité peut être volontairement désactivée par le pilote. Ces systèmes comprennent aussi un dispositif de secours permettant de sortir le train en cas de défaillance du système. Dans le cas d'un train à commande hydraulique, ce dispositif peut être une autre source de pression hydraulique, une pression pneumatique provenant de bouteilles d'air ou un dispositif mécanique de déverrouillage des verrous de position rentrée pour laisser le train sortir de son propre poids. Dans le cas de trains à commande électrique, la méthode de secours utilisée consiste généralement à déverrouiller mécaniquement les verrous de position rentrée et à laisser sortir le train de son propre poids. Certains systèmes exigent de tourner manuellement une manivelle après le déverrouillage du train pour le sortir complètement et enclencher le verrou de position sortie.

13.11.6 Il y a dans le poste de pilotage une combinaison d'indicateurs et de voyants qui permettent au pilote de suivre la position du train d'atterrissage. Un avertisseur sonore se déclenche si les manettes ou leviers de puissance sont ramenés en-deçà d'un certain point et le train d'atterrissage n'est pas sorti. Parfois la position des volets déclenche aussi l'avertisseur sonore.

13.11.7 La plupart des trains d'atterrissage modernes comportent des microcontacts ou des interrupteurs masse-sur-roues qui se ferment lorsque le train est sorti et le poids de l'avion porte sur le train. De nombreux autres systèmes peuvent être connectés par l'intermédiaire de ces microcontacts et ils ne fonctionnent pas correctement s'il y a défaillance des microcontacts.

13.11.8 Les trains d'atterrissage rétractables peuvent présenter d'autres problèmes. La sortie du train cause généralement des moments de tangage et de traînée dont l'enquêteur doit tenir compte. La rentrée ou la sortie du train d'atterrissage à des vitesses supérieures à celles qui sont indiquées sur les affichettes peut causer des dommages structuraux, particulièrement aux trappes de train d'atterrissage et aux raccordements. Un train d'atterrissage a trois positions : rentré, en mouvement et sorti. L'examen des verrous de position rentrée et de position sortie devrait permettre de déterminer la position du train d'atterrissage. Si ces verrous ne sont pas endommagés, le train était probablement en mouvement. Corréler ces informations avec d'autres indicateurs tels que les vérins, le levier de commande de train et les voyants ou indicateurs de position de train.

Verrous de position train rentré et train sorti

13.11.9 Ces dispositifs peuvent être des liaisons mécaniques qui sont rentrées ou sorties par rapport à une position en arc-boutement. Sur des aéronefs plus petits, une goupille commandée par solénoïde peut être insérée dans le dispositif de verrouillage train sorti pour éviter que les forces d'atterrissage ne fassent tourner la liaison en arc-boutement et causent un affaissement du train. La première étape de l'actionnement du sélecteur de train d'atterrissage consiste à déverrouiller le verrou approprié et à permettre au système de déplacer le train en passant par la position en mouvement.

13.11.10 Certains aéronefs équipés de mécanismes hydrauliques n'ont pas de liaison de verrouillage mécanique en arc-boutement. Ils utilisent la pression hydraulique pour maintenir le train dans la position choisie, notamment dans la position sortie, où les vérins hydrauliques servent aussi d'amortisseurs au moment du toucher des roues du train arrière.

13.11.11 Souvent, les gros aéronefs n'ont pas de dispositif de verrouillage de position rentrée et laissent la pression hydraulique se décharger une fois que les trappes du train d'atterrissage sont fermées. Dans ce cas, en fait, le train d'atterrissage peut baisser pour s'appuyer contre les trappes durant la croisière. En cas de sortie d'urgence du train, les trappes sont déverrouillées et le train peut se mettre en position sortie.

Roues

13.11.12 Les roues des aéronefs sont faites d'un alliage de magnésium, d'aluminium ou d'acier. Elles fonctionnent dans un environnement à hautes contraintes et sont soumises à la corrosion et aux dommages mécaniques durant le montage des pneus et le service normal. Presque toutes les roues modernes sont composées de deux parties, qui sont raccordées par des boulons juste au-dessous des jantes. En raison des tolérances de fabrication, il est essentiel que les deux moitiés de la roue portent le numéro de pièce et le numéro de fabricant correspondant à chaque moitié. Les roues contiennent la valve de gonflage du pneu, les bouchons fusibles conçus pour fondre et libérer la pression du pneu et peuvent contenir des soupapes de surpression pour décharger les pressions excessives de gonflage.

13.11.13 Les roues des aéronefs sont conçues pour la masse maximale en opérations, la masse maximale à l'atterrissage, les conditions d'atterrissage prévues et des performances d'arrêt maximales. Il n'est pas prévu que, dans leur environnement opérationnel normal, la durée de vie de roues soit la même que celle de l'aéronef et elles ont des limites d'utilisation en temps ou en cycles.

Freins

13.11.14 Les freins des aéronefs sont des dispositifs qui absorbent l'énergie mécanique et la convertissent en chaleur. La plupart des freins des aéronefs modernes sont à disque simple ou à disques multiples. Dans le type à disque simple, un ou plusieurs pistons à commande hydraulique appliquent une force sur un disque rotatif solidaire de la roue. Dans les systèmes multidisques, des actionneurs hydrauliques appuient un empilement de un ou plusieurs disques statiques (stators) sur un empilement de un ou plusieurs disques rotatifs (rotors). La pression appliquée est généralement fonction de la pression exercée sur les pédales de freins dans le poste de pilotage. Dans les aéronefs à double poste de pilotage, l'actionnement d'un ensemble de pédales peut désactiver l'autre ensemble. Dans certains aéronefs, les deux ensembles peuvent être utilisés en même temps et l'effet s'additionne, c'est-à-dire que la pression totale appliquée aux freins est la somme des pressions appliquées aux deux ensembles de pédales.

13.11.15 Certains aéronefs ont un dispositif de freinage de secours qui utilise la pression utilisée par les accumulateurs des freins ou des bouteilles d'air de secours. Une caractéristique des systèmes de freinage de secours est que le nombre d'applications des freins est limité, mais chaque application est effective jusqu'au relâchement des freins.

13.11.16 Le freinage des aéronefs produit une quantité considérable de chaleur. La plupart des manuels de vol ont des tableaux des limites d'énergie de freinage qui donnent la production de chaleur en fonction du poids brut, de la vitesse, de la distance d'arrêt, etc. Vu que les roues n'atteignent les températures maximales que quelques minutes après l'application des freins et que l'effet des applications de freins suivantes est cumulatif, il peut être nécessaire de tenir compte de la distance et du temps de roulement précédents dans le calcul des températures de pointe des freins.

13.11.17 Le problème de la surchauffe des freins peut conduire à d'autres problèmes. Les roues modernes sont munies de bouchons fusibles qui fondent et libèrent la pression avant que le pneu n'éclate. Dans certains systèmes, les freins peuvent produire suffisamment de chaleur pour faire fondre les joints toriques des pistons des freins hydrauliques et créer une fuite de fluide hydraulique. Cette fuite est inévitablement suivie d'un incendie, car les freins sont suffisamment chauds pour enflammer le fluide hydraulique normal et probablement aussi le fluide hydraulique « résistant au feu ».

13.11.18 Dans tous les cas, les meilleurs freins ne peuvent qu'arrêter les roues de tourner. La véritable force qui fait arrêter l'aéronef vient du frottement des pneus sur la piste.

Pneus

13.11.19 Les pneus des aéronefs sont conçus pour résister à de très hautes vitesses et à de très fortes charges statiques et dynamiques, de manière intermittente. Les pneus des automobiles, par comparaison, sont conçus pour des vitesses et des charges beaucoup plus faibles mais sont faits pour rouler continuellement à une température stable. Les pneus des avions ne résisteraient pas à un roulement continu.

13.11.20 Les pneus sont identifiés par leurs dimensions et leur équivalent nappes (PR pour *ply rating*). L'équivalent nappes est l'indice de robustesse du pneu et ne correspond pas nécessairement au nombre réel de nappes du pneu. Presque tous les pneus actuellement utilisés sont sans chambre à air. Les caractéristiques de robustesse d'un pneu (par dimensions et équivalent nappes) sont spécifiées en fonction de la vitesse maximale, de la charge maximale, de la pression maximale de freinage soutenu et de la charge approximative requise pour affaïsser un pneu jusqu'à la jante.

13.11.21 La pression de gonflage des pneus est généralement spécifiée par le fabricant et représente la pression requise pour soutenir la charge nominale. Le sous-gonflement correspond généralement à toute valeur inférieure à 95 % de la pression requise, ce qui pose certains problèmes vu que les conditions de mesure de la pression (température du pneu, par exemple) combinées aux tolérances du dispositif de mesure peuvent dépasser les tolérances de gonflage. Le sous-gonflement conduit à un endommagement progressif et irréversible des pneus et à leur éclatement éventuel à un

moment donné. Les indices d'un sous-gonflement des pneus sont rarement visibles jusqu'à la défaillance du pneu. Les dommages que le sous-gonflement peut causer à un pneu ne se produisent pas nécessairement durant le vol au cours duquel se produit la défaillance du pneu.

Systèmes antidérapage et de protection de mise en rotation des roues

Systèmes antidérapage

13.11.22 La force maximale de freinage d'un aéronef est atteinte à environ 10 % du dérapage des roues. Si la roue se bloque (dérapage complet), la force de freinage est considérablement réduite parce que les particules de caoutchouc qui se détachent du pneu font office de rouleaux et lubrifient le dérapage. Un dérapage avec les roues bloquées fait aussi perdre la commande de direction et il est probable que les pneus d'aéronef ne survivront pas au dérapage, quelle qu'en soit la durée. Le dispositif antidérapage permet au pilote d'appliquer les freins à fond immédiatement après le toucher des roues. La fonction de protection de mise en rotation des roues interdit toute application de pression sur les freins jusqu'à ce que les roues entrent en rotation durant la prise de contact avec le sol. Les détecteurs placés sur chaque roue détectent ensuite les conditions de dérapage et libèrent la pression des freins jusqu'à ce que la roue recommence à tourner.

13.11.23 Les systèmes antidérapage ont généralement une limite inférieure de vitesse en-deçà de laquelle il n'y a aucune protection antidérapage parce que les pneus peuvent être accidentellement soumis à une séquence de freinage, d'entrée en dérapage, de libération de pression et de réapplication des freins tellement rapide qu'il serait effectivement impossible de freiner. Aux basses vitesses, le pneu est généralement capable de supporter le freinage sans surchauffer et il est préférable de ne pas appliquer l'antidérapage.

13.11.24 Dans certains aéronefs, le système est réglé pour libérer la pression dans les paires de roues sur les deux trains d'atterrissage afin de faciliter la commande de direction. Il permet ainsi de toujours obtenir une efficacité maximale de freinage et d'arrêt.

13.11.25 Selon le système et l'aéronef, le fonctionnement de l'antidérapage est décrit comme une titubation ou comme une vibration imprévue du train d'atterrissage, et parfois comme la sensation d'avoir perdu la maîtrise du freinage. Cette sensation est probablement due au fait que l'application plus à fond des freins pendant le cycle d'antidérapage ne produit pas l'augmentation attendue de la force de freinage, ce qui a conduit certains équipages de conduite à conclure que l'antidérapage ne fonctionnait pas convenablement et qu'il devait être désactivé.

13.11.26 Les systèmes antidérapage peuvent être activés ou désactivés depuis le poste de pilotage et un grand nombre d'entre eux sont dotés d'une fonction d'autotest et de sécurité intégrée qui ramène automatiquement le système au freinage manuel sans protection. L'état de certains systèmes est indiqué par un voyant tandis que pour d'autres systèmes la seule indication est la position du sélecteur.

Protection de mise en rotation

13.11.27 Normalement, les aéronefs équipés de systèmes antidérapage sont aussi équipés d'un système qui permet aux roues d'accélérer complètement jusqu'à la vitesse de l'aéronef après le toucher des roues avant d'autoriser le système antidérapage à appliquer la force de freinage maximale. Ce dispositif empêche aussi le pilote d'appliquer accidentellement la pression de freinage avant d'atterrir, ce qui risquerait de faire éclater les pneus.

Systèmes combinés dans un bogie

13.11.28 Dans un bogie en tandem, la protection de mise en rotation et la protection antidérapage peuvent être attribuées à des roues différentes : comme les roues avant sont plus susceptibles d'aquaplaner, elles sont équipées du détecteur du système antidérapage et comme les roues arrière sont les premières à toucher la piste au moment de

l'atterrissage, elles sont équipées du détecteur de protection de mise en rotation. Cette combinaison permet à l'ensemble du bogie de fonctionner comme un système intégré et d'assurer un freinage optimal.

Aquaplanage

13.11.29 Tous les pneus, quelles que soient les sculptures de la bande de roulement, aquaplanent sur l'eau (ou sur tout autre liquide) lorsque la pression dynamique de l'eau est suffisamment élevée pour soulever le pneu de la piste. Les dessins de ces sculptures sont conçus pour évacuer l'eau et ils sont efficaces parce qu'ils augmentent la profondeur de l'eau nécessaire pour amorcer l'aquaplanage (aquaplanage partiel), mais l'aquaplanage dynamique se produira tout de même à une vitesse spécifique. Il existe trois types d'aquaplanage.

Aquaplanage dynamique

13.11.30 L'aquaplanage dynamique est causé par une accumulation de pression hydrodynamique au point de contact entre le pneu et la chaussée. La pression crée une force qui soulève effectivement le pneu de la surface. Lorsque le pneu est complètement séparé de la chaussée, il se produit un aquaplanage dynamique total et la rotation des roues s'arrête. Lorsque la roue tourne librement à une vitesse fixe sur une piste sèche, la réaction verticale du sol se déplace pour s'exercer à l'avant de l'essieu et il se développe un dégyration qui présente une résistance à la rotation de la roue. Lorsque ces deux moments sont égaux, la roue tourne à une vitesse constante.

- a) La présence d'eau sur la piste conduit à l'aquaplanage dynamique. Une nappe d'eau profonde crée une traînée supplémentaire sur le pneu lorsqu'il est déplacé de son chemin et l'eau est vaporisée. À mesure que la vitesse d'avancement de l'aéronef augmente, le cône de vaporisation créé par le pneu diminue et une lame d'eau pénètre dans la zone de contact entre le pneu et le sol et produit une force hydrodynamique qui soulève le pneu. C'est l'aquaplanage partiel. À mesure que la vitesse augmente, le cône de vaporisation s'aplanit et la lame d'eau pénètre plus profondément dans la zone de contact entre le pneu et le sol, jusqu'à une vitesse d'avancement suffisamment élevée pour séparer complètement le pneu de la chaussée et produire l'aquaplanage total. Le frottement avec le sol diminue progressivement à mesure que l'eau pénètre sous le pneu. Il se rapproche de zéro lors de l'aquaplanage total et le moment de dégyration arrête la rotation de la roue. Aucun freinage n'est évidemment possible quand la roue n'est plus en contact avec la piste et ne tourne plus.
- b) L'aquaplanage dynamique total est plus un problème d'atterrissage que de décollage, mais les décollages par vent de travers sont dangereux dans ces conditions. La vitesse approximative à laquelle se produit l'aquaplanage dynamique total est :

$$V_h = 9\sqrt{P}$$

où:

V_h = vitesse d'aquaplanage (nœuds) ;

P = pression de gonflage des pneus (lb/in²)

En général, l'aquaplanage dynamique total ne se produit pas à moins qu'il n'y ait une forte pluie en cours. La couche d'eau qui se trouve sur la piste doit avoir une profondeur minimale pour supporter le pneu. La profondeur exacte ne peut pas être prévue étant donné que des facteurs tels que la régularité de la piste et les sculptures des pneus ont aussi une incidence sur l'aquaplanage dynamique. Une surface de piste lisse et des pneus lisses amorcent l'aquaplanage avec une couche d'eau moins profonde. Même si la profondeur exacte de la couche d'eau nécessaire pour causer l'aquaplanage n'a pas été déterminée avec précision, un estimé prudent pour une piste moyenne est qu'une couche d'eau supérieure à 2,54 mm (0,1 po) peut amorcer l'aquaplanage.

Une autre caractéristique de l'aquaplanage est que le pneu finira par arrêter de tourner, même sans freinage, ce qui rend inutile toute tentative de freinage jusqu'à ce que l'aéronef ralentisse. Comme un pneu qui ne tourne pas accumule devant lui un front d'eau et que l'absence de rotation ne permet pas d'évacuer cette eau, l'aquaplanage total continuera jusqu'à ce que la vitesse soit réduite à :

$$V_h = 7,7\sqrt{P}$$

Si la profondeur de la couche d'eau est suffisante pour que les forces de toucher des roues ne pénètrent pas jusqu'à la surface d'atterrissage, il n'y aura pas de mise en rotation des pneus et l'aquaplanage peut se produire immédiatement. Le freinage sera donc retardé jusqu'à ce que l'aéronef atteigne la vitesse pour un pneu sans rotation.

Aquaplanage visqueux

13.11.31 L'aquaplanage visqueux est plus fréquent que l'aquaplanage dynamique. Il peut se produire à des vitesses plus faibles et avec des couches d'eau moins profondes que l'aquaplanage dynamique. L'aquaplanage visqueux se produit lorsque la surface est lubrifiée par une mince pellicule d'eau. Le pneu est incapable de pénétrer cette pellicule et perd partiellement le contact avec la chaussée. L'aquaplanage visqueux se produit souvent sur une chaussée lisse ou sur une chaussée qui contient des dépôts de caoutchouc, généralement dans la zone de toucher des roues où cette mince pellicule d'eau peut considérablement réduire le coefficient de friction.

Aquaplanage dû à la dévulcanisation du caoutchouc

13.11.32 Le troisième type d'aquaplanage est l'aquaplanage dû à la dévulcanisation du caoutchouc. Il se produit lorsque la chaleur produite durant un dérapage roues bloquées change l'eau en vapeur et dévulcanise le caoutchouc. Des traces blanches sur la piste, causées par l'effet « nettoyant » de la vapeur, sont une indication de ce type d'aquaplanage. L'examen des pneus de l'aéronef montre un caoutchouc collant ou fondu de forme elliptique.

13.12 SYSTÈME DE CARBURANT

Renseignements généraux

13.12.1 Le système de carburant est essentiel au fonctionnement de l'aéronef. Toute interruption du débit du carburant peut avoir des résultats catastrophiques en raison de la perte de puissance et de la situation d'urgence qui s'ensuivent. Des accidents d'aéronefs multimoteurs se sont produits parce que l'équipage de conduite a été incapable de gérer la défaillance du circuit carburant d'un moteur.

13.12.2 Les problèmes du système de carburant peuvent se produire très tôt dans la chaîne d'événements menant à un accident, même si dans des circonstances différentes l'événement causerait à peine un incident. Dans ces cas, l'enquête doit faire une analyse complète du système de carburant pour trouver les problèmes qui ont pu mener à l'accident.

Types de carburant

AVGAS

13.12.3 L'AVGAS n'est actuellement utilisé que par les aéronefs à moteurs alternatifs. Certains problèmes des gros aéronefs peuvent être dus à la disponibilité limitée du carburant 115/145 au plomb à indice d'octane élevé requis par les gros aéronefs tels que le Douglas DC-6 (Skymaster) et le Lockheed Constellation (Connie), largement utilisés dans les années 1950. Les plus petits moteurs ont été reconfigurés dans la mesure du possible pour utiliser les carburants AVGAS à indice d'octane 80, 100 ou 100 LL (faible teneur en plomb), plus faciles à obtenir. Des problèmes importants peuvent survenir lorsqu'un aéronef utilise le mauvais type de carburant : allumage prématuré, déflagration et même défaillance complète du moteur.

Fractions kérosène (faible volatilité) Jet A, Jet A-1, JP-8 et JP-5

- 13.12.4 a) Le carburéacteur Jet A-1 et le JP-8 sont essentiellement les mêmes, le JP-8 ayant des additifs supplémentaires. Ce carburant est très utilisé en aviation commerciale, particulièrement à l'extérieur des États-Unis. Il s'agit d'un carburant à base de kérosène avec un point de congélation (-50 °C) supérieur à celui du JP-4 (-58 °C), mais inférieur à celui du JP-5 (-46 °C).
- b) JP-5. Ce carburant à base de kérosène a un point d'éclair (environ 145 °F) supérieur à celui du JP-4. Il n'est pas conforme aux normes de basse température et ne contient pas les additifs du JP-4. Il est légèrement plus dense que le JP-4.

Mélanges de kérosène (haute volatilité) Jet B, JP-4

13.12.5 Le Jet B est un mélange coupe large de kérosène et d'essence, et a été choisi parce qu'il répond généralement au besoin de rendement énergétique élevé. Le carburéacteur commercial Jet B est semblable au JP-4, mais normalement ne contient pas d'additifs. Les additifs pour contrôler ou alléger certains problèmes éventuels, comme le givrage du circuit carburant, la corrosion ou l'électricité statique, figurent dans la spécification militaire (MIL-T-5624L). Cette spécification doit être consultée pour connaître les exigences actuelles.

Autres carburants

13.12.6 Les enquêteurs ne doivent pas oublier que les aéronefs militaires utilisent parfois des carburants spécialisés pour répondre à des conditions d'exploitation et un environnement spécifiques. Par conséquent, s'il est soupçonné que le carburant est un facteur dans un accident et que ce carburant n'est pas conforme aux spécifications des carburants de l'aviation civile, il est possible qu'il s'agisse d'un carburant d'aviation militaire.

Sources de carburant

13.12.7 Des échantillons de carburant doivent être prélevés du véhicule ou de la source d'avitaillement du dernier avitaillement en carburant afin de déterminer si le carburant avait la qualité et le type requis.

Caractéristiques électriques des carburants

13.12.8 Les carburants ont des caractéristiques électriques qui peuvent être importantes pour les enquêteurs. Dans des conditions de haut débit de carburant, il est possible qu'il se crée une charge électrostatique ayant une énergie suffisante pour constituer une source d'inflammation. Les propriétés diélectriques du carburant ont aussi une incidence sur le fonctionnement du système de jaugeage carburant.

Constante diélectrique

13.12.9 La constante diélectrique du carburant diminue linéairement avec l'augmentation de la température. Il faut donc étalonner les dispositifs de jaugeage en fonction du carburant particulier utilisé.

Conductivité électrique

13.12.10 Les carburéacteurs de base sont essentiellement non conducteurs. Leur conductivité augmente avec la présence de traces d'impuretés, mais elle demeure quand même très faible.

13.12.11 Cette propriété peut créer une situation très dangereuse dans la manipulation et le transfert des carburants. Un carburant qui s'écoule tend à s'électriser en raison d'un mécanisme appelé séparation de charge. Ce phénomène peut créer des niveaux élevés de charges électrostatiques à l'intérieur du carburant qui ne peuvent pas se dissiper en raison de la faible conductivité du carburant. Ces charges peuvent s'accumuler jusqu'à des niveaux suffisamment élevés pour causer une décharge statique dans les vapeurs du réservoir. Si les conditions sont favorables, les vapeurs peuvent s'enflammer.

13.12.12 Les causes et les résultats d'une accumulation d'électricité statique sont complexes et variés. Les facteurs sont notamment les zones de contact dans les séparateurs de filtres, le temps de détente nécessaire pour que la charge se dissipe, les éléments en saillie dans les canalisations d'écoulement, les niveaux d'impuretés dans le carburant et la conception du système carburant. Une partie fondamentale du problème est la faible conductivité des carburants. Le niveau de conductivité d'un carburant devrait être évalué en laboratoire lorsque des incendies de réservoirs de carburant jouent un rôle dans l'accident.

Circuits carburant et leurs éléments

Stockage et alimentation carburant

13.12.13 Les réservoirs des avions modernes sont principalement de trois types : aluminium soudé, aile-réservoir ou intégral, et réservoir souple. Les critères de conception des avions exigent une deuxième barrière en cas de fuite de carburant qui pourrait s'introduire dans le moteur ou les zones occupées par l'équipage de conduite. Toute fuite de carburant doit s'échapper vers l'extérieur.

- a) Les réservoirs en aluminium soudé sont autonomes et sont logés et fixés dans un cadre support.
- b) L'aile-réservoir ou le réservoir intégral est une construction métallique ou composite avec des joints étanchés à l'aide d'un produit résistant aux carburants.
- c) Les réservoirs souples sont faits de matériaux résistants aux déchirures, généralement de nylon recouvert de caoutchouc et de caoutchouc nitrile. Ils sont habituellement placés dans un compartiment résistant à l'abrasion ; ils sont construits pour prendre la forme d'une cavité spécifique et sont fixés principalement à l'aide de brides, de Velcro et d'attaches. On a trouvé certains réservoirs souples qui avaient un pli en diagonale formé après l'installation, empêchant l'eau de s'écouler complètement dans le dispositif d'évacuation rapide.

13.12.14 Le circuit type d'alimentation en carburant comprend deux sous-circuits : le réservoir de l'aile gauche et le réservoir principal gauche alimentent le moteur gauche et le réservoir de l'aile droite et le réservoir principal droit alimentent le moteur droit. Les circuits de gauche et droite peuvent être interconnectés par des robinets d'intercommunication afin de permettre d'alimenter les deux moteurs et le groupe auxiliaire de puissance (APU) depuis un côté comme de l'autre. En outre, les deux réservoirs principaux peuvent être interconnectés en ouvrant un robinet-vanne pour permettre d'égaliser le carburant par gravité dans les deux réservoirs. Les APU peuvent recevoir le carburant d'un réservoir principal ou des deux.

13.12.15 La pression de suralimentation est fournie par des pompes de suralimentation CA situées dans chaque réservoir principal et dans le réservoir de chaque aile. Une pompe de suralimentation CC, située dans le réservoir principal gauche et alimentée par le bus essentiel CC, est utilisée durant le démarrage du moteur et de l'APU si la pompe principale gauche ne fonctionne pas.

Bouchons d'avitaillement

13.12.16 Les bouchons d'avitaillement sont conçus pour permettre le remplissage maximal de chaque réservoir et empêcher l'eau ou d'autres contaminants d'entrer dans le réservoir. De nombreux aéronefs ont été équipés de bouchons de remplissage à ras de surface et à faible traînée. Lorsque les joints d'étanchéité se détériorent ou le bord de métal se corrode dans la zone du joint d'étanchéité, l'eau peut pénétrer dans les réservoirs. Dans les aéronefs de l'aviation générale qui ne sont pas très pénalisés par la traînée, les bouchons des réservoirs sont complètement recouverts et font saillie sur la surface de l'aile ; l'eau est ainsi acheminée sous l'entrée du réservoir de carburant.

Circuit d'avitaillement

13.12.17 Le circuit d'avitaillement de l'aéronef passe soit par des bouchons d'avitaillement individuels, soit par un système de distribution qui permet de remplir tous les réservoirs de carburant à partir d'une prise unique.

13.12.18 Les bouchons d'avitaillement sont normalement conçus pour être verrouillés avec un levier repliable situé dans le sens de l'écoulement de l'air afin d'empêcher que le levier ne soit relevé par le souffle aérodynamique. Un bouchon mal verrouillé ou qui se déverrouille par le relèvement du levier laissera très probablement le carburant s'échapper à l'extérieur. Les bouchons d'avitaillement se trouvent souvent à des endroits que l'équipage de conduite ne peut pas voir et il ne peut donc pas s'apercevoir de la fuite du carburant. Lorsque les réservoirs sont remplis individuellement par l'extrados au moyen de ces types de bouchons, il est possible que l'avitaillement doive être fait dans un ordre précis afin d'éviter un déversement de carburant d'un réservoir inférieur en cas d'ouverture de ce réservoir après l'arrivée du carburant. Il est possible que le fuselage doive avoir un angle particulier pour que le réservoir se remplisse complètement. Il est arrivé, par exemple, que le Cessna 210 manque sérieusement de carburant parce que les réservoirs ne se remplissaient pas complètement si le pilote ou le personnel d'avitaillement ne s'assurait pas que l'avion était complètement de niveau avant l'avitaillement.

13.12.19 Les systèmes d'avitaillement par prise unique sont largement utilisés dans les avions de transport commercial et les avions militaires. Dans ces systèmes, le carburant est distribué dans tous les réservoirs disponibles à l'aide d'un système de transfert de carburant ou d'un système de distribution distinct. Le tuyau d'avitaillement est raccordé à l'aéronef au moyen d'une soupape champignon qui empêche toute perte de carburant lorsque le tuyau est déconnecté. La pression du carburant, comme la fonction du circuit de mise à l'air libre, sont essentielles au succès de ce type d'avitaillement. Une fuite dans un système de distribution peut causer une accumulation de carburant à un endroit où il peut présenter un danger important.

Système de largage du carburant

13.12.20 Les gros aéronefs sont souvent équipés d'un système de largage du carburant afin de réduire la masse brute de l'aéronef pour faciliter un atterrissage d'urgence. Ces systèmes sont fondés sur deux principes : la quantité de carburant qui reste après le largage doit permettre une approche et un atterrissage normaux (à la masse maximale à l'atterrissage certifiée ou près de cette masse) et le largage du carburant ne doit avoir aucune incidence négative sur les caractéristiques de manœuvrabilité de l'aéronef. Les systèmes ne doivent donc larguer le carburant que de certains réservoirs et, s'il y a plus d'une série de réservoirs, le carburant doit être largué dans un ordre précis.

13.12.21 Le système de largage utilise un ensemble de pompes particulier ou fonctionne par l'application d'une pression d'air supplémentaire au(x) réservoir(s). Le carburant est ensuite acheminé à vers un drain profilé qui largue le carburant dans le sillage.

Mise à l'air libre

13.12.22 Le système de mise à l'air libre a deux fonctions : égaliser la pression entre l'intérieur et l'extérieur de chaque réservoir de carburant (dans toutes les assiettes de vol, à toutes les altitudes et dans toutes les conditions météorologiques) et empêcher le carburant de sortir du réservoir lorsque l'aéronef est avitaillé ou qu'il est stationné sur un terrain en pente.

13.12.23 Tout blocage des tuyaux ou des clapets de mise à l'air libre peut créer une différence de pression inacceptable sur la paroi du réservoir. Vu que la paroi du réservoir est normalement la structure principale, sa défaillance peut être catastrophique, mais un dommage moindre, s'il n'est pas détecté, peut devenir un facteur qui contribue à un accident.

13.12.24 Un dysfonctionnement courant du système de mise à l'air libre est l'accumulation de givre provenant de précipitations avant le vol ou de l'accumulation de givre pendant le vol. La mise à l'air libre est souvent située derrière l'extrémité supérieure du mât porteur sur les avions à ailes hautes de l'aviation générale. Il s'agit de simples tubes d'aluminium qui sortent de l'intrados de l'aile et se recourbent à 90° pour pointer vers l'avant. L'emplacement de ce dispositif est crucial. S'il est placé incorrectement, la possibilité de givrage augmente et le réservoir peut être surpressurisé par l'air dynamique. Par exemple, la tolérance pour l'emplacement du tube de mise à l'air libre sur le Cessna 185 est très faible, soit $\pm 0,76$ mm ($\pm 0,03$ po).

13.12.25 L'autre fonction de la mise à l'air libre est assurée par un clapet antiretour. Lorsque le carburant se réchauffe quand l'aéronef est stationné, il se dilate et le réservoir pourrait se rompre s'il n'y avait pas de décharge de la pression, mais le carburant ne doit pas pouvoir s'échapper librement par l'orifice. Dans certains aéronefs, les clapets antiretour ont un petit orifice qui permet l'équilibrage de l'air et la fuite d'une petite quantité de carburant.

13.12.26 Certaines défaillances ou blocages peuvent causer la perte du carburant à l'extérieur, ce qui peut conduire à d'autres problèmes tels qu'un risque supplémentaire d'incendie, un déséquilibre du carburant ou une perte d'autonomie.

Canalisations

13.12.27 Les canalisations du carburant sont légères et très fiables. Elles sont faites de divers matériaux, mais le plus courant est un alliage d'aluminium.

13.12.28 Vu l'inflammabilité du carburant, il est particulièrement important que les canalisations et les fixations soient bien installées et bien entretenues. Une petite fuite de carburant dans un espace fermé peut produire une atmosphère explosive qui peut facilement s'enflammer.

13.12.29 Les conduites de carburant sont acheminées et fixées de manière à ne pas être endommagées par les vibrations, l'abrasion ou le frottement.

13.12.30 Les conduites de carburant sont séparées du câblage électrique. Lorsque cette séparation est impossible, comme dans les ouvertures des cloisons, les conduites de carburant et le câblage électrique peuvent être acheminés ensemble. Les conduites sont situées sous le câblage et fermement fixées à la structure de l'aéronef. Le câblage ne doit pas être supporté par la conduite de carburant et doit être fixé séparément à la structure de l'aéronef.

Tuyaux souples

13.12.31 Les tuyaux souples sont utilisés pour raccorder les tuyauteries aux endroits où il y a mouvement, de manière à isoler les éléments des vibrations de l'aéronef ou de changements structurels en vol. Un tuyau souple type est fait de caoutchouc synthétique, renforcé d'une tresse de fibres incorporée dans un liant. Les tuyaux utilisés dans les zones à haute température ont un revêtement extérieur supplémentaire constitué d'une tresse métallique et ont

généralement une plage de températures de fonctionnement de -40 à 149 °C (-40 à $+300$ °F). Certains tuyaux sont remplacés périodiquement tandis que d'autres ne sont remplacés qu'en cas de rupture ou lorsqu'ils sont endommagés.

Filtres

13.12.32 Le système carburant compte généralement trois points de filtration ou plus avant que le carburant n'arrive au moteur. Le carburant est encore filtré à l'intérieur du circuit carburant du moteur pour éviter toute contamination des composants à faible tolérance du circuit carburant du moteur.

13.12.33 La pompe du réservoir d'alimentation est munie d'un filtre à grosses mailles pour retenir les gros contaminants. Certains contaminants peuvent rester dans les réservoirs après la fabrication ou la maintenance et d'autres peuvent y être introduits durant l'avitaillement.

13.12.34 Les filtres principaux sont situés près des accessoires du moteur au point le plus bas du circuit carburant. Ces filtres ont un avertissement de dérivation qui est vérifié par le personnel de maintenance à intervalles fréquents. Cette dérivation permet de maintenir le fonctionnement à court terme, mais impose une charge de filtration plus grande aux filtres en aval.

13.12.35 Il y a des filtres à l'intérieur du circuit carburant du moteur et de régulateur de carburant. Ces filtres sont très petits et sont utilisés pour filtrer les plus petits contaminants. S'ils sont bloqués par des contaminants, ils peuvent couper le débit de carburant au moteur ou amener le régulateur de carburant moteur à régler incorrectement le débit du carburant.

Raccords et attaches

13.12.36 Deux types de raccords et d'attaches sont utilisés dans les circuits carburant. Il y a des fixations permanentes dans tout le circuit pour raccorder les tuyaux souples et la tuyauterie. Des raccords à déconnexion rapide sont utilisés dans la zone du moteur et dans les réservoirs auxiliaires de carburant.

13.12.37 Les raccords à déconnexion rapide sont très fiables et ne posent généralement aucun problème lorsqu'ils sont correctement installés. Les vérifications de maintenance de l'installation motrice servent à s'assurer qu'ils sont correctement installés. Il est très rare de trouver des problèmes dans ce domaine. La plupart sont munis de fils de sécurité qui les maintiennent en position verrouillée.

Puisards et drains

13.12.38 Les réservoirs de carburant sont équipés de puisards et de drains pour retenir l'eau accumulée avant qu'elle n'entre dans le circuit carburant de l'aéronef. Des accidents causés par un carburant contaminé par l'eau se produisent à l'occasion dans les petits aéronefs à moteurs alternatifs, mais sont pratiquement inexistantes dans les plus gros aéronefs à turbomachines, parce que ces moteurs sont plus tolérants à l'eau et en raison des additifs de carburéacteurs et de l'utilisation d'un point d'avitaillement unique. La contamination par l'eau ne doit pas être négligée, mais elle n'est généralement pas le principal suspect dans les aéronefs à turbomachines.

Pompes et robinets

13.12.39 Les pompes et les robinets sont utilisés pour réguler le débit de carburant envoyé aux moteurs et pour transférer le carburant entre les réservoirs.

13.12.40 La grande majorité des systèmes utilisent des pompes de suralimentation électriques CA qui sont situées dans tout le système pour transférer le carburant entre les réservoirs ou pour fournir une pression positive à la pompe carburant entraînée par le moteur. Il y a normalement des pompes de suralimentation indépendantes pour chaque moteur.

13.12.41 Le carburant peut être transféré à partir des réservoirs des ailes et des réservoirs auxiliaires en utilisant la pression d'air de prélèvement du moteur. Chaque réservoir comprend un clapet de mise en pression et de mise à l'air libre, qui est normalement ouvert, c'est-à-dire dans la position de mise à l'air libre. Pour le transfert du carburant, le robinet est fermé de manière à pressuriser le réservoir jusqu'à une pression nominale de 10 lb/in² avec un maximum de 16 lb/in² dans la plupart des cas. La pression est maintenue par un régulateur de pression. Les conduites d'air sont munies de clapets antiretour pour éviter le retour du carburant. Le réservoir principal comprend des robinets d'arrêt pour arrêter l'écoulement du carburant lorsque le réservoir principal atteint le niveau prescrit ou pour arrêter l'entrée du carburant dans le réservoir ou en arrêter la sortie sur demande.

13.12.42 Le carburant peut être transféré à l'aide d'éjecteurs. Une pompe de suralimentation à deux éléments est utilisée dans ces systèmes. En plus de fournir le carburant au moteur, une quantité appropriée de carburant est fournie à des pompes venturi (éjecteurs) qui transfèrent automatiquement le carburant à l'intérieur du système.

13.12.43 Le carburant peut aussi être transféré à l'aide d'une seule pompe à plus d'un réservoir. Ces pompes proportionnelles ont besoin de conditions de vol stables pour fonctionner efficacement. On peut s'attendre à des déséquilibres lorsque le vol comprend de nombreuses manœuvres ; le résultat peut être des déséquilibres de carburant et peut-être la présence de carburant résiduel.

13.12.44 Le transfert ou la suralimentation carburant à commande hydraulique peuvent être utilisés pour fournir du carburant dans des conditions de forte demande telles que les opérations en postcombustion. Dans certains aéronefs, des pompes de transfert de carburant à commande hydraulique sont utilisées pour les transferts à fort débit nécessaires pour corriger le centre de gravité. Une défaillance du système de transfert conjuguée à des problèmes de centre de gravité peut causer de sérieux problèmes de commande.

13.12.45 Des robinets entraînés par des moteurs électriques CC sont utilisés dans tout le système. Ils sont mis soit à la position ouverte, soit à la position fermée. Des circuits électriques sont fournis pour éliminer la possibilité de mouvements non commandés. Les robinets sont munis d'indicateurs qui identifient leur position, mais en cas de défaillance de l'arbre, l'indicateur peut donner des informations erronées.

Sélecteurs, commutateurs électriques et indicateurs

13.12.46 À moins que chaque moteur de l'aéronef ne soit directement alimenté par un seul réservoir, l'équipage de conduite doit disposer d'un moyen pour sélectionner les réservoirs utilisés. Il peut s'agir de sélecteurs qui peuvent activer électriquement une vanne quelque part dans le système ou d'un robinet qui est actionné par l'équipage.

13.12.47 L'alimentation électrique CC des robinets et d'autres dispositifs de commande vient généralement des bus essentiels CC primaires. Les commutateurs sont en général placés à un endroit commode d'accès dans le poste de pilotage afin de faciliter la gestion correcte du carburant.

13.12.48 Les robinets coupe-feu carburant principaux peuvent être placés à un autre endroit et être alimentés en CC par les bus de secours ou de batterie. Dans certains aéronefs, les robinets coupe-feu sont actionnés (fermés) lorsque les gaz sont coupés et lorsque la poignée en T d'arrêt d'urgence est activée.

13.12.49 Le système d'indication de quantité de carburant donne des renseignements sur la quantité de carburant disponible dans le(s) réservoir(s) d'alimentation primaire(s) ainsi que la quantité totale de carburant dans les réservoirs sélectionnés. Des dispositifs capacitifs dans les réservoirs donnent des renseignements sur la quantité de carburant disponible. Les indicateurs fonctionnent généralement en CA.

13.12.50 Les tuyauteries du système sont aussi munies de manocontacts qui activent des voyants d'avertissement pour signaler une perte de pression carburant à l'équipage de conduite. Divers robinets d'arrêt mécaniques sont également utilisés pour arrêter l'écoulement du carburant entre les réservoirs durant les transferts.

13.12.51 Il convient de consulter les documents techniques de maintenance de l'aéronef pour obtenir des renseignements spécifiques sur l'aéronef accidenté.

Circuit carburant du moteur

13.12.52 La fonction première du circuit carburant du moteur est de fournir au moteur la quantité et la distribution exactes de carburant requises pour répondre aux besoins opérationnels. Les fonctions secondaires consistent notamment à maintenir les servopressions pour les accessoires sélectionnés, à fournir une dérivation pour l'excédent de carburant, à programmer et à positionner les stators variables et à couper le carburant moteur. Les principaux éléments du circuit carburant du moteur sont les suivants : filtres de carburant, pompe carburant principale, régulation du carburant, clapet de pressurisation et robinet de vidange, pompe carburant de postcombustion, injecteurs de carburant des moteurs et injecteurs de carburant de postcombustion.

Filtre de carburant

13.12.53 Le filtre de carburant peut faire partie de la pompe carburant principale ou peut être un élément séparé. La capacité de filtration varie avec l'aéronef mais peut aller jusqu'à 40 microns. Le filtre possède un élément de dérivation pour permettre le passage du carburant si le filtre est bloqué.

Pompe carburant principale

13.12.54 La pompe carburant principale est généralement montée sur un relais d'accessoires. La pompe peut être constituée d'un élément de suralimentation, d'un filtre, d'un élément haute pression et d'un clapet de surpression. L'élément de suralimentation peut avoir un ou deux éléments, qui peuvent être du type volumétrique à engrenages ou du type rouet centrifuge. Généralement l'élément de suralimentation est du type centrifuge et l'élément de pression du type engrenages.

13.12.55 La défaillance de l'élément pression de la pompe carburant principale entraîne une extinction immédiate du moteur. La défaillance de l'élément de suralimentation peut causer la cavitation et la défaillance de l'élément de pression. La défaillance de l'élément de suralimentation entraîne généralement des sautes de régime ou l'extinction du moteur au-dessus d'une altitude prédéterminée, selon le moteur.

Régulateur de carburant principal

13.12.56 Le régulateur de carburant principal est généralement constitué d'une section dosage et d'une section calcul. La section dosage choisit le débit de carburant pour les injecteurs. Le choix est basé sur l'information reçue de la section calcul. Les paramètres moteur sont intégrés dans la section calcul pour assurer le débit de carburant approprié, le contrôle de la géométrie variable et une protection limitée pour la grande variété de conditions que peut rencontrer le moteur dans toute son enveloppe d'utilisation.

13.12.57 Les turbomachines plus anciennes utilisaient des régulateurs de carburant hydromécaniques tandis que les nouveaux modèles de moteurs utilisent des régulateurs électroniques. Dans tous les cas, le régulateur de carburant doit avoir au moins un robinet de carburant principal et son mécanisme de commande. La plus grande complexité des régulateurs augmente la complexité de l'enquête.

13.12.58 Tout fonctionnement anormal du régulateur se traduit par un fonctionnement irrégulier du moteur et, dans les cas extrêmes, par une défaillance complète.

Purgeur-distributeur

13.12.59 Le purgeur-distributeur accomplit trois fonctions durant le fonctionnement du moteur : 1) il maintient une pression de carburant minimale pour le fonctionnement de la servocommande de carburant principale ; 2) il fournit la pression de carburant appropriée aux injecteurs dans toute l'enveloppe d'utilisation du moteur ; 3) il vide les rampes de distribution carburant durant l'arrêt des moteurs. Il comprend un clapet de type piston qui s'oppose au refoulement du carburant en combinant la force d'un ressort taré et la pression de référence du carburant.

Injecteurs principaux

13.12.60 Les injecteurs principaux sont installés dans le carter diffuseur ou sur la chambre de combustion. Leur nombre varie selon le type de moteur. Pour protéger les orifices d'écoulement et les diviseurs de débit de toute contamination éventuelle, un filtre peut être installé à l'admission du carburant dans la partie supérieure de chaque injecteur. L'air est utilisé pour refroidir l'aiguille, pour réduire les résidus de carbone et la fissuration de l'aiguille et pour positionner la flamme du brûleur.

Enquêtes sur le système carburant

Quantité et disponibilité du carburant

13.12.61 Une des principales tâches de l'enquête dans de nombreux accidents liés au carburant consiste à déterminer la quantité de carburant et son emplacement dans l'aéronef.

13.12.62 Le profil de propagation d'un incendie dans un aéronef partiellement détruit peut donner le premier indice. Un incendie situé dans la zone de l'aile droite, qui ne touche pas du tout l'aile gauche et très peu le fuselage indique la présence de carburant résiduel dans l'aile droite, etc.

13.12.63 Les sélecteurs de réservoirs de carburant, particulièrement les robinets manuels, doivent être examinés attentivement pour s'assurer qu'ils sont ouverts sur un réservoir qui contenait du carburant. Plusieurs accidents se sont produits lorsque le membre d'équipage a sélectionné une position incorrecte ou intermédiaire d'un robinet, coupant de fait le débit de carburant à un moteur ou à tous les moteurs. La visibilité des robinets, l'identification tactile et des mouvements d'actionnement difficiles ont tous été des facteurs contributifs.

13.12.64 Une analyse des indicateurs de quantité de carburant des réservoirs d'alimentation peut donner des renseignements importants. Consulter la section sur l'analyse des instruments pour obtenir des renseignements généraux. L'information obtenue doit être corrélée avec d'autres informations.

13.12.65 L'analyse des ampoules des voyants d'indication de niveau bas et de faible pression peut fournir des informations à l'appui. La fiabilité de l'indicateur de niveau bas est renforcée lorsque le voyant est relié à un transmetteur mécanique séparé de niveau de carburant. Dans certains aéronefs, l'activation de l'indication de niveau bas dépend du transmetteur de quantité de carburant ; dans ce cas, une défaillance du transmetteur peut invalider l'indication de la situation d'urgence du carburant.

13.12.66 Les dossiers d'avitaillement peuvent aider à déterminer la quantité de carburant disponible. Plusieurs incidents se sont produits parce qu'il y avait eu confusion sur la quantité de carburant en raison des unités de mesure utilisées (par exemple, gallons, litres, livres). Une estimation détaillée de la dernière quantité de carburant connue moins la consommation de carburant estimée peut donner une bonne estimation du carburant disponible au moment de l'accident.

13.12.67 Le total fourni par les indicateurs peut être trompeur pour l'équipage de conduite comme pour l'enquêteur, vu que le carburant résiduel est souvent un facteur dans les accidents liés à une défaillance totale des moteurs par manque de carburant dans les moteurs.

Type de carburant

13.12.68 L'utilisation de carburéacteurs dans les moteurs alternatifs a causé de nombreux accidents. Un mauvais avitaillement doit toujours être soupçonné dans les cas de perte totale de puissance dans les moteurs alternatifs. Les moteurs alternatifs avec turbocompresseur, même si le mot « turbo » fait partie de leur nom, utilisent de l'AVGAS et non des carburéacteurs. L'avitaillement des aéronefs à turboréacteurs en AVGAS peut avoir des conséquences négatives, mais elles ne sont généralement pas catastrophiques. La plupart des turboréacteurs peuvent tolérer de nombreux types de carburants pendant un temps limité. Le mauvais type de carburant peut considérablement dégrader les performances d'un aéronef, notamment son rayon d'action.

13.12.69 Prendre des échantillons de carburant lorsqu'il est estimé que le système de carburant peut avoir joué un rôle dans l'accident. Pour effectuer une analyse complète il faut prélever au moins un litre de carburant de chaque réservoir. Les résultats peuvent donner des renseignements sur le type de carburant et sur la présence de contaminants qui auraient pu contribuer à l'accident. Les échantillons doivent être placés dans des récipients propres et prélevés d'un puisard ou d'une conduite de carburant vers le moteur. La trousse d'enquête doit inclure des récipients pour prélever des échantillons. Les échantillons doivent être analysés par un laboratoire qualifié pour ce type d'analyse.

Systèmes de transfert

13.12.70 Dans de nombreux aéronefs, le carburant est transféré à un réservoir d'alimentation puis aux moteurs. Le réservoir d'alimentation est considéré comme étant le dernier réservoir avant l'alimentation directe des moteurs. Dans les aéronefs de transport, les réservoirs de carburant sont associés à des moteurs particuliers et ont des systèmes de transfert ou de distribution qui permettent d'assurer l'intercommunication entre les moteurs ou les réservoirs. La position des régulateurs doit être notée avec précision car ils fournissent des renseignements précieux sur la situation avant l'accident.

13.12.71 Les pompes de suralimentation principales dans les réservoirs de carburant principaux peuvent donner des renseignements utiles sur leur état au moment de l'accident. Les pompes qui fonctionnaient présentent généralement des dommages par rotation. Ces dommages sont une bonne indication d'une alimentation électrique. À faible altitude et à bas régime, le fonctionnement des pompes de suralimentation n'est pas généralement nécessaire au vol et la défaillance d'une pompe de suralimentation ne devrait pas généralement conduire à un accident.

13.12.72 Certains aéronefs sont équipés de systèmes de transfert qui essaient automatiquement de remplir les réservoirs d'alimentation lorsque leur niveau de carburant est bas en raison du réservoir sélectionné ou non sélectionné par l'équipage. Ces systèmes sont conçus pour avoir la priorité sur les interventions de l'équipage afin d'éviter que les réservoirs se vident. Des robinets de transfert retrouvés en position ouverte alors qu'ils auraient dû être fermés sont un indice d'une activation possible du système de transfert automatique, ce qui pourrait indiquer la présence de carburant résiduel ou de carburant dans des réservoirs autres que les réservoirs d'alimentation.

13.12.73 Les robinets principaux d'arrêt de carburant constituent un point de défaillance principal dans les cas de de défaillance brusque des moteurs. Ils doivent être conçus de façon qu'ils ne puissent pas être activés de manière imprévue par des tensions parasites.

- a) Les spécifications exigent que le maintien de l'alimentation électrique du robinet soit basé sur le dernier mouvement commandé. Le mouvement du robinet interrompt aussi plusieurs parties du circuit pour éviter les opérations non commandées.
- b) Malgré cette conception, il s'est quelques fois produit des accidents liés aux robinets principaux d'arrêt de carburant. Il faut analyser soigneusement le robinet et les circuits électriques lorsqu'on soupçonne des problèmes liés au robinet d'arrêt principal.

- c) Il faut vérifier l'intégrité des conduites de carburant et déterminer si elles présentent des fuites, des ruptures ou des signes d'incendie ou d'explosion. Les conduites de carburant dans le compartiment moteur devraient présenter des indices de dommages (déchirure ou étirement) lorsque les moteurs sortent de leur position normale ou qu'ils se détachent de l'aéronef. L'absence de dommages peut indiquer une perte d'intégrité des conduites de carburant avant l'accident.
- d) Vérifier les filtres de carburant pour déterminer s'il y a eu contamination et dérivation. En général, un indicateur de dérivation qui a été soumis aux forces considérables de l'accident n'est pas un indicateur fiable d'une dérivation avant impact. Le fonctionnement prolongé en mode dérivation peut contaminer le régulateur et avoir pour résultat une perte totale ou partielle de puissance. Des filtres sans dérivation totalement contaminés peuvent causer un fonctionnement imprévu du moteur.
- e) Le réglage des commutateurs dans le poste de pilotage peut donner une indication de leur position avant l'accident. Il faut utiliser cette information avec prudence : les commutateurs, même ceux qui sont sous cache ou munis d'un fil frein, peuvent se déplacer durant l'accident. Les premières personnes sur les lieux de l'accident peuvent aussi déplacer certains commutateurs, ce qui particulièrement vrai lorsque le personnel d'intervention entre dans le poste de pilotage pour sauver un membre de l'équipage de conduite ou pour arrêter un équipement qui fonctionne.

Ruptures de réservoirs et de conduites de carburant

13.12.74 Il est relativement rare qu'un accident soit causé par la rupture d'un réservoir de carburant, mais il faut quand même le soupçonner lorsqu'il y a un incendie important. Il y a plusieurs années, par exemple, la tôle recouvrant les réservoirs d'un aéronef se bombait sous l'effet des changements de pression. La tôle s'est déchirée et les pointes acérées du bord de rupture ont perforé le réservoir souple, causant un incendie important dans la zone du réservoir. Les preuves ont été brûlées mais une évaluation de plusieurs autres aéronefs a mis au jour le problème.

13.12.75 Les défaillances des réservoirs souples sont liées à l'assèchement des matériaux, qui deviennent fragiles. Examiner le coin intérieur arrière du compartiment du réservoir pour voir s'il y a un résidu collant causé par une fuite de carburant qui a décollé l'adhésif du ruban utilisé pour prévenir l'usure du réservoir par frottement.

13.12.76 Les défaillances du système de mise à l'air libre peuvent causer une défaillance catastrophique du réservoir de carburant et présenter de graves dangers selon l'emplacement du réservoir et la capacité de l'aéronef d'atterrir sans le carburant perdu.

13.12.77 L'usure par frottement des conduites de carburant est un problème majeur. Il doit y avoir une correspondance entre l'expansion de l'aéronef aux différents régimes de vol et l'acheminement des conduites de carburant. Les constructeurs ont adopté de nouvelles techniques et de nouveaux raccords pour résoudre ce problème, mais il faut le soupçonner en cas d'explosion ou d'incendie d'origine inconnue.

13.13 SYSTÈME ANTICOLLISION EMBARQUÉ

13.13.1 Le système anticollision embarqué (ACAS), ou système d'alerte de trafic et d'évitement de collision (TCAS), est obligatoire à bord de nombreux aéronefs commerciaux. Ce système est conçu pour avertir l'équipage de conduite de la proximité du trafic et pour résoudre les conflits. L'ACAS utilise les systèmes actuels du contrôle de la circulation aérienne et les fonctions des transpondeurs mode S pour coordonner les manœuvres d'évitement entre aéronefs en conflit. L'ACAS comprend normalement un transpondeur, plusieurs antennes et un ordinateur. L'aide des constructeurs est nécessaire pour tester les composants ou extraire les données des mémoires non volatiles.

13.13.2 Une des technologies ACAS en développement prévoit, en cas de détection de collision imminente, de passer la commande de l'aéronef à l'ordinateur de bord, de manœuvrer l'aéronef de manière à éviter la collision, puis de repasser la commande au pilote automatique ou à l'équipage. Il existe au moins un cas connu où le système a appliqué une manœuvre d'évitement afin d'éloigner un aéronef d'un conflit pour en fait le remettre en situation de collision avec un autre aéronef.

13.13.3 Un problème mis en évidence par une enquête récente est le conflit entre les contrôleurs de la circulation aérienne et les avis ACAS. Une collision en vol s'est produite parce que l'équipage avait décidé de suivre les instructions du contrôleur au lieu de l'alerte ACAS, sans savoir que le contrôleur ne pouvait pas recevoir la même alerte.

13.13.4 Un autre système air-sol de contrôle de la circulation qui a progressé dernièrement est la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B). Ce système emploie une combinaison d'émetteurs embarqués et de stations de retransmission au sol pour envoyer des avertissements air-air ainsi que la position pour permettre aux contrôleurs sol d'effectuer le séquençage et d'appliquer la séparation comme ils le font avec le contrôle radar.

13.14 SYSTÈME D'AVERTISSEMENT DE PROXIMITÉ DU SOL AMÉLIORÉ (EGPWS)

13.14.1 Un dispositif avertisseur de proximité du sol (GPWS), également connu sous le nom de « système d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS) », est obligatoire dans tous les aéronefs transportant au moins 30 passagers. Le système envoie des avertissements sonores et visuels aux pilotes pour les avertir lorsque l'aéronef se rapproche dangereusement du sol. Certains systèmes peuvent aussi être intégrés au système d'avertissement de cisaillement du vent pour alerter l'équipage de la présence de cisaillement du vent dangereux durant le décollage ou l'atterrissage. Le développement du GPWS a donné le système d'avertissement de proximité du sol amélioré (EGPWS). Ces systèmes utilisent les signaux émis par de nombreux autres systèmes de bord tels que le GPS, le radioaltimètre, le calculateur de données aérodynamiques et l'avertisseur de décrochage. S'il y a quelque doute sur les performances d'un système d'avertissement de proximité du sol, il sera peut-être nécessaire d'examiner ces autres systèmes de bord. Il peut être nécessaire de disposer de données topographiques exactes pour évaluer les performances du système. En outre, les calculateurs prédictifs contiennent généralement une mémoire non volatile qui peut fournir des données utiles pour l'enquête sur une collision avec le sol.

13.14.2 Il ne faut pas oublier que les systèmes d'avertissement de proximité du sol utilisent l'analyse informatique prédictive et que certaines caractéristiques topographiques peuvent déclencher un avertissement si le système détecte un terrain qui s'élève rapidement sous la trajectoire d'approche. Dans ce cas, il faut déterminer si un avertissement de proximité du sol est « normal » pour la trajectoire d'approche présumée, conduisant ainsi l'équipage à ne pas réagir à un vrai avertissement donné à l'aéronef accidenté.

13.15 SYSTÈMES À MÉMOIRE NON-VOLATILE

Généralités

13.15.1 Les aéronefs modernes sont équipés de nombreux systèmes électriques commandés par ordinateur. Pour que ces systèmes puissent être utilisés dès la mise sous tension, ils conservent les données des réglages et calculs internes précédents. Les limites sont préétablies et comparées aux valeurs obtenues durant le fonctionnement. Ces données sont conservées après la mise hors tension (ou une perte d'alimentation) dans des puces mémoire à circuits intégrés appelées mémoires non volatiles. Les enregistreurs de données de vol ont des circuits à mémoires non volatiles et il est probable qu'ils conserveront leurs données grâce au renforcement du système d'enregistrement pour qu'il résiste aux impacts (voir le Chapitre 7 pour d'autres renseignements sur les enregistreurs de données de vol et les données des mémoires non volatiles). Même si elles ne sont pas renforcées pour résister aux impacts, beaucoup d'autres cartes de circuits imprimés et les puces mémoire intégrées peuvent survivre à un impact avec leurs données.

Les enquêteurs doivent savoir quels systèmes de bord sont dotés de mémoires non volatiles et les rechercher. Comme les enregistreurs de données de vol, ils peuvent contenir des détails particuliers du fonctionnement du système ou de l'avion avant la perte d'alimentation ou l'impact.

Systèmes utilisant généralement des mémoires non volatiles

13.15.2 Il est impossible de décrire en détail tous les systèmes des aéronefs de transport modernes qui contiennent des mémoires non volatiles. Rappelons seulement que plus un système comprend de composants électroniques et plus il est commandé par ordinateur, plus il y a de probabilités qu'il contienne des mémoires non volatiles. Les données stockées dans ces mémoires n'ont pas toutes le même format et il sera probablement nécessaire de faire appel aux fabricants des systèmes pour extraire les données utiles aux enquêteurs. Les aviateurs et les motoristes peuvent laisser le choix des systèmes au client si bien que tous les aéronefs d'un même type ne seront pas nécessairement équipés des mêmes systèmes et, par conséquent, n'auront pas le même ensemble de mémoires volatiles. Le Tableau III-13-4 donne une liste des systèmes que peut contenir un aéronef moderne type.

Tableau III-13-4. Systèmes d'un Boeing 757 type contenant des mémoires non volatiles

Module numérique d'acquisition des données de vol	Récepteur DME
Ordinateur EICAS	Régulateur d'alternateur
Centrale inertielle	Commande d'alimentation du bus
Calculateur de données aérodynamiques	Calculateur amortisseur de lacet
Ordinateur de l'avertisseur de proximité au sol	Unité de test/commande d'alimentation en air
Générateur de symboles des instruments de vol électroniques	Régulateur de température de zone
Récepteur ADF	Régulateur auxiliaire de température de zone
Radioaltimètre	Régulateur de température groupe
Récepteur VOR/MB	Régulateur de température groupe de secours
Système TCAS	Régulateur de pression cabine
Récepteur ILS	Unité électronique de contacteur de proximité
Émetteur-récepteur du radar météorologique	Commande du système de freinage
Transpondeur ATC	Dispositif de surveillance de la pression des pneus
Unité du système embarqué de communications, d'adressage et de compte rendu (ACARS)	Système d'indication de la quantité de carburant
	Commande électronique de moteur
	Module de vibration de moteur
	<i>Publié avec l'autorisation de la compagnie Boeing</i>

Protection des mémoires non volatiles

13.15.3 Même si les systèmes munis de mémoires non volatiles ne sont pas toujours conçus pour survivre aux forces d'impact, d'autres caractéristiques de conception augmentent la probabilité que ces mémoires conservent leurs données. La taille très petite des circuits intégrés modernes contribue à leur surviabilité. L'installation du circuit sur une carte de circuits imprimés plus grande permet d'absorber certains dommages sans détruire la mémoire volatile.

13.15.4 Les concepteurs ont parfois contribué à augmenter la surviabilité des circuits intégrés en y incorporant des protections contre les pertes de données de la mémoire durant leur utilisation dans des conditions normales ou extrêmes. L'exemple le plus courant est la protection des puces contre la chaleur qu'elles produisent en plaçant des drains thermiques très rapprochés. Quoiqu'ils ne soient pas conçus pour protéger les puces contre les impacts, les

drains thermiques les protègent quand même. Ces drains thermiques sont parfois de simples feuilles de métal qui recouvrent les puces. Ils peuvent absorber suffisamment de forces d'impact et de chaleur pour permettre de récupérer la mémoire non volatile, de la placer dans une unité en bon état et d'en extraire les données (Figure III-13-10).

Protection des mémoires non volatiles

13.15.5 Sachant que les circuits à mémoire non volatile peuvent contenir des données, les enquêteurs doivent être préparés à identifier, manipuler, récupérer et transporter ces circuits quelle que soit la condition dans laquelle le système a été trouvé. Dans les meilleurs cas, le système lui-même aura survécu aux forces d'impact et à l'exposition à l'environnement après l'accident. Si tel est le cas, tout le système doit être récupéré et démonté par les enquêteurs experts du fabricant. C'est la meilleure protection possible. Lorsque les systèmes sont très endommagés, la carte de circuits imprimés peut s'être détachée du boîtier du système. Dans ce cas, les cartes doivent être manipulées avec précaution et en appliquant les règles suivantes :

- a) Ne pas mettre le système sous tension. Les données des mémoires non volatiles doivent être extraites avant que le système ne soit mis sous tension durant l'enquête. La mise sous tension peut démarrer l'initialisation et il y a risque de perdre les données qui étaient présentes au moment de la perte d'alimentation durant l'accident.

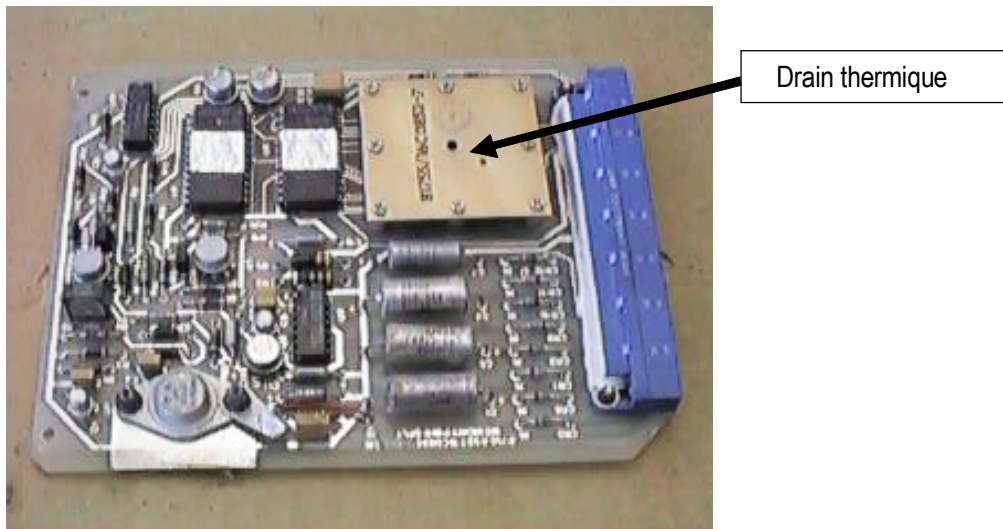


Figure III-13-10. Carte de circuits imprimés contenant une mémoire non volatile protégée par un drain thermique

Les enquêteurs doivent manipuler avec beaucoup de précaution les cartes de circuits imprimés trouvées qui peuvent contenir des mémoires non volatiles et qui sont séparées de leur support d'installation normal. L'électricité statique peut s'accumuler par l'intermédiaire des vêtements ou du vent sur les lieux de l'accident. Toucher la carte de circuits imprimés peut décharger l'électricité statique dans le circuit. Les gants de cuir ne sont pas une protection contre le transfert de l'électricité statique. Lorsqu'il trouve une carte de circuits imprimés, l'enquêteur doit d'abord repérer un coin de la carte qui est intentionnellement dépourvue de circuits pour permettre au personnel d'assemblage de manipuler la carte. Ce coin est la seule partie de la carte qui devrait être touchée. En cas de doute, la carte doit être récupérée par un expert des systèmes.

- b) Si la carte est immergée dans l'eau, ne pas l'exposer à l'air. Les cartes et les circuits intégrés sont très sensibles à la corrosion. Même si l'exposition à l'eau douce ou à l'eau de mer a des effets corrosifs, l'exposition à l'air après immersion dans l'eau a des effets encore plus graves. Dans la mesure du possible, consulter les fabricants pour savoir si les composants immergés dans l'eau de mer doivent être placés dans l'eau douce ou s'il est préférable de les laisser dans l'eau de mer. Certains fabricants préfèrent laisser les composants dans l'eau dans laquelle ils ont été trouvés, car le simple transfert d'un environnement à l'autre peut amorcer ou accélérer le cycle de corrosion. S'il est impossible de consulter le fabricant, les enquêteurs devraient conserver tous les composants dans l'eau dans laquelle ils ont été trouvés et les transporter le plus tôt possible au laboratoire d'analyse pour en extraire les données.
- c) Insérer les composants dans des sacs de plastique antistatiques. Les circuits à mémoire non volatile retrouvés à l'extérieur de leur support, sur la terre ferme, doivent être placés et transportés dans des sacs de plastique antistatiques. Ces sacs sont disponibles chez les fournisseurs de produits informatiques et il faut se les procurer dans des quantités et des dimensions suffisantes pour contenir les composants qu'il est prévu de retrouver. Une fois dans le sac, les composants sont protégés contre toute exposition accidentelle à l'électricité statique.
- d) Ne pas démonter les composants à mémoire non volatile. Manipuler le moins possible les mémoires non volatiles et les systèmes qui contiennent ces mémoires afin d'éviter toute altération accidentelle de la mémoire.
 - i) Si la carte de circuits imprimés trouvée est encore installée dans le boîtier du système, il faut couper les fils en amont du système de manière à ne pas manipuler les connecteurs. Dans la mesure du possible, couper chaque fil séparément plutôt que de les couper tous ensemble.
 - ii) Éviter de manipuler les connecteurs ou les fiches Cannon exposés, car la manipulation peut créer un pont avec une connexion et permettre à une décharge ou à l'électricité statique d'altérer la mémoire.

Mémoire non volatile endommagée

13.15.6 Les mémoires non volatiles qui ont été endommagées par l'impact ou par l'exposition à l'environnement après l'impact doivent être traitées avec prudence. Dans des cas spéciaux où les données ne peuvent pas être obtenues autrement, les laboratoires spécialisés pourront peut-être extraire des données des puces endommagées. Cette procédure peut prendre du temps et être coûteuse, mais si les enquêteurs ont pris les précautions indiquées plus haut il sera peut-être possible d'extraire certaines données à l'aide de techniques microélectroniques.

13.16 PARACHUTE À DÉPLOIEMENT PYROTECHNIQUE

13.16.1 Certains aéronefs légers sont équipés d'un parachute à déploiement pyrotechnique. Ces systèmes sont conçus pour ramener l'aéronef et ses passagers au sol en sécurité en cas d'urgence en vol (Figure III-13-11).

13.16.2 Les avions à structure composite comme le Cirrus Design SR20 et SR22, le Pipistrel Virus et Sinus et le Sting TL-2000 sont équipés de ce système au moment de la construction. Sur d'autres avions, comme les Cessna des séries 150/152, 172 et 182, il est possible d'installer ces parachutes en rattrapage.

13.16.3 De nombreux aéronefs de l'aviation sportive et d'aéronefs ultralégers en Australie sont aussi équipés de ces systèmes. Selon les estimations de la Recreational Aircraft Australia (RAA), il y a actuellement au moins six types différents d'aéronefs ultralégers inscrits au registre de la RAA qui sont équipés de ces systèmes. Le nombre exact d'aéronefs de l'aviation sportive n'a pas été établi.



Figure III-13-11. Parachute à déploiement pyrotechnique

13.16.4 Un parachute à déploiement pyrotechnique armé qui ne s'est pas déployé présente un risque de sécurité potentiellement grave pour les personnes qui participent à l'enquête sur les lieux de l'accident. Les dangers que présentent le déclencheur pyrotechnique et l'équipement connexe ne sont pas indiqués ni marqués de la même manière sur les surfaces des différents aéronefs. Une mauvaise identification du danger posé par le déclencheur pyrotechnique peut entraîner des blessures graves ou la mort.

Système de parachute de cellule du Cirrus (CAPS)

13.16.5 Les avions Cirrus SR20 et SR22 sont équipés du système CAPS en usine. Il s'agit d'un système de récupération balistique fabriqué par Ballistic Recovery Systems Inc. (BRS), aux États-Unis. Ce système a pour but de ramener l'avion et ses occupants au sol en toute sécurité lorsqu'il est déployé en situation d'urgence.

13.16.6 Le système est constitué d'un compartiment en composite contenant le parachute et une fusée à propulseur à poudre pour le déploiement du parachute, d'une manette en T pour déclencher le CAPS, située dans le revêtement du plafond du poste de pilotage, et d'un harnais de parachute.

13.16.7 Le compartiment composite qui contient le parachute et la fusée est situé immédiatement derrière la cloison du compartiment à bagages de la cabine. Le parachute est inséré dans un sac de déploiement à l'intérieur de la boîte. Le sac de déploiement contrôle les étapes de déploiement et de gonflement de la voile. L'ensemble du système est protégé par un mince couvercle composite caréné situé sur la partie arrière supérieure du fuselage.

13.16.8 Le parachute est relié à l'avion par les trois sangles du harnais. La sangle arrière supporte l'arrière de l'avion et est fixée à la structure de l'arrière de la cloison du compartiment à bagages. Les deux sangles avant sont fixées à la cloison pare-feu du moteur et supportent la partie avant de l'aéronef après le déploiement du parachute. Les deux sangles avant sont camouflées dans des passages sous le mince revêtement composite du fuselage et vont de l'arrière du compartiment à bagages au point d'ancrage avant en passant sous les fenêtres et le cadre de la porte de la cabine.

13.16.9 La manette d'activation du CAPS est logée en retrait dans le plafond de la cabine au-dessus des sièges avant. Elle est camouflée derrière un couvercle qui doit être retiré avant de pouvoir la tirer pour déclencher le CAPS (Figure III-13-12).

13.16.10 La manette du CAPS est sécurisée par une goupille de sécurité insérée dans son mécanisme. Cette goupille est normalement retirée pendant l'inspection prévol de la cabine. Elle porte une étiquette (*Remove before flight*) qui indique qu'elle doit être retirée avant le vol.

13.16.11 Pour déclencher le système dans une situation d'urgence, le pilote retire le couvercle et tire la manette de déclenchement du CAPS vers le bas. Il faut une force de 16 kg (35 lb) pour actionner le système. Durant le déploiement, la fusée expulse le contenant du parachute par le couvercle du fuselage. Lorsque la voile du parachute se gonfle, les deux sangles situées sous le revêtement composite du fuselage sortent de leur logement.



Figure III-13-12. Manette de déclenchement du CAPS située au plafond de la cabine

13.16.12 Le manuel de maintenance du Cirrus contient l'avertissement suivant¹ :

- La fusée sort du fuselage à 241 km/h (150 mi/h) durant le premier dixième de seconde et atteint la pleine extension en moins d'une seconde. Les personnes qui se trouvent près de l'avion peuvent être blessées et l'avion sera fortement endommagé.
- L'allumage de la fusée se produit à des températures supérieures à 260 °C (500 °F).

1. Le site web de BRS Inc. indique que la vitesse de sortie est de 160 km/h (100 mph). Quelle que soit la vitesse de sortie, elle est importante et représente un danger grave.

Avions Cessna

13.16.13 Un système de parachute spécialement conçu pour l'aviation générale (GARD-150) et fabriqué par BRS peut être installé sur les Cessna de la série 150/152. Ce système utilise une fusée pour le déploiement du parachute et son installation est approuvée par un certificat de type supplémentaire (STC) de la Federal Aviation Administration (FAA). La fusée déploie le parachute à travers un couvercle en tissu situé dans la partie supérieure arrière du fuselage.

13.16.14 Les Cessna 172 et 182 peuvent aussi être équipés d'un parachute BRS par STC. Dans cette installation, la fusée est située dans le compartiment à bagages, à l'arrière de la cabine, et le parachute est expulsé à travers la section droite de la fenêtre arrière. Les sangles avant du parachute sont acheminées depuis le point de sortie et suivent l'axe supérieur du fuselage, sous un carénage en fibre de verre.

Sting TL-2000, Pipistrel Virus et Sinus et les avions ultralégers

13.16.15 Les Sting TL-2000 et les Pipistrel Virus et Sinus utilisent un système de récupération Galaxy (GRS). Ce système est installé à l'arrière de la cabine de l'aéronef et expulse le parachute à travers la fenêtre arrière de la cabine. Une fois le parachute déployé, la fusée continue sa course au-delà de la voilure jusqu'à l'épuisement du combustible puis retombe sur le sol.

13.16.16 D'autres avions ultralégers sont équipés de parachutes et les types varient selon le type d'avion. Certains de ces systèmes se déploient vers le haut et d'autres vers le bas ou vers l'arrière. Des systèmes de BRS, GRS et d'autres fabricants ont été installés dans ces avions. Le site web de BRS donne une liste de plus de 100 installations différentes, tant dans les ultralégers que dans d'autres types d'aéronefs tels que des deltaplanes et des gyrocoptères.



Figure III-13-13. Vue de côté de l'arrière du Cirrus indiquant la position des décalcomanies d'avertissement du CAPS sur le fuselage

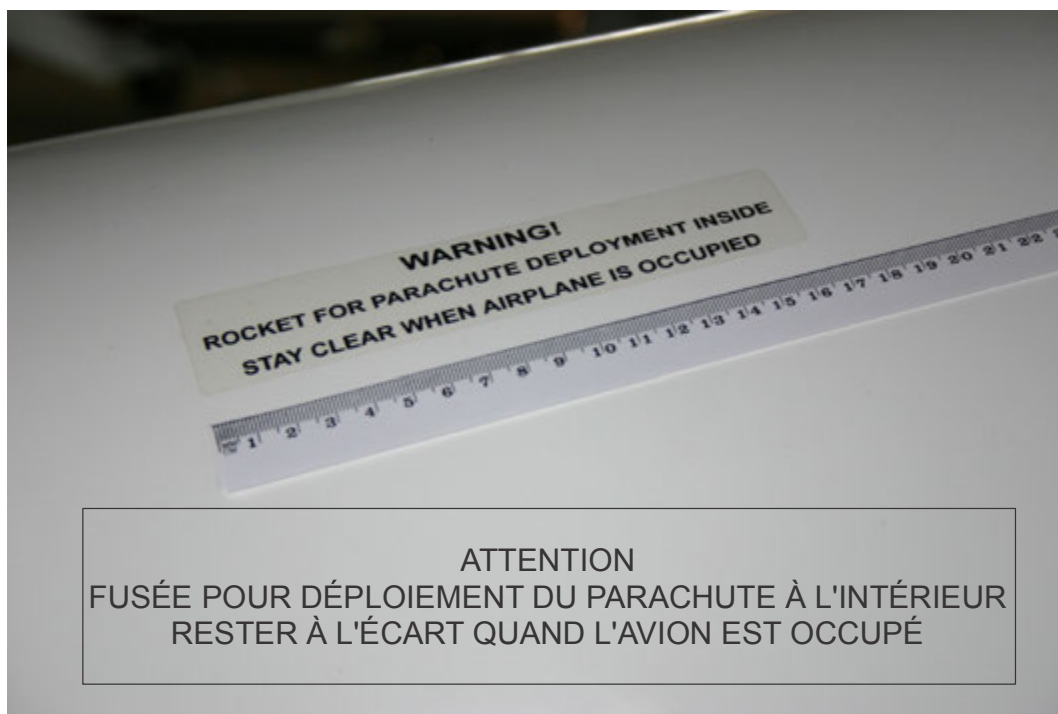


Figure III-13-14. Décalcomanie d'avertissement sur les avions Cirrus

Avertissements de danger et sécurité sur les lieux de l'accident

13.16.17 Il existe plusieurs types d'avertissements sur les aéronefs pour signaler la présence de systèmes de parachute. Sur les Cirrus, il y a un avertissement en petites lettres situé près du point de sortie non marqué du parachute (Figure III-13-13). Les lettres les plus grosses ont environ 6 mm de hauteur. Cet avertissement n'est pas évident et peut facilement passer inaperçu après un accident.

13.16.18 L'avertissement affiché sur le Cirrus est le suivant (Figure III-13-14) :

WARNING!

ROCKET FOR PARACHUTE DEPLOYMENT INSIDE

STAY CLEAR WHEN AIRPLANE IS OCCUPIED

(ATTENTION. Fusée pour déploiement du parachute, à l'intérieur. Rester à l'écart quand l'avion est occupé).

Il n'y a aucun avertissement sur le conteneur du moteur de la fusée ni sur le fuselage de l'aéronef pour indiquer le chemin de sortie des sangles avant du harnais ; il n'y a pas non plus de marques indiquant clairement le contour de la trappe cachée au-dessus du parachute.

Chapitre 14

ENQUÊTE SUR LA MAINTENANCE

14.1 OBJECTIF

14.1.1 L'enquête sur la maintenance examine les antécédents de maintenance de l'avion, les actions de l'organisme de maintenance et de son personnel, et le programme de maintenance de l'avion pour :

- a) déterminer si la maintenance de l'avion a été effectuée conformément aux règlements de navigabilité et de maintenance établis par le service de délivrance de licences compétent, y compris l'adéquation de ces règlements ;
- b) obtenir les données de maintenance applicables à l'accident qui pourraient orienter l'enquête ;
- c) relever les actions de maintenance et les facteurs matériels qui ont pu jouer un rôle dans l'accident ou le causer.

14.2 PORTÉE

14.2.1 L'enquête sur la maintenance comporte trois volets : l'adéquation de la maintenance effectuée, la capacité de gestion de la maintenance et les facteurs humains.

14.2.2 L'enquête est un examen méticuleux de nombreux détails, particulièrement dans le cas d'accidents d'aéronefs de la catégorie transport. Les principaux points à examiner sont les suivants :

- a) les antécédents d'exploitation de la cellule, des moteurs, des hélices et des différents éléments, notamment les événements qui ont causé des défauts ou un fonctionnement irrégulier.
- b) les dossiers de l'aéronef pour vérifier :
 - 1) si toutes les consignes de navigabilité ont été incorporées dans l'avion.
 - 2) si toutes les réparations et modifications de l'avion ont été effectuées conformément aux règlements applicables et aux pratiques acceptées dans l'industrie, et si elles ont été approuvées par l'État d'immatriculation ;
 - 3) si le programme de maintenance approuvé a été suivi correctement ;
 - 4) si les procédures administratives et techniques du programme de maintenance appliqué sont conformes aux règlements de l'État d'immatriculation ;
 - 5) si les écarts ou omissions concernant l'avion ont été convenablement corrigés.

14.3 ENQUÊTE SUR LES ERREURS DE MAINTENANCE

14.3.1 Une erreur de maintenance, comme une erreur opérationnelle, se produit rarement seule. Les enquêteurs qui soupçonnent ou découvrent une ou plusieurs erreurs de maintenance doivent analyser en profondeur tous les facteurs qui ont pu contribuer à l'erreur ou aux erreurs finales. Les paragraphes qui suivent donnent une liste non exhaustive des nombreux facteurs à examiner.

Information

14.3.2 L'*information* désigne les données de base écrites ou informatisées dont a besoin le technicien de maintenance d'aéronef pour accomplir son travail, notamment celles qui proviennent des sources suivantes : cartes de travail, procédures du manuel de maintenance, bulletins de service ou instructions techniques, conseils de maintenance, catalogues de pièces illustrés et autres ressources internes ou fournies par le fabricant. Pour que l'information contribue à l'erreur de maintenance, il faut qu'elle présente des difficultés (difficile à comprendre, incomplète, contradictoire) ou qu'elle n'ait pas été utilisée alors qu'elle aurait dû l'être (n'était pas disponible, n'a pas été prise en compte). Voir la section sur les connaissances et les compétences techniques pour les cas où le technicien est tenu de mémoriser l'information.

14.3.3 Vérifier les points suivants pour toutes les sources d'information qu'il est estimé nécessaire d'analyser en profondeur :

- a) Information incompréhensible ;
 - 1) mots ou acronymes inconnus ;
 - 2) format inhabituel ou non standard ;
 - 3) illustrations de faible qualité ou insuffisantes ;
 - 4) détails insuffisants ou étapes manquantes ;
 - 5) procédures mal rédigées.
- b) Information non disponible ou inaccessible :
 - 1) la procédure n'existe pas ;
 - 2) l'information est incorrecte ou n'est pas à l'endroit habituel ;
 - 3) l'information ne se trouve pas près du poste de travail.
- c) Mauvaise information :
 - 1) pages ou révisions manquantes ;
 - 2) l'information ne correspond pas à la configuration de l'avion ;
 - 3) l'information a été copiée incorrectement du document original ;
 - 4) les étapes ne se suivent pas ;

- 5) la révision disponible n'est pas la plus récente ;
- 6) la procédure ne fonctionne pas.
- d) Trop d'informations ou informations contradictoires :
 - 1) les mêmes procédures provenant de documents différents sont contradictoires (MM et fiche de tâche) ;
 - 2) trop de renvois à d'autres documents ;
 - 3) les configurations indiquées dans différents documents sont contradictoires ;
 - 4) même procédure pour deux applications différentes (par exemple, les conduites hydrauliques d'alimentation et de retour sont fixées au carter l'une à côté de l'autre avec des fixations de mêmes dimensions et de même couleur facilitant une mauvaise installation).
- e) Processus de mise à jour trop long ou trop compliqué :
 - 1) les révisions demandées n'ont pas encore été incorporées ;
 - 2) les modifications de configuration prescrites par des bulletins de service ou des instructions techniques n'ont pas été incorporées dans les procédures de maintenance applicables ;
 - 3) les demandes de modification de documents n'ont pas été soumises, se sont perdues ou sont mal remplies.
- f) Manuel de maintenance ou bulletins de service du fabricant incorrectement modifiés :
 - 1) l'intention de la procédure du fabricant n'est pas respectée ;
 - 2) incorporation de pratiques ou d'étapes non normalisées ;
 - 3) le format ne correspond pas au reste de la procédure ni aux autres procédures ;
- g) Information non utilisée :
 - 1) la procédure est disponible mais n'a pas été prise en compte ;
 - 2) le technicien est trop familiarisé avec la procédure.
- h) Autre :
 - 1) l'exploitant ne peut pas utiliser l'information numérique (peut-être plus probable dans les postes éloignés).

Équipements, outils et pièces

14.3.4 Les *équipements et les outils* désignent le matériel d'essai non destructif, les postes de montage, les clés dynamométriques calibrées, les tournevis, les boîtes d'essais et les outils spéciaux indiqués dans les procédures de maintenance. Les *pièces* désignent les pièces d'avion qui doivent être remplacées.

14.3.5 Les équipements et les outils dangereux peuvent distraire le technicien, qui est alors plus préoccupé par sa sécurité personnelle que par la tâche à accomplir. Si l'équipement et les outils requis ne sont pas disponibles ou sont inaccessibles, le technicien peut utiliser d'autres équipements ou outils qui ne sont pas totalement appropriés pour la tâche à exécuter. Parmi les autres facteurs qui peuvent contribuer aux erreurs, on compte notamment les instruments mal étalonnées, l'emploi d'équipements non fiables ou l'emploi d'équipement ou d'outils qui n'ont pas de mode d'emploi.

14.3.6 Les pièces mal étiquetées peuvent conduire à de mauvaises installations ou réparations. Les pièces qui ne sont pas disponibles peuvent contribuer à une erreur lorsque le technicien utilise une pièce de substitution ou qu'il omet même d'installer certaines pièces telles que des cales.

14.3.7 S'il y a des doutes sur les équipements, les outils ou les pièces, examiner les points suivants :

a) Matériel dangereux :

- 1) la plateforme bouge et est instable ;
- 2) les freins ou les dispositifs de sécurité ne fonctionnent pas ;
- 3) le matériel antidérapant est usé ou absent ;
- 4) mécanisme de verrouillage manquant ou défectueux,
- 5) affichettes (avertissements ou attention) manquantes ou illisibles ;
- 6) bords acérés exposés ou dispositifs de protection personnelle manquants ;
- 7) les sources d'alimentation ne sont pas identifiées ou protégées.

b) Inaccessibilité du matériel :

- 1) ne se trouve pas à son endroit habituel (peut-être utilisé pour une autre tâche ou un autre avion) ;
- 2) se trouve trop loin du poste de travail.

c) Manque de fiabilité du matériel :

- 1) lectures intermittentes ou fluctuantes sur les cadrans ou les indicateurs ;
- 2) matériel endommagé ou usé ;
- 3) limites d'utilisation expirées ;
- 4) pièce ayant présenté des défauts par le passé.

d) Présentation médiocre des commandes ou des affichages :

- 1) il est facile de lire le mauvais affichage ou d'utiliser la mauvaise commande ;
- 2) emplacements difficiles à atteindre ;
- 3) trop petit pour lire ou pour manipuler ;

- 4) la direction du mouvement des commandes ou des boutons n'est pas claire.
- e) Mauvais étalonnage :
- 1) outil mal étalonné dès le début de son utilisation ;
 - 2) mauvaises spécifications employées durant la procédure d'étalonnage ;
- f) Indisponibilité :
- 1) le matériel n'a pas été acheté ou n'est pas en stock ;
 - 2) impossible de se le procurer.
- g) Matériel inadapté à la tâche :
- 1) outils à main ordinaires utilisés comme leviers ;
 - 2) matériel incapable de supporter les poids, les forces ou les pressions requis pour la tâche ;
 - 3) mauvaise pièce ou numéros et suffixes dépassés ;
 - 4) connecteurs ou pinces de mauvaises dimensions ;
 - 5) pièces obtenues de dépôts non contrôlés (par ex., une boîte à outils) ;
 - 6) pièces non conformes ou non autorisées.
- h) Matériel inutilisable dans l'environnement prévu :
- 1) manque d'espace pour manœuvrer l'outil ou installer la pièce ;
 - 2) surface de niveau requise mais non disponible.
- i) Absence d'instructions :
- 1) affichettes d'instruction manquantes ou illisibles ;
 - 2) marques de direction manquantes ;
 - 3) mode d'emploi de l'outil non disponible.
- j) Matériel trop compliqué :
- 1) l'emploi de l'outil exige trop de mouvements et/ou de lectures simultanés ;
 - 2) la localisation de la défaillance ou les essais sont trop complexes ;
 - 3) l'installation de la pièce exige trop de temps.

- k) Mauvais étiquetage :
 - 1) matériel étiqueté à la main ou mauvaises instructions d'utilisation ;
 - 2) mauvais numéro de pièce sur l'outil ou la pièce ;
 - 3) étiquettes illisibles.
- l) Matériel non utilisé :
 - 1) l'équipement, l'outil ou la pièce est disponible mais n'a pas été utilisé ;
 - 2) les pièces n'ont pas toutes été utilisées durant une installation multiple.
- m) Autre :
 - 1) les dispositifs de protection du système sur les outils ou l'équipement ne sont pas disponibles ;
 - 2) pièces fragiles endommagées durant l'installation.

Conception ou configuration de l'avion

14.3.8 Un avion doit être *conçu et configuré* pour que les pièces et les systèmes soient facilement accessibles durant la maintenance. Le technicien doit être capable d'atteindre une pièce, de l'enlever et de la remplacer facilement en l'orientant correctement. Lorsqu'il est estimé que le manque d'accessibilité a pu contribuer à une erreur de maintenance, il faut le considérer comme un vrai facteur contributif et non seulement comme un inconvénient pour le technicien de maintenance.

14.3.9 Les bonnes conceptions comprennent aussi des éléments de retour d'information qui aident le technicien de maintenance à savoir qu'il a procédé correctement. Par exemple, un connecteur électrique qui a un effet de cliquet indique au technicien que le connecteur a été installé correctement. Le fait que certains connecteurs ont cette caractéristique et d'autres non peut être une source d'erreurs. Si le technicien passe d'un connecteur à cliquet à un connecteur sans cliquet, il peut serrer excessivement le second en attendant d'entendre le cliquet.

14.3.10 Les différentes configurations de modèles et d'avions peuvent aussi conduire à des erreurs ; des configurations légèrement différentes peuvent exiger que des tâches de maintenance soient effectuées de manière différente ou exiger des pièces légèrement différentes.

14.3.11 Vérifier si la conception ou la configuration de l'aéronef a contribué aux erreurs de maintenance soupçonnées lorsque les enquêteurs trouvent les situations suivantes :

- a) Complexité :
 - 1) la localisation des défaillances dans le système ou le composant est difficile ;
 - 2) l'installation des composants n'est pas évidente, ou est longue et sujette aux erreurs ;
 - 3) le système ou le composant (électrique, hydraulique, pneumatique, etc.) comporte plusieurs connexions semblables ;
 - 4) les tests d'installation sont longs et prêtent à confusion ;

- 5) des attaches de différentes dimensions peuvent être installées à différents endroits.
- b) Inaccessibilité :
- 1) les éléments ou la zone qui font l'objet de la maintenance sont entourés d'une structure ;
 - 2) il n'y a pas de portes d'accès dans la zone de maintenance ;
 - 3) l'espace ne contient pas de supports pour les pieds ni de poignées de maintien ;
 - 4) l'espace est petit et de forme irrégulière.
- c) Manque de convivialité :
- 1) manque de retour d'information par le composant ou le système ;
 - 2) l'élément peut facilement être installé dans le mauvais sens ;
 - 3) la direction d'écoulement n'est pas indiquée.
- d) Variation de configuration entre les modèles ou les avions :
- 1) des pièces semblables sont installées différemment sur différents modèles ;
 - 2) les modifications apportées à l'avion ont changé les procédures d'installation ou d'autres procédures de maintenance entre les avions.
- e) Autre :
- 1) les composants sont trop lourds pour être facilement enlevés ou installés.

Travail/tâche de maintenance

14.3.12 Le travail d'un technicien de maintenance peut être logiquement divisé en une *série de tâches*. Dans certaines circonstances, lorsque les tâches sont mal planifiées et/ou mal combinées, le travail peut rapidement devenir ingérable. S'il estime que la tâche est un facteur contributif, l'enquêteur doit analyser la combinaison et la séquence des tâches. Lorsqu'il examine la séquence des tâches, il doit aussi déterminer si l'information utilisée était écrite et quelles compétences et connaissances étaient attendues du technicien de maintenance.

14.3.13 Déterminer si le travail ou la tâche présentait une des caractéristiques suivantes :

- a) Travail répétitif/monotone :
- 1) des étapes semblables sont sans cesse répétées (ouvrir et fermer des disjoncteurs durant un long test) ;
 - 2) la même tâche est exécutée de nombreuses fois à plusieurs endroits (enlever des sièges, examiner des joints à recouvrement pour déterminer s'il y a des fissures).

- b) Travail complexe/prêtant à confusion :
 - 1) de nombreuses autres tâches doivent être exécutées durant une tâche donnée ;
 - 2) plusieurs étapes doivent être exécutées en même temps par différents techniciens ;
 - 3) longue procédure dans laquelle la séquence des étapes est cruciale ;
 - 4) le système interagit avec d'autres systèmes durant les essais ou la localisation des défaillances ;
 - 5) plusieurs vérifications électriques requises ;
 - 6) la tâche exige des efforts mentaux ou physiques exceptionnels.
- c) Nouvelle tâche ou changement de tâche :
 - 1) nouvelle spécification de maintenance ou nouveau composant ;
 - 2) modification d'une procédure ;
 - 3) modification technique apportée à la flotte existante ;
 - 4) nouveau modèle d'avion.
- d) Ennui/relâchement de la vigilance :
 - 1) désintérêt des techniciens de maintenance en raison d'un faible volume de travail ;
 - 2) manque de variété des tâches assignées aux techniciens de maintenance ;
 - 3) sous-utilisation des compétences des techniciens.
- e) Mauvaise planification ou priorisation des tâches par le technicien :
 - 1) interruptions fréquentes du travail pour se procurer des outils ou des pièces ;
 - 2) les tâches de préparation ne sont pas exécutées en premier ;
 - 3) trop de tâches prévues pour une période limitée ;
 - 4) les tâches requises pour la sécurité ne sont pas exécutées en premier.
- f) Différence par rapport à d'autres tâches semblables :
 - 1) la même procédure est exécutée de manière légèrement différente sur différents modèles;
 - 2) des modifications récentes apportées à l'avion ont légèrement modifié la tâche ;
 - 3) le même travail est exécuté de manière légèrement différente à un autre lieu de travail.

g) Autre :

- 1) Le groupe de travail exécute la tâche d'une manière différente de celle qui est indiquée dans le document de base (ou les informations écrites).

Connaissances et compétences techniques du technicien/mécanicien de maintenance

14.3.14 Les *compétences techniques* (parfois appelées aptitudes) concernent les tâches ou sous-tâches qu'un technicien de maintenance doit être capable d'accomplir sans avoir à recourir à d'autres informations, par exemple être capable de freiner au fil, d'utiliser une clé dynamométrique ou de déposer des pièces courantes d'un avion. Pour qu'un manque de compétences techniques soit un facteur contributif d'une erreur, il faut qu'il manque au technicien une compétence qui est généralement attendue d'un technicien.

14.3.15 On entend par *connaissances techniques* la compréhension d'un ensemble d'informations qui est appliqué directement à l'exécution d'une tâche. Les connaissances techniques qui doivent manquer à un technicien de maintenance pour qu'elles soient considérées comme un facteur contributif d'une erreur sont celles qu'il est censé avoir mémorisées. Trois grandes catégories de connaissances sont exigées d'un technicien : connaissance du processus des compagnies aériennes, connaissance des systèmes d'avion et connaissance de la tâche de maintenance.

14.3.16 *Connaissance du processus des compagnies aériennes* : connaissance des processus et des pratiques de la compagnie aérienne ou du poste de réparation où travaille le technicien de maintenance, par exemple, les procédures de changement de quart, les consignes d'étiquetage des pièces et les conditions d'approbation de l'achèvement d'une tâche. Ces connaissances sont normalement acquises dans le cadre des procédures générales de maintenance et d'échanges avec d'autres techniciens durant le travail, mais elles peuvent aussi être obtenues ailleurs, par exemple de bulletins destinés aux employés ou dans le cadre d'une formation spéciale.

14.3.17 *Connaissance des systèmes d'avion* : connaissance des systèmes et équipements physiques de l'avion, par exemple, l'emplacement et le fonctionnement des pompes hydrauliques et les options de réusinage des pièces corrodées ou endommagées. Ces connaissances sont généralement acquises à partir des caractéristiques de conception de l'avion, dans le cadre de la formation, dans les manuels de maintenance ou dans les échanges avec d'autres techniciens durant le travail, mais elles peuvent aussi être obtenues ailleurs, par exemple, de revues spécialisées ou de conseils de maintenance.

14.3.18 *Connaissance de la tâche de maintenance* : connaissances spécifiques requises pour l'accomplissement d'une tâche particulière, par exemple, la purge d'un système hydraulique et les limites d'usure d'un pneu. Ces connaissances sont généralement acquises dans les instructions de maintenance ou par des échanges avec d'autres techniciens durant le travail, mais elles peuvent aussi être obtenues d'affichettes dans les avions, des caractéristiques de maintenance ou même d'autres techniciens de maintenance dans le cadre de travail en équipe.

14.3.19 Dans son enquête sur les compétences techniques d'un technicien/mécanicien de maintenance, l'enquêteur doit rechercher les indices suivants :

a) Compétences insuffisantes :

- 1) fait fréquemment des erreurs semblables ;
- 2) mauvaises installations ou réparations lorsque les procédures sont disponibles et claires ;
- 3) mauvaises performances après une formation poussée aux tâches, aux processus de l'exploitant et aux systèmes de bord ;

- 4) difficultés de mémorisation ou mauvaises décisions.
- b) Connaissance insuffisante des tâches :
- 1) exécution lente de la tâche ;
 - 2) changement des responsabilités du technicien de maintenance ;
 - 3) tâche exécutée pour la première fois par le technicien de maintenance ;
 - 4) tâche exécuté dans la mauvaise séquence.
- c) Connaissance insuffisante des processus de l'exploitant :
- 1) incapacité de se procurer les pièces à temps ;
 - 2) nouvelle compagnie aérienne ou nouveau type de travail pour le technicien (de la ligne de maintenance au hangar, etc.) ;
 - 3) les processus de la compagnie aérienne ne sont pas consignés ou ne sont pas mis en évidence durant la formation.
- d) Connaissance insuffisante des systèmes de l'avion :
- 1) changement de type d'avion ou de système majeur pour le technicien ;
 - 2) la localisation des défaillances prend trop de temps ou est incomplète.
- e) Autre :
- 1) les performances/compétences du technicien ne sont pas suivies ou mesurées avec précision ;
 - 2) attentes et performances des autres techniciens (un autre technicien aurait-il fait la même chose ?).

Facteurs ayant une incidence sur la performance individuelle

14.3.20 Les *facteurs ayant une incidence sur la performance individuelle* varient d'une personne à l'autre et comprennent les caractéristiques que chaque personne apporte au travail (par ex., taille/force, santé et événements personnels) ainsi que les facteurs extérieurs (par ex., pressions exercées par les pairs, contraintes de temps, fatigue due au travail même). Ces facteurs peuvent aider à expliquer des erreurs commises par des techniciens de maintenance qui sont généralement les plus performants.

14.3.21 La *santé physique* comprend l'acuité sensorielle ainsi que les affections physiques et les maladies. Les sens, notamment la vision, l'ouïe et le toucher, jouent un rôle important dans la maintenance. Les techniciens sont souvent appelés à exécuter des tâches qui sont aux limites, ou presque, de leurs capacités sensorielles. Certaines tâches exigent de bonnes capacités visuelles et/ou tactiles, comme une inspection visuelle pour rechercher des fissures ou une inspection tactile pour déceler des bavures. Une bonne ouïe est aussi nécessaire pour entendre les instructions ou les observations avant et durant une tâche de maintenance.

14.3.22 Il a aussi été démontré que les *affections physiques*, telles que les maux de tête ou la douleur chronique, sont liées aux erreurs. L'alcool et les drogues ainsi que les effets secondaires des médicaments d'ordonnance ou en vente libre peuvent aussi avoir des incidences négatives sur l'acuité sensorielle. Les maladies, comme le rhume ou la grippe, peuvent aussi perturber l'acuité sensorielle et la capacité de se concentrer. Les maladies peuvent également réduire l'énergie et conduire à la fatigue.

14.3.23 La FAA des États-Unis définit la *fatigue* comme la diminution des réserves énergétiques, conduisant à des performances au-dessous de la moyenne. La fatigue peut être d'origine émotionnelle ou physique. La fatigue aiguë peut découler d'un stress émotionnel, de l'épuisement de l'énergie physique, d'un manque de sommeil, d'un manque de nourriture, d'une mauvaise santé ou d'une surexcitation. La fatigue peut aussi être causée par la situation au travail. L'heure du jour, la durée de la journée de travail et des tâches mentales complexes ou des tâches très physiques peuvent causer la fatigue.

14.3.24 Les *contraintes de temps* sont bien connues des techniciens de maintenance. Les techniciens se sentent pressés de terminer le travail lorsqu'ils sont placés devant la nécessité de terminer une tâche pour que l'avion puisse partir, ou de finir une lourde tâche de maintenance pour qu'un avion puisse être remis en service. Les études ont relié le fait de ne pas avoir assez de temps ou d'avoir trop de temps à une augmentation des erreurs. Il existe un lien bien connu entre la vitesse et la précision ; plus on essaie de finir une tâche rapidement, plus la probabilité de commettre une erreur est grande. Le même lien existe entre la vitesse et la sécurité. Mais lorsque les choses sont faites trop lentement, l'ennui peut s'installer et augmenter la chance de faire des erreurs.

14.3.25 Les *pressions exercées par les pairs* peuvent aussi avoir une incidence sur les performances des techniciens ; par exemple, la pression de ne pas consulter les manuels parce c'est perçu comme un signe de manque de connaissances techniques. La pression des pairs peut aussi influencer le comportement de sécurité d'un technicien.

14.3.26 La taille et la force sont deux facteurs évidents qui ont une incidence sur la capacité d'un technicien d'exécuter certaines tâches. Si une personne est trop petite pour atteindre une prise ou est incapable de descendre une unité remplaçable sur place (LRU) d'une tablette supérieure, des erreurs peuvent se produire.

a) Santé physique :

- 1) acuité sensorielle (perte de vision, d'ouïe, de toucher) ;
- 2) ne pas porter de verres correcteurs ;
- 3) ne pas porter de prothèses auditives ou bouchons antibruit ;
- 4) réduction du champ de vision par le port de lunettes protectrices ;
- 5) affections préexistantes ;
- 6) blessure ;
- 7) douleur chronique limitant le mouvement ;
- 8) nutrition (repas sautés, mauvaise alimentation) ;
- 9) effets indésirables de médicaments ;
- 10) consommation de drogues ou d'alcool ;
- 11) blessures fréquentes (musculaires ou des tissus mous) ;

12) douleur articulaire chronique (mains, bras, genoux).

b) Fatigue :

- 1) manque de sommeil ;
- 2) stress émotionnel (tension, anxiété, dépression) ;
- 3) erreurs de jugement ;
- 4) vigilance et champ d'attention inadéquats ;
- 5) incapacité à se concentrer ;
- 6) temps de réaction lent ;
- 7) augmentation significative du nombre d'heures de travail ou changement des conditions de travail ;
- 8) journée de travail trop longue ;
- 9) trop de temps pris pour exécuter une tâche ;
- 10) surcharge chronique ;
- 11) saturation d'une même tâche (inspection de rangées de rivets) ;
- 12) durée de service trop longue ;
- 13) durée des déplacements avant de commencer le travail ;
- 14) effets sur le rythme circadien (quarts de nuit, changements de fuseaux horaires).

c) Contraintes de temps :

- 1) rythme rapide constant ;
- 2) plusieurs tâches qui doivent être exécutées par une seule personne dans un temps limité ;
- 3) augmentation de la charge de travail sans augmentation de personnel ;
- 4) trop d'importance donnée aux échéances sans planification appropriée ;
- 5) perception d'une pression exercée pour finir une tâche plus rapidement que ce qui est nécessaire pour permettre à un avion de partir ;
- 6) retour irréaliste à un horaire qui ne tient pas compte du temps nécessaire pour accomplir certaines tâches de maintenance.

- d) Pression exercée par les pairs :
 - 1) refus de consulter l'information écrite parce c'est est perçu comme un signe de manque de compétences ou de connaissances techniques ;
 - 2) manque de confiance en soi ;
 - 3) ne pas mettre en doute les processus employés par les autres ;
 - 4) ne pas suivre les procédures de sécurité parce que les autres ne le font pas.
- e) Taille et force :
 - 1) extension anormale, condition physique inhabituelle ou force inhabituelle exigée pour la tâche ;
 - 2) incapacité à accéder aux endroits exigus.
- f) Événement personnel :
 - 1) décès d'un membre de la famille ;
 - 2) difficultés matrimoniales ;
 - 3) problèmes de santé d'un membre de la famille ;
 - 4) modification des responsabilités ou changement d'affectation ;
 - 5) changement de conditions de vie.
- g) Distractions/interruptions durant l'exécution d'une tâche :
 - 1) confusion ou désorientation au sujet de l'étape qui doit être accomplie dans la tâche ;
 - 2) étapes manquées dans une tâche multiétapes ;
 - 3) ne termine pas une tâche ;
 - 4) environnement de travail trop dynamique.
- h) Autre :
 - 1) absentéisme ;
 - 2) vacances ;
 - 3) congé de maladie ;
 - 4) attitudes dangereuses (anti-autorité, invulnérabilité, résignation) ;
 - 5) prise de risques.

Environnement et installations

14.3.27 L'*environnement et les installations* peuvent contribuer aux erreurs. Par exemple, les températures extrêmes (trop chaud ou trop froid), des niveaux de bruit élevés, un mauvais éclairage (reflets, éblouissement, etc.), vibrations inhabituelles et des surfaces de travail sales pourraient conduire à des erreurs de maintenance. Des préoccupations au sujet de la santé et de la sécurité peuvent aussi contribuer à des erreurs de maintenance. Vérifier la présence des éléments suivants :

a) Niveaux de bruit élevés :

- 1) les niveaux de bruit élevés compromettent les communications nécessaires à l'exécution des tâches ;
- 2) l'exposition prolongée au bruit réduit la capacité de concentration et entraîne la fatigue ;
- 3) le bruit masque le retour d'information du système durant un test ;

b) Environnement chaud :

- 1) la chaleur est excessive dans l'aire de travail et la tâche est exécutée trop rapidement ;
- 2) les températures extrêmement chaudes entraînent la fatigue ;
- 3) exposition prolongée à la lumière solaire directe ;
- 4) la chaleur excessive des éléments ou d'une structure empêchent les techniciens de maintenance de réaliser physiquement le travail.

c) Environnement froid :

- 1) le froid est excessif dans l'aire de travail et la tâche est exécutée trop rapidement ;
- 2) l'exposition prolongée au froid réduit la dextérité manuelle ;
- 3) une température ambiante extrêmement froide crée un environnement de maintenance difficile.

d) Humidité :

- 1) une humidité élevée crée de l'humidité sur la surface de l'avion, des pièces et des outils ;
- 2) l'humidité contribue à la fatigue.

e) Pluie :

- 1) réduit la visibilité ;
- 2) crée des conditions glissantes et dangereuses ;
- 3) rend difficile l'utilisation de documents écrits ;
- 4) l'équipement de protection rend la manipulation et les mouvements difficiles.

- f) Neige :
 - 1) réduit la visibilité ;
 - 2) crée des conditions glissantes et dangereuses ;
 - 3) l'équipement de protection rend la manipulation et les mouvements difficiles.
- g) Éclairage :
 - 1) éclairage insuffisant pour lire les instructions ou les affichettes, etc. ;
 - 2) éclairage insuffisant pour les inspections visuelles ;
 - 3) éclairage insuffisant pour les activités de maintenance générale ;
 - 4) un éclairage excessif crée l'éblouissement, des reflets ou des difficultés visuelles ;
- h) Vent :
 - 1) entrave la capacité d'entendre et de communiquer ;
 - 2) déplace les plateformes et autres équipements (crée de l'instabilité) ;
 - 3) projette des débris dans les yeux, les oreilles, le nez ou la gorge ;
 - 4) rend difficile l'utilisation de documents écrits.
- i) Vibrations :
 - 1) l'utilisation d'outils à moteur fatigue les mains et les bras ;
 - 2) se tenir debout sur les surfaces devient difficile ;
 - 3) rend difficile la lecture des instruments.
- j) Manque de propreté :
 - 1) perte d'équilibre ou de prise à cause de la présence de saleté, de graisse ou de fluides sur les pièces ou les surfaces ;
 - 2) l'encombrement réduit l'espace de travail disponible ou utilisable ;
 - 3) entrave la capacité d'effectuer des inspections visuelles.
- k) Substances dangereuses ou toxiques :
 - 1) réduisent l'acuité sensorielle (odorat, vision) ;
 - 2) l'exposition à ces substances cause des maux de tête, des nausées, des vertiges ;
 - 3) l'exposition à ces substances cause des brûlures, des démangeaisons, de la douleur ;

- 4) l'équipement de protection personnelle limite le mouvement ou l'extension ;
 - 5) provoquent une fatigue générale ou soudaine ;
 - 6) suscitent des préoccupations au sujet des effets à long terme sur la santé.
- l) Sources d'alimentation électrique :
- 1) ne portent pas d'étiquettes d'avertissement ;
 - 2) les dispositifs de protection manquent ou sont endommagés ;
 - 3) équipement incorrectement laissé sous tension ;
 - 4) dispositifs de protection des circuits non utilisés ou endommagés ;
 - 5) cordons ragués, divisés ou effilochés.
- m) Mauvaise ventilation :
- 1) présence de fortes odeurs ;
 - 2) yeux brûlants ou irrités ;
 - 3) essoufflement ;
 - 4) fatigue soudaine.
- n) Autre :
- 1) aires mal organisées (difficile de trouver les pièces, les cartes de travail, etc.) ;
 - 2) trop de techniciens de maintenance et/ou d'autre personnel dans une même aire.

Facteurs organisationnels

14.3.28 La *culture organisationnelle* peut grandement contribuer aux erreurs de maintenance. Des facteurs tels que la communication interne avec les organismes de soutien, le niveau de confiance entre la direction et les techniciens de maintenance, la connaissance et le soutien des objectifs de la direction, les activités syndicales et les attitudes, le moral, etc. ont une incidence sur la productivité et la qualité du travail. Le degré d'autonomie des techniciens dans leur environnement de travail et leur capacité de changer ou d'améliorer les processus et les systèmes sont essentiels à un bon moral et à une bonne estime de soi, éléments qui se répercutent sur la qualité de travail des techniciens. Chercher les indices suivants :

- a) Qualité du soutien apporté par les organisations techniques :
- 1) incohérence de l'information fournie ;
 - 2) information tardive ou manquante ;
 - 3) plans de maintenance médiocres ou irréalistes ;

- 4) organisation préalable des tâches médiocre ou absente ;
 - 5) absence de réponse aux demandes de changement ;
 - 6) réticence à prendre des décisions techniques ;
 - 7) modifications fréquentes aux procédures d'entreprise et aux programmes de maintenance.
- b) Politiques et processus de travail de l'organisme de maintenance :
- 1) application injuste ou incohérente des politiques d'entreprise ;
 - 2) politiques normalisées inexistantes ou peu mises en évidence ;
 - 3) stratégies standard de prévention des erreurs inexistantes ou non appliquées ;
 - 4) ne tiennent pas compte des circonstances particulières ;
 - 5) incapacité à changer ou à actualiser les politiques ;
 - 6) politiques qui freinent la signalisation des erreurs et donc l'amélioration des processus.
- c) Syndicats :
- 1) les négociations contractuelles provoquent des distractions ;
 - 2) mauvaises relations entre la direction et le syndicat ;
 - 3) communication positive ou négative de la direction du syndicat ;
 - 4) les grèves, le ralentissement du travail et autres mesures syndicales perturbent le travail.
- d) Effectifs instables :
- 1) mises à pied en cours ;
 - 2) les programmes de retraite anticipée appauvrissent l'expérience ;
 - 3) les réorganisations, les regroupements et les mutations augmentent le nombre de personnes affectées à un nouveau poste ;
 - 4) rétrogradations et diminution des salaires ;
 - 5) changements de direction fréquents.
- e) Autre :
- 1) l'entreprise a acquis une autre entreprise ;
 - 2) le travail fait à l'interne est maintenant externalisé ;
 - 3) effectifs insuffisants dans l'ensemble.

Leadership et supervision

14.3.29 Même si les *superviseurs* n'exécutent pas normalement les tâches, ils peuvent créer un terrain favorable aux erreurs de maintenance par une mauvaise planification, priorisation ou organisation des tâches. La délégation des tâches est une habileté très importante en gestion et déléguer incorrectement peut se traduire par un travail de mauvaise qualité. Il y a un lien direct entre l'attitude de la direction ou des superviseurs et ce qu'ils attendent des techniciens de maintenance et la qualité de leur travail.

14.3.30 Les superviseurs et la haute direction doivent aussi faire preuve de *leadership*, c'est-à-dire qu'ils doivent avoir une vision de ce que doit être la fonction de maintenance et de la manière de la réaliser. Ils doivent en outre donner l'exemple, c'est-à-dire se comporter comme ils veulent que les autres se comportent.

14.3.31 Les enquêteurs doivent rechercher les carences en leadership et en supervision :

a) mauvaise planification/organisation des tâches :

- 1) temps d'arrêt excessif entre les tâches ;
- 2) pas assez de temps entre les tâches ;
- 3) les tâches administratives sont désorganisées ;
- 4) la séquence des tâches n'est pas logique ;
- 5) les configurations des avions changent trop souvent durant les visites de maintenance.

b) Priorisation inadéquate des travaux :

- 1) on ne dit pas aux techniciens les tâches qu'ils doivent exécuter en premier ;
- 2) les tâches importantes pour la sécurité sont programmées en dernier ;
- 3) la localisation des défaillances ne commence pas par les causes les plus probables.

c) Délégation ou assignation inadéquate des tâches :

- 1) assignation de la tâche à la mauvaise personne ;
- 2) incohérence ou absence de processus de délégation des tâches ;
- 3) la même tâche est constamment donnée à la même personne ;
- 4) grand écart dans la charge de travail entre les techniciens ou les services.

d) Attitude et attentes irréalistes :

- 1) insatisfaction, colère et discussions fréquentes entre un superviseur et un technicien au sujet de la manière d'exécuter une tâche et de la rapidité avec laquelle elle doit être exécutée ;
- 2) pression exercée sur les techniciens de maintenance pour qu'ils achèvent les tâches plus tôt qu'il n'est possible ou raisonnable de le faire ;

- 3) réprimander quelqu'un, particulièrement devant les autres ;
 - 4) tolérance zéro pour les erreurs ;
 - 5) absence d'attentes générales en matière de rendement du personnel de maintenance fondées sur la vision de la direction.
- e) Supervision excessive :
- 1) style de gestion qui consiste à regarder par-dessus l'épaule (microgestion) ;
 - 2) décisions prises fréquemment mises en doute ;
 - 3) ne pas inclure les employés dans la prise de décision.
- f) Autre :
- 1) supervision insuffisante ;
 - 2) réunions sans objectifs ni ordres du jour ;
 - 3) le superviseur ne fait pas confiance aux capacités du groupe ;
 - 4) la direction ne donne pas l'exemple et par conséquent établit de faibles normes de travail pour le personnel de maintenance.

Problèmes de communication

14.3.32 Il s'agit de tout problème de communication (écrite ou verbale) qui empêche le technicien de maintenance d'obtenir en temps utile les bonnes informations sur une tâche de maintenance.

14.3.33 Les types de communication qui ont une incidence sur l'efficacité de la maintenance sont notamment les communications :

- a) Entre services :
- 1) directives écrites incomplètes ou vagues ;
 - 2) transmission des informations au mauvais groupe ;
 - 3) responsabilités du service mal définies ou mal communiquées ;
 - 4) les conflits de personnalité créent des barrières de communication entre les services ;
 - 5) information non communiquée ou communiquée trop tard pour qu'elle puisse être utilisée.
- b) Entre personnes :
- 1) non communication d'informations importantes ;
 - 2) mauvaise interprétation des mots, des intentions ou du ton de la voix ;

- 3) barrières linguistiques ;
 - 4) utilisation d'argot ou de termes inconnus ;
 - 5) utilisation de sigles ou d'acronymes inconnus ;
 - 6) omettre de poser des questions lorsque c'est nécessaire ;
 - 7) ne pas proposer d'idées ni de moyens d'améliorer les processus ;
 - 8) différences de personnalité.
- c) Entre quarts de travail :
- 1) aucun transfert des travaux à l'équipe suivante, ou transfert inadéquat ou en vitesse ;
 - 2) mauvaise tenue de la fiche de travail — fiche d'étape incomplète ;
 - 3) processus non consignés par écrit pour qu'ils puissent être utilisés par toutes les équipes ;
 - 4) tableaux des travaux et listes de vérification non actualisées;
- d) Entre les membres de l'équipe et leur chef :
- 1) le chef omet de communiquer des renseignements importants à l'équipe ;
 - 2) briefing de transfert insuffisant au début du quart de travail ;
 - 3) rôles et responsabilités non clairement définies ;
 - 4) le chef ne communique pas aux membres de l'équipe ses observations sur leurs performances ;
 - 5) les membres de l'équipe ne signalent pas les problèmes ou les possibilités d'amélioration à leur chef ;
 - 6) non-utilisation des outils de communication (communication écrite, téléphones radios, etc.).
- e) Entre le chef d'équipe et la direction :
- 1) peu ou pas de communication ;
 - 2) pas d'examen périodique des objectifs et des plans ;
 - 3) la direction ne communique pas au chef d'équipe ses observations sur les performances ;
 - 4) le chef ne signale pas les problèmes ou les possibilités d'amélioration à la direction ;
 - 5) la direction omet de communiquer des informations importantes au chef d'équipe.
- f) Autre :
- 1) des dysfonctionnements des ordinateurs ou du réseau causent la perte d'informations ;

- 2) les courriels ne sont pas utilisés ou il n'en est pas tenu compte ;
- 3) les manuels et les systèmes informatiques ne sont pas disponibles aux postes éloignés.

14.4 GROUPE DE LA MAINTENANCE

14.4.1 Les enquêtes sur les accidents et les incidents graves d'aviation sont souvent menées par une équipe. Dans une enquête en équipe, un spécialiste de la navigabilité est généralement désigné comme chef du Groupe de la maintenance pour diriger le groupe. Le chef du groupe, en coordination avec l'enquêteur désigné, établit la composition précise du groupe.

Composition

14.4.2 Le groupe devrait comprendre au minimum un chef de groupe, des représentants des États participant à l'enquête et des conseillers de l'avionneur et du motoriste. Il convient aussi d'inclure des représentants et/ou des conseillers d'autres participants à l'enquête au besoin. Les parties affectées au groupe de maintenance doivent aussi être capables de traiter des questions relatives aux moteurs, aux structures, aux systèmes et à l'exploitation.

14.4.3 Le chef du groupe devrait envisager d'inclure aussi une personne du service d'assurance qualité de la maintenance ou du service des techniques de maintenance de l'exploitant. Cette personne doit être capable d'aider à déchiffrer les rapports de la fiche de maintenance de l'avion et avoir une excellente compréhension du programme de maintenance de l'exploitant et du manuel de maintenance général.

14.4.4 Il est utile d'inclure dans le groupe un membre du personnel technique de la compagnie, et un mécanicien breveté (employé par l'exploitant ou par un tiers) doit être mis à la disposition du groupe pour aider à expliquer toute partie des dossiers qui n'est pas claire ou qui est difficile à comprendre. Les mécaniciens, plus que toute autre personne, seront capables d'expliquer le contenu du livret technique, de la fiche de tâches et d'autres rapports. Ils comprennent la culture de groupe de la communauté de maintenance et connaissent les coulisses des pratiques de maintenance. Ils sont conscients des particularités de la conception et des solutions provisoires aux problèmes chroniques qui ne semblent jamais être signalés.

14.4.5 Finalement, le chef du groupe doit demander que le propriétaire/l'exploitant ou l'organisme de maintenance/réparation (MRO) sous contrat mette à la disposition du groupe une personne responsable des dossiers. Il y aura de nombreuses demandes d'extraction et d'explication des données.

Fonctions et responsabilités

14.4.6 Le groupe de la maintenance est chargé d'examiner tous les états de maintenance pour relever les antécédents de réparation et de maintenance de l'avion accidenté.

14.4.7 Les données recueillies seront examinées pour déterminer l'efficacité et l'adéquation des travaux de maintenance exécutés et leur pertinence pour les questions relatives à l'accident. L'importance des conséquences d'une maintenance, de réparations et d'inspections inappropriées ou inadéquates devient très évidente après un examen exhaustif des dossiers applicables.

14.4.8 Ces données peuvent indiquer la nécessité d'analyser plus avant les dossiers de l'avion qui fait l'objet de l'enquête. Elles peuvent aussi ouvrir des pistes d'enquête pour les autres groupes. De même, les données recueillies par d'autres groupes peuvent ouvrir des pistes pour le Groupe de la maintenance.

14.4.9 Le chef du groupe signale à l'équipe d'enquête tout système ou élément douteux mis au jour par l'examen des dossiers. De cette manière, le groupe réduit les possibilités de négliger des causes éventuelles de l'accident liées aux systèmes ou au matériel.

14.4.10 Les enquêteurs doivent tenir compte des différences entre les exploitants ainsi que des règlements qui les régissent. Les grands transporteurs aériens, les transporteurs aériens de troisième niveau, les services de taxi aérien à la demande et les exploitants de gros aéronefs sont gouvernés par une réglementation stricte et précise. Les avions d'entreprise et de transport des personnes de marque sont souvent exploités dans le cadre de règlements d'exploitation généraux. Il est donc important d'examiner le programme de maintenance approuvé en fonction des règlements d'exploitation applicables.

14.4.11 Il ne faut jamais présumer qu'un programme de maintenance est adéquat d'après la taille ou le perfectionnement de l'entreprise ou de son système de dossiers.

Objectifs spécifiques

14.4.12 Durant l'enquête, le groupe de la maintenance doit au besoin axer ses travaux sur les objectifs suivants :

- a) relever suffisamment d'antécédents de maintenance pour servir de référence à tous les membres de l'équipe d'enquête ;
- b) examiner et évaluer les éléments de maintenance des points particuliers que lui soumettent les chefs d'autres groupes d'enquête ou l'enquêteur désigné ;
- c) analyser les activités et tendances de maintenance antérieures qui se rapportent à l'aéronef accidenté pour essayer de déceler des éléments qui ne sont pas évidents pour les autres groupes en raison de la destruction d'indices sur les systèmes ou les structures ;
- d) examiner les programmes, les politiques, les procédures et l'environnement de travail de l'exploitant, des ateliers de réparation et de l'organisme de maintenance sous contrat pour déterminer s'ils ont pu contribuer à l'accident ;
- e) évaluer la supervision de l'exploitant effectuée par les organismes de réglementation compétents pour déterminer si elle a pu contribuer à la chaîne d'événements qui ont mené à l'accident.

Note.— L'exploitation et la maintenance des aéronefs peuvent être soumises à une supervision réglementaire par des organismes gouvernementaux autres que les organismes de réglementation technique aéronautique, par exemple, des organismes régissant les marchandises dangereuses, la sûreté, la santé et la sécurité et l'environnement.

Coordination

14.4.13 Le groupe doit assurer une coordination étroite avec l'enquêteur désigné. L'enquête peut très bien s'orienter vers des points importants relevés par d'autres spécialistes. Il peut alors être nécessaire pour le Groupe de la maintenance d'analyser des points portés à son attention par d'autres groupes de l'enquête.

14.4.14 Les fonctions du groupe exigent qu'il assure une coordination avec l'exploitant. L'enquête peut porter sur la conception, la certification, la construction et/ou la gestion de la maintenance, ce qui peut inclure les normes et procédures, l'assurance qualité, les équipements et les installations, le choix du personnel de maintenance, la formation, le contrôle du matériel et la supervision réglementaire.

14.4.15 Avant d'examiner les dossiers, remettre à chaque membre du groupe une liste des chapitres de l'Air Transport Association (ATA). Presque toutes les données examinées renverront à ces chapitres. Diviser le groupe de travail en assignant à chaque personne une série de chapitres ATA pertinents.

14.4.16 Coordonner avec l'enquêteur désigné l'ampleur et les priorités de l'examen. Décider des documents qui doivent être copiés et des données qui doivent être extraites pour le rapport du groupe.

14.4.17 Tenir des réunions quotidiennes pour faire le point sur l'avancement des travaux et informer le groupe.

14.4.18 Le chef du groupe devra peut-être examiner les domaines sur lesquels son groupe devra se pencher et le type de compétences dont auront besoin les membres du groupe.

Programme de maintenance de l'exploitant

14.4.19 Dès que possible après avoir constitué le groupe, le chef du groupe doit demander au propriétaire/à l'exploitant de présenter au groupe son programme de maintenance approuvé. Il est essentiel que le groupe comprenne parfaitement le programme de maintenance de l'exploitant. Il sera normalement nécessaire d'obtenir l'aide de l'exploitant et, dans le cas d'accidents d'aéronefs d'un autre État, d'assurer une coordination avec le représentant accrédité de cet État.

14.4.20 Avant d'examiner la documentation qui s'applique spécifiquement à la maintenance de l'aéronef accidenté ou du programme de maintenance de l'exploitant, il est essentiel que l'exploitant explique aux membres du groupe le programme et les activités de maintenance qu'ils s'approprient à examiner.

14.4.21 Le chef du groupe et l'exploitant doivent établir l'ordre du jour cette réunion et examiner les points suivants :

- a) l'organisation du service de maintenance, notamment les relations fonctionnelles ;
- b) le type de programme de maintenance autorisé et l'organisme de réglementation compétent ;
- c) le programme d'inspection prévu. Inclure les types de vérifications, les intervalles de vérification, les endroits où sont effectuées les vérifications, la description de la division des vérifications en sous-étapes ou intervalles et la liste des vérifications effectuées par les fournisseurs de maintenance sous contrat ;
- d) les services de maintenance assurés dans le cadre du contrat, notamment la portée et les limites de ces services, la méthode de coordination pour la maintenance sur appel, la supervision et les directives de l'exploitant, le mouvement des dossiers et le suivi des travaux effectués ;
- e) le programme de liste minimale d'équipements (MEL), notamment le processus de suivi, les notifications, les procédures d'autorisation, etc. ;
- f) le programme de conformité aux consignes de navigabilité (AD), notamment le système de suivi, les méthodes de conformité aux inspections périodiques, la procédure de conversion des parties applicables des consignes de navigabilité en instructions techniques ou en autorisations techniques.
- g) le système de dossiers, notamment le type de système approuvé, la description des systèmes complémentaires, la méthode de collecte et de saisie des données, les éléments ou événements suivis, et les capacités d'extraction et d'impression des données ;

- h) les politiques et procédures relatives au service de matériel, notamment le programme de détection des pièces non approuvées, le contrôle d'inventaire, la séparation des pièces aptes au vol ou inaptées au vol et la supervision des fournisseurs ;
- i) le contrôle des spécifications de maintenance pour la certification (CMR) et les éléments obligatoires à inspecter (RII).

14.5 TRANSPORTEURS AÉRIENS

Notification du propriétaire/de l'exploitant

14.5.1 Immédiatement après la notification de l'accident et avant d'amorcer l'enquête, le chef du groupe doit veiller à ce que lui-même ou l'enquêteur désigné informe le propriétaire/l'exploitant de l'avion que tous les dossiers et manuels de maintenance relatifs à l'avion accidenté sont mis sous séquestre et qu'ils doivent être conservés et mis à la disposition du groupe pour examen, photographie ou copie lorsqu'il le demande.

Note.— De nombreux exploitants utilisent des systèmes complexes de tenue informatisée des dossiers en plus du programme réglementaire requis/approuvé de tenue des dossiers. Il est important de souligner que ces dossiers doivent aussi être mis à disposition.

14.5.2 Normalement les dossiers portant sur les 90 jours qui précèdent l'accident sont demandés, mais dans certains cas le groupe peut demander des dossiers qui remontent jusqu'à la construction de l'avion.

14.5.3 Sauf indication contraire dans la réglementation nationale, il incombe au propriétaire/à l'exploitant de mettre publications et les dossiers en sûreté jusqu'à ce que le chef du groupe ou son représentant en prenne possession. Dans certains cas, le chef du groupe peut demander qu'un service de l'organisme de réglementation locale prenne possession des dossiers jusqu'à ce que le groupe arrive.

14.5.4 Les manuels obtenus doivent être des versions à jour, en vigueur à la date de l'accident, des manuels publiés par l'exploitant et les constructeurs.

14.5.5 Il n'est pas nécessaire que l'organisme d'enquête conserve les documents originaux pourvu qu'il puisse obtenir des copies appropriées des dossiers requis.

14.5.6 Après les étapes préliminaires de mise sous séquestre des dossiers et de constitution du groupe, le chef doit se rendre au service de maintenance ou à tout autre endroit où sont conservés les dossiers.

Identification de l'avion, des moteurs et des hélices

14.5.7 Dès que possible après l'accident, demander au propriétaire/à l'exploitant de remplir le formulaire des données de l'avion. Le formulaire présenté en appendice au présent chapitre indique les renseignements qu'il faut normalement obtenir le plus tôt possible.

Certificat de maintenance

14.5.8 Des copies des spécifications d'exploitation doivent être mises à disposition. Ces spécifications définissent le programme de maintenance régulier de l'exploitant, notamment les limites et les autorisations spéciales, ainsi que son programme de contrôle de poids et centrage.

États de maintenance

Note.— Le volume des dossiers peut être impressionnant. Il n'est donc pas nécessaire que tous les dossiers indiqués ci-dessous soient physiquement remis au Groupe de la maintenance, mais ils doivent pouvoir les obtenir sur demande. Certains dossiers spécifiques entreront en jeu à mesure que l'enquête se précisera.

14.5.9 Exemples de dossiers à examiner :

- a) Livrets techniques de l'avion et, dans certains cas, les journaux des agents de bord pour les 90 jours précédant l'accident. Comme les comptes rendus ne sont pas normalisés, la plupart des inscriptions et des éléments à inscrire varient d'un transporteur aérien à l'autre et le nombre d'inscriptions ne doit pas être considéré comme une indication de la qualité du produit. Cependant, des points répétés peuvent indiquer un problème de l'avion.
- b) Données de maintenance de l'aéronef pour les 120 jours précédant l'accident.
- c) Fiches de tâches spéciales/non régulières. Toutes les fiches de tâches spéciales de la dernière vérification programmée et des vérifications des niveaux C et D.

Note.— Pour les avions de la catégorie transport, il y aura des centaines de fiches provenant de ces vérifications. Ces fiches contiennent des informations très utiles et peuvent orienter l'enquête.

- d) Tous les dossiers de réparation des moteurs, des hélices et des éléments principaux de l'aéronef.
- e) Inspections conditionnelles pour la durée de vie de l'aéronef, par exemple, atterrissages en surcharge, impacts aviaires, foudroiements, comptes rendus de dommages, etc.
- f) Toute maintenance ou entretien courant effectués avant le dernier vol, y compris les bordereaux d'avitaillement.
- g) Liste des réparations et modifications majeures.
- h) Liste de tous les travaux de certificats de type supplémentaires (STC) effectués sur l'aéronef accidenté.
- i) Données de surveillance de l'état des moteurs pour les 30 jours précédant l'accident.
- j) Journal des changements de moteurs, qui donne les renseignements sur les avions sur lesquels un moteur donné a été installé.
- k) Données de surveillance des vibrations des moteurs et de la cellule.
- l) Liste des éléments de la liste minimale d'équipements (MEL) installés dans l'aéronef accidenté.
- m) Rapports sur les arrêts en vol des moteurs pour l'année précédant l'accident.
- n) Éléments de la liste d'écarts de configuration (CDL) installés dans l'aéronef accidenté. Il s'agit des éléments indiqués à l'appendice CDL du manuel de vol approuvé (AFM).

Note.— Les éléments de la CDL définissent une configuration certifiée de l'avion. Ils n'exigent donc pas de recertification comme les éléments de la MEL.

- o) Toutes les consignes de navigabilité applicables à l'aéronef accidenté, notamment le dossier de conformité aux consignes de navigabilité de l'aéronef, indiquant les inspections périodiques et/ou les suites données aux inspections.
- p) Compte rendu de difficultés constatées en service (SDR). Ce système de collecte de données a pour but de mettre en évidence tout début de problème de sécurité présenté par l'aéronef. Ce système d'information englobe un vaste réseau de collaborateurs.
- q) Liste des bulletins/lettres de services publiés par les constructeurs et applicables à l'aéronef accidenté et à ses éléments.
- r) Liste des annulations/déroutements/déviations pour les 6 mois précédant l'accident.
- s) Incidents applicables à l'aéronef accidenté (et à tous les autres aéronefs du même modèle) pour les 6 mois précédant l'accident. Dans la mesure du possible, obtenir une liste distincte pour chaque poste de maintenance.
- t) Dossiers de poids et centrage de l'aéronef accidenté, notamment le calcul de devis de masse pour le décollage qui a précédé l'accident.

Note.— Les calculs de devis de masse sont généralement conservés avec les dossiers des opérations aériennes.

Publications

14.5.10 Les publications requises pour les aéronefs de gros tonnage varient avec le type de règlement d'exploitation qui régit l'aéronef. Un ensemble complet de toutes les publications requises serait immense. Les documents sont publiés en différents formats (imprimés, microfilms, microfiches, CD ou web). Les renseignements sur les révisions détaillées de maintenance figurent dans le manuel général de maintenance de l'exploitant,

Note.— Le volume des dossiers peut être impressionnant. Il n'est donc pas nécessaire que tous les dossiers indiqués ci-dessous soient physiquement remis au Groupe de la maintenance, mais ils doivent pouvoir les obtenir sur demande. Certains dossiers spécifiques entreront en jeu à mesure que l'enquête se précise.

14.5.11 Le groupe doit commencer, au minimum, par un exemplaire du manuel général de maintenance de l'exploitant et le manuel de maintenance de l'aéronef. Les publications suivantes sont caractéristiques des aéronefs exploités dans le cadre des règlements des transporteurs aériens :

- a) Les publications de maintenance comprennent les publications du constructeur de la cellule, des moteurs et des éléments de l'aéronef, par exemple : maintenance, réparations structurales, pièces illustrées, commandes logicielles, révisions, manuels NDT, manuels de maintenance des éléments, bulletins de maintenance, etc. Les publications examinées doivent être applicables à l'aéronef à la date de l'accident.
- b) L'organisme de réglementation compétent exige généralement que l'exploitant ait un système de documentation qui inclut les politiques et procédures de maintenance. Ces éléments figurent souvent dans le manuel général de maintenance. Ce document est important pour que l'enquêteur comprenne le programme de maintenance de l'exploitant. Il s'agit d'un document de référence ; il doit être obtenu dès le début de l'enquête et examiné par tous les membres du Groupe de la maintenance.

- c) Exemplaires de toutes les publications de service, par exemple, bulletins, lettres aux exploitants, conseils de maintenance, et bulletins publiés par l'exploitant et applicables à l'aéronef accidenté.
- d) Toutes les fiches de tâches de maintenance applicables à la date de l'accident ou à la date de la dernière vérification effectuée.

Examen de la maintenance

Généralités

14.5.12 L'examen de la maintenance a pour objectif de déterminer :

- a) si le travail a été exécuté conformément aux publications en vigueur, y compris les fiches de tâches ;
- b) si les travaux et les inspections ont été réalisés conformément au programme de maintenance approuvé ;
- c) l'adéquation de la supervision réglementaire ;
- d) si la pièce soupçonnée est une pièce authentique ou une pièce non approuvée ;
- e) si la pièce est approuvée et valide pour être installée sur un aéronef donné.

Cet examen peut dissiper certaines incertitudes et suggérer des pistes d'enquête.

Examen initial

14.5.13 Examiner le programme de maintenance de l'exploitant de manière à en acquérir une connaissance pratique.

14.5.14 Faire un examen rapide des inscriptions au livret de maintenance de l'aéronef et de l'imprimé des travaux de maintenance effectués au cours des 30 jours précédant l'accident. Cet examen doit porter sur les anomalies de maintenance qui semblent se rapporter aux systèmes soupçonnés d'après les renseignements limités disponibles sur l'accident.

Tests anti-drogue

14.5.15 Établir si l'exploitant ou un fournisseur de services de maintenance sous contrat a réalisé des travaux de maintenance sur l'aéronef dans les quelques jours qui ont précédé l'accident. Si tel est le cas, c'est à cette étape qu'il faut déterminer si les personnes qui ont effectué les travaux doivent passer un test anti-drogue.

Poids et centrage

14.5.16 Coordonner cette activité avec le Groupe de l'exploitation.

14.5.17 Dans le cadre de l'examen initial, confirmer l'exactitude des calculs de poids et centrage et du réglage de la compensation du stabilisateur de l'aéronef accidenté avant son dernier vol. Ce dossier peut se trouver dans les dossiers de régulation des vols. Vérifier aussi si l'aéronef était correctement chargé.

14.5.18 Vérifier la date de conformité et le lieu de la dernière pesée ainsi que la méthode utilisée. Si des balances électroniques ont été employées pour peser l'aéronef, vérifier la méthode et la date d'étalonnage et de certification.

14.5.19 Vérifier l'exactitude du dernier rapport de pesée enregistré. Ce rapport devrait confirmer les modifications apportées à la masse et au centre de gravité depuis la pesée précédente.

14.5.20 Confirmer si les modifications au rapport de pesée ont été communiquées au personnel technique d'exploitation approprié.

Examen détaillé

14.5.21 L'examen détaillé devrait être entrepris après que les autres groupes ont eu le temps de réunir des indices suffisants pour proposer des pistes d'enquête. Outre l'examen des antécédents de maintenance de l'aéronef accidenté, les programmes, politiques et conditions suivantes doivent être examinées en fonction des pistes d'enquête établies.

Programme et politiques de maintenance

14.5.22 Ces données se trouvent généralement dans le manuel général de maintenance. Ce document indique aussi l'organisation, les fonctions et les responsabilités du service, notamment les fonctions des groupes telles que le programme d'inspection, le contrôle des pièces, le contrôle de poids et centrage, le contrôle du matériel, l'administration des dossiers, les services techniques, etc.

14.5.23 Ce manuel peut être divisé en plusieurs documents qui portent sur des points particuliers, par exemple, avitaillement en carburant, dégivrage, liste minimale d'équipements, etc.

Gestion et supervision réglementaire

14.5.24 Certains accidents d'aéronefs se sont révélés être le résultat de défaillances organisationnelles ou de faiblesses de gestion et/ou de supervision réglementaire. Par exemple, un exploitant peut avoir prescrit ou accepté des procédures qui ne correspondent pas aux conditions de sécurité d'exploitation en vigueur, ou peut-être existait-il aussi des instructions ambiguës ou pouvant être interprétées de manières différentes. Ces facteurs peuvent très bien être dus à un examen peu réaliste effectué par les autorités de réglementation. Il peut donc être nécessaire d'examiner plus à fond d'autres organisations ou organismes qui ne sont pas immédiatement ou directement concernés par les circonstances de l'accident mais dont les actions, ou l'absence d'action, peuvent avoir favorisé, ou même causé, l'accident.

14.5.25 Examiner la supervision du poste de réparation de l'exploitant ou de l'organisme sous contrat effectuée par l'organisme de réglementation de l'État d'immatriculation.

- a) Examiner le programme de travail de l'inspecteur principal de maintenance (PMI). Noter l'ampleur des responsabilités du PMI, le pourcentage de temps passé avec l'exploitant en cause, le pourcentage de temps attribué à chaque domaine et toute aide apportée par d'autres inspecteurs (y compris les inspecteurs géographiques).
- b) Évaluer les qualifications et l'expérience du PMI et de ses assistants. Inclure dans cet examen leur expérience préalable (nom de l'organisme de réglementation) en matière de maintenance.
- c) Examiner les rapports des inspections requises réalisées par le PMI, le statut des inspections, les informations/observations sur les inspections et toutes les données de tendances de l'exploitant en cause. Examiner tout échange de lettres de suivi des inspections entre le PMI et l'exploitant.
- d) Si l'État effectue des audits de supervision officiels, examiner les rapports applicables à l'exploitant en cause. Par exemple, la FAA des États-Unis applique un programme national/régional d'inspection de la sécurité de l'aviation (NASIP/RASIP).

- e) Consulter les inspecteurs de maintenance en ligne, de maintenance en hangar et de maintenance en atelier, ainsi que les inspecteurs des organismes de réglementation locaux non associés à l'exploitant concerné, afin d'obtenir des renseignements sur les relations de travail entre le PMI et le personnel de l'exploitant chargé de la supervision de la maintenance.

Programme d'inspection

14.5.26 Ce programme comprend les éléments à inspection obligatoire, les procédures de retour, le contrôle des fournisseurs, le contrôle du matériel, l'analyse et la surveillance continues et la remise en service.

Programme de fiabilité

14.5.27 Comment procède l'exploitant pour identifier et suivre les indications répétées de problèmes, les tâches de maintenance en ligne et en hangar refusées (c'est-à-dire les tâches terminées mais considérées inacceptables à l'inspection) et le rejet précoce des pièces neuves d'aéronef (c'est-à-dire des pièces de nouvelle conception, ayant une utilisation en service limitée et considérées inaptes au vol lorsqu'elles sont reçues du fabricant). Obtenir un exemplaire du programme de l'exploitant.

Programme de contrôle des outils

14.5.28 Examiner la méthode de recensement des outils personnels et des outils de la compagnie après chaque quart de travail, la méthode de suivi d'un outil lorsqu'il est temporairement utilisé à un autre poste, les procédures appliquées en cas de perte d'un outil, et la méthode d'inspection de l'exploitant pour s'assurer que les boîtes à outils personnelles ne contiennent pas trop de pièces ou d'éléments détachés, en trop ou non approuvés.

Procédures de changement de quart

14.5.29 Les politiques de changement de quart varient considérablement. De nombreux accidents ont été attribués à des méthodes de transfert de travail médiocres ou inexistantes. Vérifier comment les techniciens qui commencent leur quart savent où s'est arrêté le travail du quart précédent lorsqu'une tâche de maintenance n'est pas terminée. S'assurer que le programme est vraiment appliqué et qu'il permet de vérifier et de suivre les composants ou le matériel déconnectés ou retirés pour donner accès à l'élément qui fait l'objet de la maintenance.

Programme d'inspection prévu

14.5.30 Ce programme figure dans les spécifications des opérations de maintenance ; l'examiner pour vérifier si tous les éléments de l'aéronef accidenté ont été inspectés aux intervalles requis.

Programme de vol de vérification de fonctionnement (FCF)

14.5.31 Déterminer les opérations de maintenance requises pour un FCF. Examiner le programme de l'exploitant pour la qualification des pilotes, la participation et la qualification des techniciens de maintenance, l'utilisation d'organigrammes ou de listes de vérification, la documentation des données et la détermination finale de navigabilité.

Programme complémentaire d'inspection des structures (SSIP)

14.5.32 Examiner le programme complémentaire de l'exploitant ainsi que son le programme de contrôle et de prévention de la corrosion. S'assurer que les rapports requis sont envoyés au Bureau de certification de l'aéronef et au constructeur pour des constatations de corrosion des niveaux 2 et 3. Examiner l'état des contrôles des aéronefs vieillissants de la flotte.

Programme de formation à la maintenance

14.5.33 Examiner le programme interne de formation aux moteurs, à la cellule et aux systèmes, notamment le programme de cours, les qualifications et la formation des instructeurs, le pourcentage de participation, la formation périodique, la formation aux systèmes spéciaux et la tenue de dossiers. Déterminer le pourcentage de participation aux stages de formation du constructeur. Déterminer ce que les techniciens pensent de la formation initiale et périodique.

Programme de contrôle de magasin

14.5.34 Si une pièce commerciale standard est soupçonnée, examiner le programme appliqué par l'exploitant pour recevoir et inspecter les pièces et les incorporer dans le système. Examiner la documentation pour vérifier si la pièce soupçonnée était « approuvée » et « apte au vol » lorsqu'elle a été installée dans l'aéronef. Être attentif aux éléments qui ont une date de péremption. Vérifier que les pièces, particulièrement les petites pièces telles que les rivets, les boulons et les joints d'étanchéité, ont été correctement fournies par un magasin approuvé et ne proviennent pas d'une source non contrôlée telle qu'une boîte à outils.

Programme concernant les dommages par corps étrangers (FOD)

14.5.35 Examiner le programme pour la maintenance en hangar, la maintenance en ligne et le dernier aéroport de départ de l'aéronef. Déterminer si les programmes sont effectivement appliqués. Vérifier non seulement le programme de l'exploitant mais aussi le programme du dernier aéroport de départ.

Publications

14.5.36 Ne pas oublier que les documents utilisés par les personnes concernées par l'accident peuvent ne pas représenter la version la plus récente des documents. Plusieurs facteurs peuvent en être la cause :

- a) les délais de diffusion des modifications aux usagers. Les formats de documents les plus courants sont les imprimés, les microfiches, les microfilms et les formats numériques ;
- b) les révisions temporaires qui sont facilement égarées ou qui peuvent ne pas être disponibles ;
- c) les conseils ou bulletins de maintenance (du constructeur et de l'exploitant) ne sont pas rigoureusement contrôlés ;
- d) des supports logiciels qui ne sont pas rigoureusement contrôlés ;
- e) des révisions imprimées qui n'ont pas été correctement envoyées ;
- f) utilisation de textes copiés qui sont conservés dans les boîtes d'outils personnelles. S'assurer que cette pratique est interdite par l'exploitant ;
- g) manuels placés à des endroits qui sont peu pratiques pour les utilisateurs.

14.5.37 Il faut aussi tenir compte des notes personnelles (notes de formation, carnets) conservées par chaque technicien, qui peuvent ou non concorder avec les pratiques de maintenance en vigueur. Vérifier aussi que les mises à jour telles que les révisions des manuels, les bulletins de service et les consignes de navigabilité sont disponibles et que les techniciens disposent de temps pour examiner ces documents périodiquement.

- 14.5.38 L'examen devrait permettre de s'assurer que :
- a) toutes les publications pertinentes utilisées par le personnel de maintenance étaient à jour à la date de l'accident ;
 - b) les techniciens ont facilement accès à toutes les publications pertinentes ;
 - c) les manuels et fiches de tâches ont été utilisés et suivis ;
 - d) les instructions et les fiches de tâches, y compris les illustrations, sont claires et non ambiguës. Il est utile de demander l'avis des techniciens à ce sujet ;
 - e) les illustrations et les schémas correspondent à l'aéronef et qu'ils représentent correctement la disposition des pièces installées. *Ce point est très important car les seules informations sur l'ordre de disposition des pièces auxquelles ont accès les techniciens sont souvent celles qui figurent dans les manuels (IPC, etc.), qui présentent l'habillage en vue éclatée ;*
 - f) les illustrations signalent les ambiguïtés possibles dans la présentation de l'installation et de l'orientation afin d'éviter les inversions de commandes ;
 - g) l'application à l'aéronef est correcte ;
 - h) les instructions tiennent compte des consignes de navigabilité, des instructions techniques et des bulletins de service applicables à l'aéronef accidenté.

États de maintenance

14.5.39 La tâche d'examiner les états de maintenance, y compris ceux qui sont transportés à bord de l'aéronef et ceux qui se trouvent aux postes par lesquels est passé l'aéronef, se déroule généralement au poste de l'exploitant qui détient les dossiers.

14.5.40 En plus des dossiers qu'il est tenu de conserver conformément à la réglementation, l'exploitant peut avoir d'autres dossiers opérationnels qui peuvent contenir des renseignements utiles. L'enquêteur doit déterminer si l'exploitant possède ce type de dossiers même s'ils ne sont pas requis par la réglementation.

14.5.41 L'enquête doit examiner toutes les opérations de maintenance de l'aéronef effectuées juste avant l'accident et déterminer si ces travaux ont été faits correctement.

14.5.42 Les travaux de maintenance et les inspections effectués doivent être examinés durant ce processus. Les inspections programmées (par ex., prévol, vérifications de fonctionnement, après vol, vérifications progressives et inspections périodiques, inspections conditionnelles et modifications) doivent être analysées pour déterminer si des opérations inadéquates ont causé l'accident ou y ont contribué. Les dossiers de l'aéronef doivent être soigneusement examinés pour déterminer si les opérations de maintenance ont été correctement documentées. Le personnel qui a participé aux opérations de maintenance peut être identifié à partir des dossiers de l'aéronef ainsi que d'entrevues. Il convient de tenir des entrevues avec les techniciens, les chefs d'équipe, les superviseurs et les gestionnaires d'atelier. À noter que si plusieurs personnes (par exemple, une équipe de changement de moteur) participent à un travail, ou si le travail est fait par plus d'une équipe (changement de quart), les dossiers ne contiendront les noms que de quelques-unes de ces personnes.

Livret technique de l'aéronef et journaux des agents de bord

14.5.43 Examiner les inscriptions au livret technique de l'aéronef accidenté pour les 90 jours précédant l'accident.

14.5.44 Veiller à noter l'identificateur du poste de maintenance, le numéro d'identification du mécanicien et le chapitre ATA pour toute anomalie signalée ou mesure correctrice qui semble présenter un problème.

14.5.45 Les inscriptions répétées dans le livret technique de l'aéronef pour un système particulier ou LRU peuvent indiquer un problème de l'aéronef ou un problème de LRU.

14.5.46 Il y a eu des cas où certains éléments de navigabilité ont été indiqués dans les journaux de agents de bord. Il est possible que l'exploitant n'ait pas de système pour vérifier le journal d'un agent de bord. Dans ce cas, il est possible que l'anomalie ne soit pas relevée par les services de maintenance et qu'elle ne soit pas corrigée.

Fiches de tâches

14.5.47 Si un enquêteur soupçonne un système ou un composant, il convient de demander les fiches de tâches régulières approuvées durant la dernière inspection applicable. Chaque élément sur la fiche pertinente doit être examiné en vue de déterminer les constatations de l'inspection et les mesures correctrices prises.

14.5.48 À noter que pour les avions de la catégorie transport, il y aura probablement des centaines de fiches de tâches spéciales depuis la dernière vérification programmée et la dernière vérification de niveau C ou D.

Inspections conditionnelles

14.5.49 Vu que ces inspections ne sont effectuées que lorsque l'aéronef fait face à des conditions spéciales ou inhabituelles, il est important d'examiner les dossiers de l'aéronef depuis ses débuts pour vérifier s'il y a déjà eu des dommages ou des réparations.

Rapports des dommages de l'aéronef

14.5.50 Ce rapport est peut-être le seul endroit où figure un dommage causé à un aéronef (par ex., camion de service entré en collision avec pylône moteur pendant que l'aéronef était stationné à la porte d'embarquement). Porter une attention particulière à tout dommage causé à l'aéronef au sol par le personnel d'entretien.

Maintenance sous contrat avant le vol final

14.5.51 Parler directement au superviseur de l'atelier pour déterminer les travaux effectués. L'exploitant peut ne pas encore être au courant de toutes les opérations exécutées sous contrat avant le dernier vol de l'aéronef.

Entretien courant

14.5.52 Examiner les procédures d'entretien courant, particulièrement l'avitaillement en carburant et le dégivrage, réalisées avant le dernier vol de l'aéronef.

Réparations et modifications majeures

14.5.53 Examiner la liste de tous les travaux STC réalisés sur l'aéronef accidenté. Dans un cas où il s'est produit une perte de contrôle en vol, l'examen de cette liste a permis d'établir que l'aéronef accidenté était le seul de toute la flotte de l'exploitant dont l'inverseur de poussée avait été récemment modifié.

Données du groupe motopropulseur

- 14.5.54
- a) Données de surveillance des moteurs pour les 30 jours précédant l'accident. Il peut y avoir un programme de surveillance officiel ou non officiel, ou seulement des données enregistrées sur le carnet de maintenance de l'aéronef. En cas d'obtenir des données brutes seulement, demander à l'exploitant d'afficher les données sous forme graphique.
 - b) Livret de changement de moteur. Ce carnet indique sur quel aéronef de la flotte étaient auparavant installés les moteurs de l'aéronef accidenté. Si un moteur est suspect, examiner ses antécédents de maintenance (par chapitre ATA) lorsqu'il était installé sur un autre aéronef.
 - c) Données sur les vibrations de la cellule et des moteurs.

14.5.55 *Liste minimale d'équipements (MEL)*. Liste des équipements MEL à bord de l'aéronef accidenté. Déterminer d'après la liste MEL de référence la catégorie (A, B, C ou D) des équipements emportés et si tout élément différé a dépassé la limite de temps admissible.

Liste des consignes de navigabilité

14.5.56 Examiner toutes les consignes de navigabilité applicables à l'aéronef accidenté. Confirmer les données et les méthodes de conformité. Si un élément ou un système qui semble présenter un problème est lié à une consigne de navigabilité, examiner une copie de l'instruction technique rédigée par l'exploitant pour donner suite aux parties applicables de la consigne de navigabilité. Dans le cas des consignes de navigabilité pour lesquelles aucune mesure finale n'a été prise, examiner les dossiers des mesures répétitives requises.

14.5.57 La recherche des consignes de navigabilité n'est pas facile. L'enquêteur doit s'assurer de consulter les index de l'aéronef, des moteurs, des hélices et des appareils, les suppléments publiés et les consignes de navigabilité elles-mêmes. Il est possible cependant que certaines directives soient difficiles à trouver même avec les meilleurs index et moteurs de recherche. Par exemple, il y a une consigne de navigabilité concernant les filtres à air en papier qui s'applique à des milliers de petits aéronefs. Il est facile de trouver cette directive en cherchant « filtre en papier », mais il est probable que l'enquêteur ne pensera pas à procéder de cette façon. Rien ne peut remplacer l'expérience et l'intuition dans la recherche des consignes de navigabilité.

14.5.58 De nombreux gros aéronefs ont été exploités dans différents États d'immatriculation. Dans la recherche des consignes de navigabilité, rechercher non seulement les directives applicables au registre actuel de l'aéronef, mais aussi les directives qui ont pu s'appliquer dans le cadre du registre précédent.

Spécifications de maintenance pour la certification (CMR)

14.5.59 Examiner le dossier d'exécution. S'assurer que toutes les spécifications CMR ont été appliquées dans les délais prescrits. Examiner les fiches de tâches correspondant à une CMR et tout travail non régulier qui a pu être effectué pour donner suite à ces vérifications CMR.

Compte rendu de difficultés constatées en service (SDR)

14.5.60 Examiner tout compte rendu lié à un élément suspect. Il faut être spécifique et préciser la question le plus possible. Il peut y avoir des milliers de comptes rendus pour un modèle d'aéronef donné. Tenir compte des limites des SDR indiquées plus haut.

14.5.61 De nombreuses personnes estiment que ces données ont peu de valeur pour les raisons suivantes :

- a) elles ne sont presque jamais la première source d'identification des problèmes de sécurité des aéronefs de transport ;
- b) les données sont de faible qualité et peuvent présenter des incohérences. Il manque souvent des renseignements essentiels ;
- c) les spécifications de compte rendu sont trop vagues, permettant trop d'interprétations de ce qui doit figurer dans le compte rendu ;
- d) les avionneurs présentent des avis verbaux et écrits sur les dysfonctionnements, les problèmes de service et les solutions éventuelles qui sont plus utiles que les données SDR. En outre, la quantité et la diversité des données fournies à l'industrie aéronautique par les avionneurs sont de beaucoup supérieures à celles du programme SDR. Les avionneurs fournissent aussi d'autres types de données, notamment les données techniques sur les inspections, les modifications et les réparations, les avis aux clients sur les événements courants et des conseils pour simplifier le dépannage et la maintenance ;
- e) Les données doivent être interprétées avec prudence. Les comptes rendus contiennent des informations non vérifiées dont la qualité dépend considérablement des connaissances, de l'expérience et du jugement de la personne qui rédige le compte rendu. Il faut être spécifique et préciser la question le plus possible. Il peut y avoir des milliers de comptes rendus pour un modèle d'aéronef donné.

Bulletins/lettres de service

14.5.62 Rechercher les titres qui s'appliquent à l'aéronef accidenté ainsi qu'aux éléments soupçonnés.

Dossiers des annulations, des déroutements et des déviations

14.5.63 Effectuer une recherche pour l'aéronef accidenté, ainsi que pour tous les aéronefs du même modèle faisant partie de la flotte, pour les six mois précédant l'accident. Dans la mesure du possible, classer les données par base de maintenance ; les listes obtenues peuvent indiquer une tendance.

Authentification des pièces

14.5.64 Après avoir établi qu'une pièce peut avoir un lien avec la cause probable de l'accident, il faut vérifier :

- a) sa navigabilité ;
- b) son installation, c'est-à-dire si elle a été installée correctement ;
- c) ses antécédents de maintenance.

14.5.65 Il existe de nombreuses sources de pièces qui ne sont pas conformes aux spécifications applicables mais qui entrent dans le système aéronautique. Des accidents ont trop souvent été attribués à des pièces non conformes ou mal installées, qui sont soit la cause première de l'accident, soit un facteur contributif probable de l'accident.

Navigabilité

14.5.66 La navigabilité d'un produit aéronautique signifie que le produit est conforme à la conception approuvée et qu'il est en état de fonctionner en toute sécurité. Pour que le produit puisse continuer à être apte au vol, les pièces remplacées ou modifiées doivent aussi être conformes à la conception approuvée.

14.5.67 La navigabilité d'un produit aéronautique qui contient des pièces non approuvées est suspecte parce la définition de type et la qualité de la pièce sont inconnues. Il est souvent difficile d'identifier une pièce non conforme à cause de la similitude des caractéristiques des pièces non approuvées et de celles des pièces approuvées.

14.5.68 Pour déterminer la navigabilité d'une pièce il faut d'abord trouver son origine. L'enquêteur doit connaître les programmes de pièces non approuvées suspects.

14.5.69 Il faut surtout s'assurer que la pièce n'est pas une contrefaçon.

14.5.70 La chaîne d'indices devient de moins en moins claire avec les petits avions de l'aviation générale. L'origine d'une pièce est parfois obscure, particulièrement pour les avions qui ont eu de nombreux exploitants ou propriétaires et qui sont inscrits dans différents registres. Le changement d'État d'immatriculation en particulier brouille les règles de navigabilité et de maintenance applicables. Les pièces non approuvées suspects deviennent un facteur important.

Pièces non approuvées

14.5.71 Les pièces se divisent en deux grandes catégories non officielles : les pièces approuvées et les pièces non approuvées. Collectivement, elles sont appelées « pièces non approuvées » ; le terme « pièces approuvées » s'applique aux pièces qui sont conformes aux spécifications applicables.

14.5.72 Le terme « pièce approuvée », couramment employé, n'est pas synonyme de « pièce ayant reçu une approbation réglementaire officielle ». Les termes « pièces approuvées » et « pièces non approuvées » utilisés ici ne sont pas des définitions juridiques, mais traduisent simplement la nécessité d'avoir un générique pour désigner les pièces qui doivent, ou ne doivent pas, être installées dans un aéronef. Les pièces qui peuvent être utilisées dans un aéronef (c'est-à-dire des « pièces approuvées ») sont décrites comme des « pièces acceptables, ou admissibles, pour l'installation ».

Pièces contrefaites

14.5.73 Les pièces contrefaites sont un type pernicieux de « pièces non approuvées ». Elles sont faites ou modifiées pour ressembler à une « pièce approuvée », sans autorisation ni droit, et avec l'intention de tromper ou de frauder en faisant passer l'imitation pour une pièce originale ou authentique. Il peut s'agir de pièces neuves qui sont délibérément présentées comme conçues et produites dans le cadre d'un système approuvé ou d'autres méthodes acceptables même si tel n'est pas le cas.

14.5.74 Les pièces contrefaites peuvent aussi être des pièces usagées qui, même si elles ont été produites dans le cadre d'un système approuvé, ont atteint la limite de leur durée de vie utile ou ont été endommagées et sont considérées irréparables selon les normes aéronautiques, mais qui ont été délibérément modifiées et présentées comme acceptables avec l'intention de tromper ou de frauder.

Pièces réparables récupérées

14.5.75 Lorsqu'un avion n'est plus construit et que les pièces de rechange ne sont plus disponibles, il est assez courant d'acquérir une pièce d'un centre de récupération, notamment pour les éléments de structure. Il faut se méfier des pièces à durée de vie limitée qui ont été récupérées.

14.5.76 S'il est estimé qu'une pièce qui a déjà servi peut être réutilisée dans des conditions contrôlées, elle est récupérable. Ces pièces doivent être documentées et contrôlées afin qu'elles ne soient pas réutilisées en service jusqu'à ce qu'elles aient satisfait à toutes les spécifications de navigabilité.

14.5.77 S'il est estimé qu'une pièce usagée ne peut pas être réutilisée ni récupérée, elle devient une pièce « rebutée » et doit être retirée de manière à ce qu'elle ne puisse pas être réutilisée dans le service aéronautique. Cependant, les pièces récupérables et les pièces rebutées sont parfois présentées comme n'ayant pas atteint la fin de leur durée de vie utile et comme ayant été réparées conformément aux règlements.

14.5.78 D'autres exemples de pièces qui ne sont pas admissibles sont les pièces rejetées durant le processus de production à cause de défauts, les pièces dont on a perdu la documentation requise, les pièces mal entretenues et les pièces provenant d'aéronefs militaires dont la conformité avec les spécifications réglementaires de l'aviation civile n'a pas été démontrée. Aucune de ces pièces ne doit être installée dans un aéronef.

14.5.79 Les « pièces non approuvées » sont aussi celles d'un fournisseur qui produit des pièces pour un fabricant agréé mais qui expédie ces pièces directement à l'utilisateur final sans l'autorisation du fabricant agréé ou sans l'approbation de fabricant de pièces (PMA) applicable. Les pièces de surplus de production sont un exemple de ce cas. Comme ces pièces ne sont pas autorisées par les titulaires d'approbation de production (PAH), on ne peut pas confirmer qu'elles sont conformes à toutes les spécifications du processus de contrôle de la qualité requis par les PAH ; elles contreviennent donc aux règlements et leur utilisation dans des produits aéronautiques n'est pas autorisée.

14.5.80 Il est évident que le concept de « pièce non approuvée » est très large et qu'il englobe tant les pièces mal entretenues que les pièces fabriquées sous approbation réglementaire mais expédiées sans la bonne documentation ou les pièces délibérément et criminellement présentées comme des « pièces approuvées ».

Preuve d'authenticité ou preuve de propriété passée

14.5.81 Dans le cas des unités remplaçables sur place (LRU), on peut retrouver l'origine de la pièce à l'aide de leurs étiquettes d'approbation de navigabilité, de bon état de service et de retrait. Les étiquettes de retrait sont celles qui sont normalement attachées aux LRU enlevées et qui indiquent si elles sont aptes au vol, réparables ou condamnées.

14.5.82 Si l'aéronef accidenté, ses éléments, ses moteurs ou ses hélices ont été récemment importés, examiner toute la documentation d'importation et les mesures de qualification de ces éléments pour le service. Il faudra peut-être contacter et interroger le personnel de réglementation qui a mené le processus. Il faudra peut-être aussi contacter le bureau de réglementation qui a assuré la supervision des services et des installations de réparation étrangers utilisés par l'exploitant.

14.5.83 L'identification des pièces et les procédures de contrôle figurent dans le manuel général de maintenance de l'exploitant.

Revendeurs de pièces

14.5.84 Les revendeurs de pièces ne sont pas réglementés. Des pièces récupérées d'aéronefs accidentés finissent souvent dans cette chaîne de distribution.

Pièces empruntées

14.5.85 L'emprunt de pièces est une pratique courante et exige souvent une approbation spécifique de l'organisme de réglementation. Déterminer si l'exploitant et le prêteur sont autorisés à emprunter des pièces. Consulter les spécifications d'exploitation des deux exploitants. Le manuel général de maintenance des exploitants contient des procédures sur l'emprunt de pièces.

Approbation de fabricant de pièces (PMA)

14.5.86 Si la pièce a été fabriquée dans le cadre d'une PMA, vérifier les détails de la PMA et son authenticité.

Certificat de type supplémentaire (STC)

14.5.87 Vérifier les détails du STC et son authenticité. Déterminer si l'aéronef accidenté fait partie du STC et si le STC est valide dans l'État d'immatriculation de l'aéronef accidenté.

Constructeur de l'équipement d'origine (OEM)

14.5.88 Pour déterminer si une pièce a été installée au moment de la construction de l'aéronef, consulter les dossiers de livraison et d'approvisionnement de l'aéronef.

14.5.89 Si beaucoup de temps a passé, les renseignements peuvent être obtenus des dossiers des magasins de l'exploitant, tels que les bons de commande et/ou les fiches de contrôle de réception.

14.5.90 Lorsque l'aéronef accidenté n'est plus construit, les OEM sont une source fréquente d'éléments structurels de réserve. Ces éléments structurels proviennent d'aéronefs retirés du service et vendus tels quels. L'acheteur doit établir l'état de navigabilité de ces éléments.

Pièces de fabrication interne

14.5.91 Les pièces qui ne sont pas officiellement approuvées par les organismes de réglementation, mais qui sont acceptables si elles sont utilisées dans l'application appropriée, sont les pièces « fabriquées » par le personnel de maintenance dans le cadre de leurs travaux de réparation afin de remettre un produit (aéronef, moteur ou hélice) en service. Ces pièces doivent quand même être conformes aux critères de conception. On peut citer comme exemple des pièces en tôle, des canalisations, des ensembles de câbles, etc.

Éléments résultant d'une conformité à une consigne de navigabilité

14.5.92 Un bulletin de service joint à une consigne de navigabilité demandera souvent un ensemble de pièces ou la fabrication locale d'un élément.

Matériel standard

14.5.93 Le matériel de fixation est-il bon ? Il n'est pas rare d'utiliser, consciemment ou non, du matériel tel que des écrous, des boulons ou autres fixations qui ne sont pas conformes aux normes aéronautiques.

14.5.94 Les constructeurs de produits tels que des cellules et des moteurs spécifient souvent qu'il est acceptable d'utiliser des « pièces standard », comme des écrous ou des boulons, pour la production et la maintenance de ces produits. La production de pièces standard n'est pas surveillée par les organismes de réglementation, mais elle doit se conformer aux critères acceptés de l'industrie. Les pièces standard peuvent être testées pour en déterminer la conformité et ne peuvent être utilisées dans les produits aéronautiques que lorsque la conception de type le spécifie.

14.5.95 La spécification doit être une spécification établie de l'industrie ou une spécification internationale acceptable qui contient des critères de performance, des critères d'essai et d'acceptation et des exigences d'identification uniformes. Elle doit inclure tous les renseignements nécessaires pour produire la pièce et être publiée de manière que la pièce puisse être fabriquée par n'importe quelle entité. On peut citer comme exemple notamment la National Aerospace Standards (NAS), l'Army-Navy Aeronautical Standard (AN) et la Society of Automotive Engineers (SAE) des États-Unis.

Bailleurs

14.5.96 De plus en plus de LRU et d'éléments ayant une certification de type sont loués aux exploitants. Le bail peut inclure la maintenance assurée par le bailleur.

Exploitants précédents

14.5.97 Les propriétaires ou exploitants précédents peuvent avoir transféré leur inventaire de pièces de rechange au nouveau propriétaire ou exploitant. Comme l'État d'immatriculation peut avoir changé avec le transfert à un nouveau certificat d'exploitation, il faut vérifier si les pièces transférées répondent aux spécifications de navigabilité du nouvel État d'immatriculation.

Installation

14.5.98 La mauvaise installation d'une pièce est un autre élément qui peut, bien trop souvent, contribuer à un accident. La pièce soupçonnée convenait-elle à l'aéronef accidenté ? La pièce était-elle bien orientée ?

Antécédents des pièces

14.5.99 Plusieurs configurations d'une pièce peuvent être utilisées dans un aéronef ou des dépendances données pourvu qu'elles fassent l'objet de bulletins de service du fabricant. Le logiciel installé est-il compatible avec la pièce et avec l'aéronef ? Si cette pièce ne faisait pas partie de l'installation originale, pourquoi a-t-elle été installée dans l'aéronef accidenté ?

- a) Quelle est la moyenne des temps entre déposes non planifiées (MTBUR) de la pièce ?
- b) Quelle est le résultat de l'utilisation de la pièce suspecte dans la flotte ?
- c) Quel est son mode de défaillance caractéristique ?
- d) Quels sont les processus de maintenance pour la pièce ?
- e) Maintenance à périodicité fixe, selon l'état, ou surveillance du comportement en service ?
- f) La durée de vie de la pièce est-elle limitée ?
- g) Les limites (heures/cycles) se sont-elles intensifiées dans le programme de maintenance de l'exploitant ? L'exploitant est-il autorisé à les augmenter ?

14.6 ENQUÊTE SUR LES AÉRONEFS DE L'AVIATION GÉNÉRALE

Généralités

14.6.1 La gamme des opérations et de l'équipement de l'aviation générale est vaste. Les appareils utilisés comprennent des avions ultralégers, des avions ayant des certifications de type, notamment les avions à voilure fixe à turbines à gaz ou à moteurs alternatifs, les planeurs et les aérostats. Ils comprennent aussi des appareils expérimentaux tels que les avions de construction amateur et les avions militaires restaurés. Ils vont des petits appareils expérimentaux jusqu'aux gros aéronefs de la catégorie transport.

14.6.2 Ces appareils sont exploités par des amateurs, des particuliers, des sociétés qui n'œuvrent pas dans le domaine du transport aérien, des flottes de transport aérien des personnalités et des organisations de copropriété.

14.6.3 La réglementation de l'aviation générale n'est pas aussi rigoureuse que celle des transporteurs aériens.

Enquête sur les accidents d'aviation générale

14.6.4 La plupart des enquêtes sur les accidents de l'aviation générale ne sont menées que par un seul enquêteur, qui a accès à des spécialistes au besoin, plutôt que par une équipe d'enquête.

14.6.5 Les enquêtes sont parfois conduites par l'organisme de réglementation technique du pays où s'est produit l'accident plutôt que par un organisme gouvernemental indépendant dont la seule fonction est d'enquêter sur les accidents. Les enquêtes réalisées par ces organismes techniques se limitent à la collecte de données, de faits et d'autres preuves. À la fin de la phase d'enquête, ces éléments sont envoyés à l'organisme d'enquête, qui effectue l'analyse, détermine la cause probable et publie le rapport final.

Programmes de maintenance de l'aviation générale

14.6.6 La maintenance des petits aéronefs est caractérisée par des processus à périodicité fixe tandis que la plupart des programmes de maintenance des transporteurs aériens sont axés sur la fiabilité.

14.6.7 Les réparations ou modifications mineures peuvent être effectuées par un poste de réparation ou par une personne dûment certifiée. Le travail effectué est normalement inscrit dans le livret de l'aéronef. Si les travaux sont réalisés par un poste de réparation, ils seront consignés dans les dossiers du poste de réparation ainsi que dans le livret de l'aéronef.

14.6.8 Les réparations majeures et mineures sont inscrites dans le livret et font l'objet d'un rapport officiel qui est soumis à l'autorité de réglementation technique compétente.

14.6.9 Les livrets de l'aéronef, des moteurs et de poids et centrage peuvent constituer les seuls états de maintenance. Ils sont fréquemment transportés à bord de l'aéronef lui-même, ce qui n'est certes pas une bonne pratique. Il arrive souvent cependant que l'exploitant de l'aéronef note tout travail de maintenance fait à l'extérieur de sa base et qu'il envoie les informations à sa base.

Aéronefs de construction amateur

14.6.10 Dans de nombreux États, les règles de construction et de maintenance des aéronefs de construction amateur permettent aux propriétaires/exploitants d'effectuer l'entretien régulier de l'appareil. La certification de l'aéronef en tant qu'aéronef « expérimental » donne au propriétaire/à l'exploitant un plus grand accès à la maintenance. Les enquêteurs doivent déterminer si le propriétaire/l'exploitant de l'aéronef accidenté a dépassé les limites de maintenance autorisées par l'organisme de certification de l'État.

Méthode d'enquête

14.6.11 La méthode d'enquête sur les accidents de petits aéronefs est la même que celle qui s'applique aux accidents d'aéronefs de transport.

Publications

14.6.12 Les publications et les états de maintenance ne sont pas aussi exhaustifs. Par exemple, les informations sur l'exploitation technique, les limites de l'aéronef, les performances, le poids et le centrage figurent tous dans un même document appelé le manuel de vol. Il y a généralement un manuel de maintenance (instructions relatives au maintien de la navigabilité qui contiennent des renseignements sur les limites des délais de maintenance) et le document de pièces illustrées.

14.6.13 Certains aéronefs n'ont que peu ou pas de données techniques disponibles. Les exemples types sont les aéronefs expérimentaux de construction amateur et les aéronefs militaires restaurés. Il se peut que l'aéronef ne soit plus produit et que le titulaire du certificat de type en vigueur n'ait pas effectué de suivi du type d'aéronef. Une façon d'obtenir des données est de communiquer avec le titulaire du certificat de type en vigueur, un musée et les archives du constructeur d'origine ainsi que les groupes spécialisés dans la restauration.

États de maintenance

14.6.14 Lorsqu'un aéronef d'aviation générale impliqué dans un accident a fait l'objet de nombreuses modifications, le processus d'enquête est élargi pour inclure les données sur les modifications et les données techniques relatives aux STC ainsi que les réparations et modifications majeures.

14.6.15 Pour certains accidents, il y aura peu d'états de maintenance disponibles. Il arrive très souvent que tous les dossiers de l'aéronef soient transportés à bord de l'aéronef et qu'ils soient détruits, ce qui rend la tâche de l'enquêteur plus difficile. De nombreux renseignements sur les travaux récents effectués sur l'aéronef et d'autres aspects qui font normalement partie d'une enquête sur la maintenance peuvent tout de même être tirés d'entrevues avec le personnel de maintenance et l'équipage de conduite.

14.6.16 Les états de maintenance sont généralement conservés dans des livrets séparés. Les livrets de l'aéronef [cellule, moteur(s), hélice(s)] indiquent le total des heures et des cycles. Les dossiers d'inspection peuvent être conservés à un endroit différent.

14.7 LES FACTEURS HUMAINS EN MAINTENANCE

Généralités

14.7.1 La partie de l'enquête sur la maintenance portant sur les facteurs humains doit être conduite de la même manière que celle qui porte sur les membres de l'équipage de conduite de l'aéronef accidenté. Les habitudes de vie et les conditions de travail peuvent contribuer à créer des situations qui conduisent à un accident. Des éléments tels que les périodes de service, les politiques de travail par quarts, le nombre de jours de travail continu avant l'accident, etc., doivent être examinés pour déterminer s'ils ont contribué à l'accident ou s'ils l'ont causé. Les pressions opérationnelles exercées sur des ressources limitées doivent être examinées de la même façon.

14.7.2 Évaluer les conditions de travail du personnel de maintenance en ligne et en hangar (quarts de jour et de nuit). Examiner l'éclairage, la température, la ventilation, la sécheresse, le bruit, les dangers (plateformes peu solides ou instables), les dimensions et l'espace disponible de l'aire de travail ainsi que la collecte et l'élimination des déchets dangereux. Examiner la cohérence d'attribution des quarts, le nombre d'heures supplémentaires et l'adéquation des périodes de repos. Interroger les travailleurs et obtenir leur avis sur les relations avec les superviseurs, la direction, l'entité mère et les syndicats.

14.7.3 Demander l'avis des travailleurs sur la clarté des manuels, des fiches de tâches et des instructions verbales, particulièrement celle des éléments qui se rapportaient aux travaux effectués juste avant l'accident.

14.7.4 L'enquêteur doit examiner les facteurs suivants en détail :

- a) principes de l'erreur humaine ;
 - 1) physiologie ;
 - 2) bien-être physique des personnes ;
 - 3) processus de communication utilisés ;
 - 4) conscience de la situation ;
 - 5) les personnalités de toutes les parties liées à l'accident.
- b) Équipes :
 - 1) cycles de rotation ;
 - 2) périodes de repos fournies et utilisées ;
 - 3) durée des quarts de jour et de nuit ;
 - 4) tâches supplémentaires imposées à l'opérateur.
- c) Environnement :
 - 1) au travail ;
 - 2) à la maison.
- d) Équipement et installations :
 - 1) adéquation ;
 - 2) antécédents de service ;
 - 3) maintenance.
- e) Gestion :
 - 1) culture organisationnelle ;
 - 2) relations entre la direction et le syndicat ;
 - 3) programme de formation ;
 - 4) programmes de sécurité et de sensibilisation à la sécurité ;
 - 5) appui visible ;

- 6) processus de retour d'information.
- f) Normes et procédures :
 - 1) procédures opérationnelles normalisées documentées et disponibles pour tous.

INFORMATIONS SUR L'AÉRONEF DOSSIER DE CERTIFICAT DE TYPE SUPPLÉMENTAIRE (STC)	
NUMÉRO	TITRE
TITULAIRE	
ADRESSE	
DESCRIPTION	
NUMÉRO	TITRE
TITULAIRE	
ADRESSE	
DESCRIPTION	
NUMÉRO	TITRE
TITULAIRE	
ADRESSE	
DESCRIPTION	
NUMÉRO	TITRE
TITULAIRE	
ADRESSE	
DESCRIPTION	
NUMÉRO	TITRE
TITULAIRE	
ADRESSE	
DESCRIPTION	

Données sur l'aéronef (Page 2 de 4)

INFORMATIONS SUR LE GROUPE MOTOPROPULSEUR						
POSITION	MODÈLE	MOTORISTE	NUMÉRO DE SÉRIE	NUMÉRO TCDS	HEURES TOTALES	CYCLES
CONSIGNE DE NAVIGABILITÉ — GROUPE MOTOPROPULSEUR						
NUMÉRO	TITRE			DATE D'ÉCHÉANCE	DATE D'ACHÈVEMENT	
DOSSIER DE CERTIFICAT DE TYPE SUPPLÉMENTAIRE (STC)						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						

INFORMATIONS SUR LE GROUPE MOTOPROPULSEUR						
POSITION	MODÈLE	MOTORISTE	NUMÉRO DE SÉRIE	NUMÉRO TCDS	HEURES TOTALES	CYCLES
CONSIGNE DE NAVIGABILITÉ — GROUPE MOTOPROPULSEUR						
NUMÉRO	TITRE			DATE D'ÉCHÉANCE	DATE D'ACHÈVEMENT	
DOSSIER DE CERTIFICAT DE TYPE SUPPLÉMENTAIRE (STC)						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						
NUMÉRO	TITRE					
TITULAIRE						
ADRESSE						
DESCRIPTION						

Chapitre 15

ENQUÊTE SUR LES HÉLICOPTÈRES

La plupart des points exposés dans les chapitres précédents s'appliquent autant aux enquêtes sur les aéronefs à voilure fixe qu'aux enquêtes sur les hélicoptères et ils ne seront pas répétés dans le présent chapitre. Ce chapitre ne traite que des points particuliers qui s'appliquent uniquement aux enquêtes sur les accidents d'hélicoptères ; il doit donc être lu en parallèle avec les renseignements contenus dans le reste du présent manuel.

15.1 GÉNÉRALITÉS

15.1.1 Le présent chapitre décrit les éléments techniques applicables exclusivement aux hélicoptères et l'environnement dans lequel ils évoluent en prenant comme exemple un hélicoptère avec un seul rotor principal tournant dans le sens antihoraire lorsqu'il est vu de dessus. Les rotors principaux tournant dans le sens horaire seront mentionnés s'il y a lieu.

15.1.2 Les processus et spécifications de certification des giravions continuent à évoluer en même temps qu'évoluent les hélicoptères. L'enquêteur doit comprendre les normes qui étaient applicables au moment de la certification de l'hélicoptère en cause.

15.1.3 La terminologie utilisée par les réglementeurs, les autorités de certification, les constructeurs, les exploitants et les organismes de maintenance n'est pas normalisée. Par souci de clarté, les termes utilisés couramment dans l'industrie ou par les autorités de certification seront employés dans le présent chapitre.

15.2 PARTICULARITÉS DES MODÈLES

15.2.1 La vie d'un hélicoptère commence par la décision de créer et de produire un appareil qui réponde aux performances opérationnelles et aux caractéristiques des missions. La phase préliminaire de la conception est un processus itératif qui amène à déterminer les dimensions de l'hélicoptère, du rotor et du groupe motopropulseur en fonction du poids brut prévu. Pour un poids brut donné, la charge au disque détermine le rayon du rotor et la vitesse descendionnelle en autorotation. La vitesse de rotation du rotor est déterminée par l'aérodynamique de l'extrémité des pales du rotor. Une faible vitesse de l'extrémité des pales signifie un angle d'attaque plus grand sur la pale reculante tandis qu'une vitesse élevée de l'extrémité des pales crée des nombres de Mach élevés sur la pale avançante. La plus petite surface de pale maintenant une marge de décrochage adéquate est généralement choisie dans le processus de conception. Les dimensions du fuselage et du rotor principal n'indiquent pas toujours une caractéristique importante : l'inertie du rotor. Dans les systèmes à faible inertie, le régime rotor augmente ou diminue facilement et rapidement durant le vol. Dans les systèmes à forte inertie, le régime rotor augmente ou diminue relativement lentement. Un hélicoptère type possède généralement un rotor anticouple qui produit une poussée pour contrer le couple rotor principal et empêcher l'hélicoptère de tourner autour de son axe vertical dans le sens opposé à la rotation du rotor principal. La production d'un hélicoptère est donc un compromis entre de nombreux paramètres aérodynamiques, mécaniques, structuraux, opérationnels et économiques.

15.2.2 L'enquêteur ne doit poser aucune hypothèse sur l'hélicoptère qui fait l'objet de l'enquête. Il faut connaître comment fonctionnent les commandes de l'hélicoptère accidenté. Dans certains hélicoptères, par exemple, et dans certaines opérations, le siège du commandant de bord est à gauche. Dans certains cas, la manette de poussée du collectif tourne dans le sens horaire pour augmenter le régime du moteur. L'enquêteur doit comprendre ces particularités avant de procéder à l'examen du système de commande. Il doit aussi connaître le sens de rotation du rotor principal (ou des rotors principaux) et du rotor de queue, le sens de la rotation de tous les arbres d'entraînement extérieurs au moteur et à la boîte de transmission et, dans le cas des hélicoptères multimoteurs, comment se combine la puissance des moteurs. Certains giravions ont des enregistreurs de vibrations des éléments dynamiques utilisés pour l'analyse de maintenance. Ces enregistreurs peuvent révéler une fatigue ou une défaillance potentielle des éléments dynamiques.

15.2.3 Les hélicoptères de catégorie A sont conçus et construits selon des normes plus rigoureuses que ceux de la catégorie B. Par exemple, en cas d'incendie moteur, les hélicoptères de catégorie A doivent pouvoir être contrôlés et continuer à voler pendant 15 minutes après l'incendie, mais ce temps n'est que de 5 minutes pour les hélicoptères de catégorie B.

15.2.4 On peut aussi établir comme règle générale que tout dispositif aérodynamique ajouté à l'arrière d'un hélicoptère est là pour résoudre une carence aérodynamique ou mécanique.

15.3 ENQUÊTE TECHNIQUE

15.3.1 Il faut vérifier l'intégrité des principaux éléments structurels de l'hélicoptère soumis à des charges ou à des contraintes répétées, soit notamment : les pales et les fixations de rotor ; les têtes de rotor, y compris les moyeux, les articulations et les amortisseurs du rotor principal ; les éléments du système de commande tels que les biellettes de commande, la structure des servocommandes et les plateaux cycliques ; la structure de support du rotor ; le fuselage, y compris les stabilisateurs et les gouvernes auxiliaires ; et le train d'atterrissage fixe ou rétractable et son raccordement à la structure du fuselage.

Cellule

Fuselage

15.3.2 Les dommages subis par le fuselage et les marques laissées sur le terrain peuvent indiquer l'assiette de l'hélicoptère à l'impact et les valeurs relatives des vitesses horizontale et verticale auxquelles l'hélicoptère s'est écrasé. Des indications de rotation en lacet au moment de l'impact peuvent suggérer une défaillance possible du rotor de queue. Noter la ligne de déformation du fuselage et si le fuselage est en métal ou en composite ou en une combinaison des deux. Déterminer si l'espace habitable du giravion permettait à la cellule de maintenir une enveloppe protectrice autour des occupants. En général, les structures métalliques rebondissent d'environ 50% après l'impact. Noter cette caractéristique par rapport à l'espace de surviabilité des occupants. De nombreux modèles d'hélicoptères sont équipés de sièges spécialement conçus pour absorber l'énergie. Noter la direction et le degré de déformation des sièges et la capacité d'absorption d'énergie du modèle de sièges. La déformation de l'armature du siège peut imposer des charges imprévues aux absorbeurs d'énergie ou provoquer un frottement excessif dans les glissières entre le baquet et l'armature du siège, qui a pour effet de bloquer les absorbeurs. Il a été signalé, dans plusieurs accidents, que des brides de fixation des câbles de l'équipement de communication bloquaient les dispositifs d'absorption d'énergie des sièges.

Impact de rotor

15.3.3 Noter tout dommage qui pourrait indiquer que le rotor a heurté le fuselage. Un rotor qui heurte le fuselage en vol signifie généralement que le contact est dû au cognement du mât, au décrochage du rotor ou à un battement rotor excessif causé par une manipulation de commande avec un régime rotor trop bas ou une manœuvre sous des

forces g réduites. Dans les cas de rupture en vol, même la perte d'une partie relativement petite d'une pale peut causer des vibrations tellement fortes que l'hélicoptère commence à se disloquer en vol. Noter si les portes de la cabine ont été enlevées ou ouvertes pour le vol ou si les vibrations ont pu les ouvrir pendant le vol. Des portes ouvertes augmentent les probabilités que des éléments de la cabine soient projetés à l'extérieur et heurtent le rotor de queue. Vérifier si des parties détachées de panneaux ou de capot ont pu amorcer l'accident.

Poutre de queue

15.3.4 Vérifier si la poutre de queue s'est détachée. Noter l'emplacement des flambages et des déchirures. Déterminer si la poutre de queue s'est détachée principalement en flexion ou en torsion. Vérifier si le rotor principal a heurté la poutre de queue. Examiner l'intérieur de la poutre de queue et vérifier s'il y a des marques de frottement qui auraient pu être causées par l'arbre d'entraînement du rotor de queue. Examiner les accouplements et les paliers de l'arbre d'entraînement du rotor de queue et vérifier s'il y a des signes de déformation ou de fatigue causés par la rotation.

Stabilisateur

15.3.5 La plupart des hélicoptères ont un stabilisateur horizontal fixé à la poutre de queue et certains ont un stabilisateur raccordé au plan fixe vertical. Dans certains cas le stabilisateur est fixe ; dans d'autres, il est raccordé aux commandes de vol et commandé par le cyclique ou par le collectif ; certains sont commandés automatiquement par un détecteur de vitesse du système de commandes automatiques de vol. La charge aérodynamique vers le bas exercée par le stabilisateur horizontal sur la poutre de queue augmente avec la vitesse vers l'avant. Il n'est pas inhabituel de voir des angles de calage différents sur les stabilisateurs en raison des différences d'écoulement d'air des deux côtés de la poutre de queue. Si le stabilisateur se détache à une vitesse vers l'avant élevée, la charge vers le bas est immédiatement réduite. Le piqué qui en résulte, combiné au déplacement instinctif du cyclique vers l'arrière par le pilote, peut causer une inclinaison suffisante du rotor principal pour qu'il heurte la poutre de queue. Il n'est pas rare de trouver le stabilisateur horizontal coupé dans le sens de l'envergure par les pales du rotor principal. Déterminer l'état et la position du stabilisateur et de ses commandes.

Accessoires consommables

15.3.6 Les accessoires consommables fixés à l'extérieur du fuselage et sur le train d'atterrissage, tels que des caméras, des haut-parleurs et des projecteurs, doivent être raccordés à l'aide de fixations et de dispositifs frangibles pour que leur masse n'endommage pas de manière inacceptable la structure du giravion et qu'ils ne pénètrent pas dans les espaces occupés ni dans les réservoirs de carburant.

Charges extérieures

15.3.7 Les charges extérieures sont normalement transportées sur un crochet de charge situé près du centre de gravité (longitudinal, latéral et vertical). Vérifier s'il y a des indices d'un contact d'une charge ou de l'élingue avec l'hélicoptère. Vérifier si l'hélicoptère était équipé d'un treuil au-dessus de la porte ou d'un treuil ventral. Déterminer si le ou les systèmes de largage de la charge extérieure fonctionnaient et s'ils ont été utilisés. Il est possible qu'une charge ait été arrimée au fuselage ou aux patins.

Train d'atterrissage

15.3.8 La plus grande partie de la charge est supportée par la traverse tubulaire arrière d'un hélicoptère équipé de patins et par le train arrière d'un hélicoptère équipé de roues. Si l'aéronef est muni de patins, noter le type de patins. Certains hélicoptères peuvent être équipés de patins plus hauts (ce qui signifie un centre de gravité plus haut) pour éviter que le rotor de queue ne heurte le sol, pour mieux installer l'équipement extérieur ou pour faciliter l'embarquement des passagers ou le chargement du fret. Certains types de patins sont munis d'amortisseurs pour éviter que les chocs ou les secousses de la prise de contact avec le sol ne soient transmis au rotor principal. Noter les déformations des patins. Les patins sont conçus pour s'évaser vers l'extérieur de manière à absorber l'énergie. Le sol mou ou les

obstacles peuvent empêcher les patins de s'écarter. Si l'aéronef est équipé d'un train à roues, ne pas oublier que des pneus surgonflés ou sousgonflés et les amortisseurs oléopneumatiques peuvent contribuer à la résonance au sol. La tendance à la translation de l'hélicoptère a un plus grand effet sur un hélicoptère muni de roues étant donné qu'un atterrisseur touchera le sol en premier ; le train à roues doit donc être verrouillé avant le décollage ou l'atterrissage. Noter la présence et l'état des éléments du train d'atterrissage tels que les roues de servitude, les skis, les patins de toundra ou les flotteurs d'urgence. Ces éléments ont pu contribuer à l'accident s'ils ont accroché le terrain ou s'ils se sont détachés en vol. Si l'hélicoptère a atterri sur un plan d'eau, noter l'efficacité des flotteurs.

Divers

15.3.9 Vérifier la présence de surfaces repeintes, de surfaces modifiées, de goujons desserrés, de masses d'équilibrage détachées ou de biellettes va-et-vient usées qui auraient pu causer des vibrations aéroélastiques ou d'autres vibrations excessives. Examiner les états de maintenance pour déterminer s'il y a eu des réparations ou des modifications.

Coupe-câbles

15.3.10 Si l'hélicoptère a été heurté par un câble, déterminer s'il était équipé d'un dispositif coupe-câble et s'il a été efficace.

Rotor principal

15.3.11 Les systèmes de rotor principal sont classés selon le mouvement des pales du rotor par rapport au moyeu du rotor. Les trois types principaux sont les rotors entièrement articulés, les rotors semi-articulés ou les rotors rigides. Certains rotors sont une combinaison de ces trois types. Le rotor principal est raccordé au mât. Les têtes de rotor sont conçues pour prendre en charge des réductions de poids particulières ou certaines complexités et pour satisfaire à certaines exigences de mission (pales repliables, par exemple). Les têtes de rotor peuvent aussi être classées selon le système de lubrification utilisé. Les premières têtes de rotor devaient être graissées pour lubrifier les paliers, ce qui exigeait des entretiens fréquents pour assurer une bonne lubrification. Ce système a été amélioré en munissant la tête d'un système d'huile permettant d'enfermer les paliers dans l'huile et de réduire ainsi la fréquence des entretiens. Les têtes sont maintenant classées en types humide et sec, selon le système de lubrification utilisé. Les têtes de rotor sont généralement faites d'un alliage d'acier et d'aluminium. De nombreuses pièces ont une durée de vie limitée en raison des contraintes qui sont imposées aux composants de la tête. Certains moyeux comportent un moyeu flexible, qui permet la flexion des pales sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des paliers ou des articulations. Ces systèmes, appelés joints flexibles, sont généralement faits de composites. Des paliers élastomères peuvent aussi être utilisés au lieu des paliers classiques. Les paliers élastomères sont faits d'un type de caoutchouc et ont un mouvement limité qui convient aux applications des hélicoptères. Les joints flexibles et les paliers élastomères n'ont pas besoin de lubrifiants et, par conséquent, requièrent moins d'entretien. Ils absorbent aussi les vibrations, ce qui signifie moins de fatigue et une durée de vie utile plus longue pour les éléments de l'hélicoptère. Une des caractéristiques des composants élastomères des rotors est leur sensibilité aux changements de température. Des systèmes tels que le StarFlex d'Eurocopter, la série S-70 de Sikorsky ou le rotor souple de Bell, utilisent des matériaux composites et des paliers élastomères pour réduire la complexité et la maintenance et accroître ainsi la fiabilité.

Identification des pales

15.3.12 Les fabricants identifient souvent les pales et leurs fixations par leur couleur. Par exemple, la pale bleue et ses éléments correspondants (biellettes de pas de pale, amortisseurs, fixations, etc.) sont identifiés par une bande bleue. Cette convention facilite la reconstitution après un accident.

Dommmages aux pales

15.3.13 Noter le sens de rotation des pales du rotor principal. La structure des pales de rotor doit être suffisamment résistante pour supporter non seulement les charges aérodynamiques exercées sur la surface des pales, mais aussi les charges inertielles des effets centrifuges, de Coriolis, gyroscopiques et vibratoires produits par le mouvement de pales. Reconstituer les pales et noter les dommages. Noter les points de rupture et les signes de transfert de peinture ou de métal indiquant que la pale a heurté quelque chose. Si les pales sont encore raccordées au moyeu et si la plupart des dommages sont dans le sens vertical, il est probable que le régime du rotor principal était faible à l'impact. Si les pales sont fragmentées et les ruptures indiquent une défaillance dans le sens de la rotation, la défaillance des pales s'est peut-être produite à un régime de rotor élevé. Vérifier s'il y a des marques sur le terrain qui indiquent que les pales tournaient à un régime rotor élevé. Il arrive parfois que le moyeu du rotor continue à tourner permettant aux pales de frapper le sol une à une et elles peuvent être retrouvées pratiquement empilées. Les pales de rotor principal qui frappent l'eau peuvent se replier vers le haut jusqu'à l'angle auquel les pales ont heurté l'eau. Examiner le raccordement des pales avec le moyeu et le raccordement avec la bielle de traînée. Si les pales étaient entraînées par la transmission, il peut y avoir des dommages importants dans le plan de traînée causés par la transmission qui force les pales à tourner même après qu'elles ont heurté le sol. Lorsqu'une pale heurte le sol, la pale opposée peut présenter des dommages au raccordement de sa bielle de traînée. En cas d'autorotation, la force d'entraînement des pales vient des pales elles-mêmes, non du moyeu, et les dommages causés au joint entre la pale et le moyeu seront différents. En général, lorsqu'il y a autorotation, les pales se retrouvent près de l'épave principale. Une pale retrouvée loin de l'épave peut indiquer une rupture en vol. Une rupture de pale d'aspect ébréchée est typique de dommages causés par impact. Une fracture lisse et une pale trouvée à une certaine distance de l'épave peuvent indiquer que la rupture s'est produite avant l'impact. La perte d'une partie de pale en vol peut causer des vibrations capables de désintégrer l'aéronef en vol. La perte d'une pale du rotor principal se traduit par un sillage tout à fait imprévisible des autres pales. Il est probable que le déséquilibre dynamique du système rotor entraînera un battement divergent des autres pales. Dans un accident qui s'est produit, la perte d'une pale d'un rotor multipale a entraîné l'arrêt complet des autres pales et l'hélicoptère s'est retourné en vol inversé en raison du moment de masse de la transmission. La perte d'une pale dans un système bipale peut entraîner la perte de la transmission. Dans certains modèles d'hélicoptères, l'intérieur des longerons de pales est pressurisé avec un gaz inerte pour indiquer la présence de fissures. Noter si cette caractéristique est présente et si elle a été inspectée avant le vol.

Éléments de pale

15.3.14 Déterminer si les pales du modèle d'hélicoptère en cause ont des volets de réglage d'incidence. Dans ce cas, noter s'ils sont tous présents et s'ils présentent des défaillances. Vérifier les masses d'équilibrage des pales. Il peut aussi y avoir une plaque de métal à l'extrémité de la pale qui peut porter un anneau d'arrimage ou un dispositif d'alignement des pales. Examiner les dommages pour voir si ces éléments se sont détachés avant l'accident. Il peut y avoir une bande d'abrasion sur le bord d'attaque de la pale. Une rupture ou la perte de cette bande peut causer de fortes vibrations.

Tête de rotor

15.3.15 Les commandes de vol du rotor principal sont normalement reliées à l'arbre d'entraînement du rotor principal par des ensembles de cannelures. Noter les dommages causés aux plateaux cycliques, aux biellettes de changement de pas, aux articulations de pales, aux amortisseurs et aux paliers ou à leurs équivalents composites. Rechercher des signes de dommages par fatigue préexistants. Examiner la barre stabilisatrice, si elle est installée. Noter les dommages aux butées qui pourraient indiquer un mouvement de pale extrême dans une direction en particulier. Certains hélicoptères ont des palettes de commande fixées à la tête de rotor et elles doivent être examinées.

Plateau cyclique

15.3.16 Le plateau cyclique a pour but de transmettre les commandes provenant du collectif et du cyclique aux pales du rotor principal. Il se divise en deux parties principales : le plateau fixe et le plateau tournant. Le plateau tournant est relié aux guignols de pas par des biellettes de pas.

Rotor de queue

15.3.17 Le système de transmission du rotor de queue comprend un arbre d'entraînement commandé par la transmission principale et une transmission arrière fixée à l'extrémité de la poutre de queue. L'arbre d'entraînement se compose d'un arbre long ou d'une série d'arbres plus courts reliés aux deux extrémités par des accouplements flexibles pour permettre à l'arbre de fléchir avec la poutre ; les petits hélicoptères peuvent être munis d'une courroie de transmission. La transmission arrière permet un entraînement à angle droit du rotor de queue et peut aussi comprendre un engrenage pour ajuster la sortie au régime optimal du rotor de queue. La structure de fixation doit être conçue pour supporter les charges inertielles produites par les accélérations angulaires et linéaires du rotor de queue et des boîtes de transmission durant le vol ou l'atterrissage. Vérifier la structure de montage de la cellule et les fixations. Un modèle d'hélicoptère de Hughes Helicopter/McDonnell Douglas utilise un jet d'air orientable à la poutre de queue pour remplacer le rotor de queue. Ce système présente des avantages dans les opérations au sol et les atterrissages en zones exiguës. Le système sans rotor de queue, ou NOTAR, présente certaines limites de performances opérationnelles.

Sens de rotation

15.3.18 Déterminer le sens de rotation des pales du rotor de queue. Le sens de rotation du rotor de queue varie d'un modèle à l'autre. En général, la pale avançante du rotor de queue tourne dans le sens opposé à l'écoulement de l'air de la pale du rotor principal pour maximiser l'écoulement d'air résultant sur cette pale du rotor de queue. Cependant, pour réduire le bruit et les vibrations, les pales de rotor de queue de certains hélicoptères tournent de manière que la pale avançante du rotor de queue se déplace dans le même sens que l'écoulement d'air de la pale du rotor principal. Un problème du rotor de queue qui avance avec l'écoulement d'air de la pale du rotor principal est une incapacité à maintenir le vol latéral aux vitesses modérées du côté de la pale reculante du rotor principal. Le sens de rotation d'un fenestron (Figure III-15-1) est important aussi et présente les mêmes caractéristiques d'efficacité aérodynamique que celles des rotors de queue classiques. Les fenestrons sont utilisés par Eurocopter, Sikorsky et d'autres constructeurs et présentent certains avantages de sécurité durant le chargement avec les rotors en mouvement.



Figure III-15-1. Fenestron

Dommmages aux pales

15.3.19 Noter les dommages causés aux pales du rotor de queue. Les ruptures de surfaces planes peuvent indiquer une rupture de fatigue. Noter s'il manque des bandes d'abrasion. Vérifier s'il y a des indices d'objets provenant de la cabine, des charges extérieures ou des objets au sol dans les aires de décollage ou d'atterrissage qui auraient pu entrer en contact avec le rotor de queue. Les impacts des rotors de queue sur l'eau ne laissent pas nécessairement de marques spéciales. Des indices qui montrent que le rotor de queue ne tournait pas peuvent indiquer que l'accident a été causé par la rupture de l'arbre d'entraînement du rotor de queue.

Mécanisme de commande

15.3.20 Examiner le mécanisme de changement de pas, les paliers et les commandes du rotor de queue. La défaillance d'une commande mécanique, y compris par des objets du poste de pilotage qui se logent derrière le palonnier, limite ou empêche la commande de la poussée du rotor de queue ; elle est généralement causée par la rupture ou le blocage d'une biellette de commande ou d'un câble. Les téléphones portables, les assistants numériques personnels, les tablettes, les GPS et autres dispositifs de ce genre ont le potentiel de bloquer les commandes anti-couple. La quantité de poussée anti-couple produite dépend de la position où se produit le blocage ou la défaillance des commandes.

Boîte de transmission de rotor de queue

15.3.21 Noter si la boîte de transmission du rotor de queue est encore fixée à la poutre de queue. Les vibrations provoquées par un déséquilibre des pales du rotor de queue peuvent détacher la boîte de transmission de ses supports.

Détachement de la boîte de transmission du rotor de queue

15.3.22 La boîte de transmission classique des rotors de queue est boulonnée à la poutre de queue à l'aide de fixations. La défaillance structurelle des fixations ou la perte d'un seul boulon de fixation peut causer le détachement de la boîte de transmission. Le long bras de levier de la poutre de queue combiné à la perte de la masse de la boîte de transmission du rotor de queue et de l'ensemble de rotor de queue provoquera un moment de piqué à cause du déplacement immédiat du centre de gravité. Si le pilote réagit par une commande rapide du cyclique vers l'arrière pour tenter de maîtriser l'assiette de l'hélicoptère, il est probable que les pales du rotor heurteront la poutre de queue.

Défaillance du palonnier

15.3.23 Il peut se produire une défaillance du système de rotor de queue si un dysfonctionnement mécanique rend le pilote incapable de modifier ou de contrôler la poussée du rotor de queue même si le rotor de queue fournit encore une poussée anticouple. L'enquêteur doit comprendre les procédures d'urgence de l'hélicoptère accidenté, les mesures que l'équipage a pu prendre et leurs résultats. Vérifier la commande pour déterminer s'il y a des restrictions.

Moteur

15.3.24 Les turbines à gaz sont utilisées dans la plupart des hélicoptères moyens à lourds en raison du couple élevé nécessaire pour satisfaire aux exigences opérationnelles. Un petit hélicoptère type est muni d'un moteur alternatif atmosphérique, principalement en raison des coûts initial et récurrents plus bas des moteurs alternatifs. Les moteurs alternatifs produisent des oscillations de couple plus fortes que les turbomoteurs.

Corrélateur

15.3.25 Parfois appelé synchronisateur ou anticipateur, le corrélateur est un raccordement entre le levier de collectif et la manette des gaz pour coordonner la poussée avec le déplacement du collectif. Le changement d'angle de pas des pales change l'angle d'attaque de chacune des pales, ce qui change la traînée. La traînée a une incidence sur la vitesse ou le régime du rotor principal. Pour maintenir un régime constant du rotor principal, il faut modifier proportionnellement la puissance afin de compenser le changement de traînée. Cette modification est apportée par le corrélateur et/ou le régulateur, qui ajustent automatiquement la puissance du moteur pour répondre à la variation de la demande.

Régulateur

15.3.26 Le régulateur détecte le régime du rotor et du moteur et apporte les ajustements nécessaires pour maintenir un régime de rotor constant. Dans les opérations normales, une fois que le régime du rotor est établi, le régulateur maintient le régime constant et il n'est plus nécessaire d'ajuster les gaz. Les régulateurs sont couramment utilisés dans les hélicoptères à turbine et employés dans certains hélicoptères à moteurs à pistons. En cas de défaillance du régulateur, tout changement de pas collectif exige un ajustement manuel des gaz pour maintenir le bon régime. Si la défaillance du régulateur se produit en régime élevé, le régime du moteur et celui du rotor essaient d'augmenter au-dessus des valeurs normales. Si la défaillance se produit en régime bas, il peut être impossible de rétablir le régime normal même si les gaz sont commandés manuellement.

Régulateurs hydromécaniques

15.3.27 Les régulateurs hydromécaniques sont utilisés dans la plupart des hélicoptères monomoteurs civils et militaires. Ils détectent mécaniquement la vitesse turbine libre et la combinent avec l'air de prélèvement du compresseur pour maintenir la vitesse turbine libre à une valeur constante. Le régulateur peut comporter des butées pour éviter la survitesse ou la désintégration de la turbine de puissance. Le régulateur hydromécanique est un système complexe de canalisations, de fixations et de leviers mécaniques qui présente plusieurs points de défaillance potentiels. Les modes de défaillance comprennent notamment la défaillance du sous-système de détection de la pression compresseur, qui entraîne une réduction de la vitesse de la turbine jusqu'au ralenti en vol.

Commande électronique numérique de moteur pleine autorité (FADEC)

15.3.28 Il n'existe aucune définition normalisée de la FADEC, mais « pleine autorité » signifie généralement que la régulation du carburant tient normalement compte de nombreuses variables par rapport aux régulateurs hydromécaniques précédents, qui ne détectaient que peu de paramètres pour déterminer le débit carburant au moteur. Les systèmes FADEC ont été incorporés dans les turbomoteurs et les moteurs à pistons. Les progrès réalisés dans la régulation du carburant ont permis d'aller vers une réduction de l'inertie du rotor principal et une augmentation de l'inertie du turbomoteur. Avec l'adoption de structures composites et de commandes électroniques, il faut aussi tenir compte des effets de la foudre. L'électronique peut cesser de fonctionner correctement sans que les composants ou les dispositifs aient subi de dommages apparents. En outre, des équipements certifiés tels que des antennes, radars, systèmes vidéo et audio, situés à moins de 0,5 m de la FADEC peuvent aussi avoir une incidence sur la FADEC.

Turbine de puissance

15.3.29 Déterminer si la turbine de puissance du moteur a une turbine libre pour fournir le couple à la transmission ou si elle est raccordée directement au compresseur et à la transmission par un arbre commun. En cas d'arrêt brusque de la transmission, le système à turbine libre a moins d'inertie pour déformer l'arbre d'entraînement de la transmission de sorte que les dommages causés à ce type d'arbre peuvent être moins prononcés.

Supports moteur

15.3.30 Examiner tout dommage causé à ces supports, parfois appelés blocs Lord, pour déterminer la présence d'indices de défaillance ou d'arrêt soudain avant impact.

Ventilateur de refroidissement

15.3.31 La plupart des hélicoptères à moteurs alternatifs sont équipés d'un ventilateur de refroidissement vu qu'ils volent à des vitesses trop faibles pour obtenir un air dynamique de refroidissement adéquat. Certains ventilateurs de refroidissement sont entraînés par le moteur et d'autres par la transmission. Un ventilateur de refroidissement qui présente des signes de rotation à l'impact peut indiquer que le moteur ou la transmission tournaient au moment de l'impact.

Détecteurs de particules

15.3.32 Les hélicoptères sont parfois munis de nombreux bouchons détecteurs de particules dans les moteurs ou les boîtes d'engrenages pour détecter les particules ferromagnétiques. S'assurer de trouver et d'examiner tous les détecteurs de particules.

Prises d'air

15.3.33 Examiner les prises d'air du moteur. Un blocage des prises d'air peut conduire à la défaillance du moteur. De nombreux hélicoptères sont munis de séparateurs de particules pour protéger le moteur de l'entrée de sable ou d'autres débris. Il y a eu des cas où la neige fondue a regelée à l'entrée d'air et provoqué la défaillance du moteur. De nombreuses opérations en vol stationnaire au-dessus de l'eau salée peuvent aussi causer une grande accumulation de sel sur le système rotor et la section de compression du moteur, réduisant les performances du moteur et du rotor.

Transmission

15.3.34 Le but principal de la transmission du rotor principal est de réduire le régime de sortie du moteur pour obtenir un régime rotor optimal. Il faut soupçonner une défaillance de la transmission lorsque les extrémités des pales du rotor principal n'ont subi que très peu ou pas de dommages par rotation et qu'il y a de grandes forces d'impact. Le système de transmission transfère la puissance du moteur au rotor principal, au rotor de queue et à d'autres accessoires (système hydraulique, système électrique et frein rotor). Les principaux composants du système de transmission sont l'entraînement provenant du ou des moteurs, l'entraînement du rotor principal, l'entraînement du rotor de queue, l'embrayage et la roue libre. Les systèmes de transmission des hélicoptères sont normalement lubrifiés et refroidis à l'aide de leur propre circuit d'huile. Certains carters de transmissions et les boîtes d'engrenages correspondantes sont munis de détecteurs de particules. Dans les hélicoptères avec moteurs à montage horizontal, une autre fonction de la transmission du rotor principal est de changer l'axe de rotation pour passer de l'axe horizontal du moteur à l'axe vertical de l'arbre rotor. La défaillance de la transmission principale est un point de défaillance unique et a des résultats catastrophiques. Comme pour les autres éléments tournants, la quantité et le type de lubrifiant sont cruciaux et doivent être vérifiés. Il peut être nécessaire de faire démonter et analyser la transmission. Les défaillances des transmissions survenues par le passé étaient des défaillances internes causées par un manque de lubrifiant et de mauvaises procédures de révision. Les progrès réalisés dans le domaine du contrôle des vibrations ont conduit à isoler le rotor de sorte que le fuselage est isolé du rotor et de la transmission, réduisant ainsi les vibrations et améliorant la fiabilité du système. Ces développements ont créé d'autres problèmes, notamment une incidence sur les vitesses critiques de l'arbre de transmission.

Dents des engrenages de la transmission

15.3.35 Les transmissions sont en général très robustes. Même après un impact violent, une transmission peut s'ouvrir et exposer les engrenages, mais les dents des engrenages seront peu endommagées. Tout dommage causé aux dents doit être examiné attentivement puisqu'il peut souvent être l'indice qu'elles ont subi une défaillance avant l'accident. Examiner les engrenages et les arbres de tous les éléments qui comportent des engrenages et des arbres d'entraînement, soit les génératrices et les pompes hydrauliques. Même si ces éléments comportent des fonctions de cisaillement, il y a eu des exemples de défaillances de paliers dans les génératrices et les pompes hydrauliques qui n'ont pas provoqué la rupture de l'arbre en cisaillement, causant la défaillance de la transmission principale.

Défaillances des supports de transmission

15.3.36 La transmission principale de certains hélicoptères est fixée à l'aide d'un support à trois points. Chaque support avant est raccordé à un axe qui est boulonné à une liaison de support du pylône et fixé à l'aide de chapes au toit de la cabine. La partie arrière est supportée et raccordée par un support d'isolation élastomère qui amortit aussi les vibrations pylône-fuselage et limite le balancement du pylône. Le mouvement de la transmission et du support d'isolation est limité par une tige de traînée qui se prolonge vers le bas jusqu'à un plateau sur la plateforme de transmission. Un balancement déphasé entre la transmission et le fuselage peut causer un contact entre la tige de traînée et sa butée statique, un phénomène appelé « cognement de tige témoin ». Le résultat peut être la rupture des liaisons de support du pylône au voisinage du palier du support du pylône, au sommet de la liaison du support. Dans les cas où cette rupture s'est produite en vol, les résultats ont été catastrophiques. Sur un hélicoptère comportant un support de montage plus rigide (c'est-à-dire 4 ou 5 supports ou plus), la première indication pour le pilote devrait être une vibration latérale. Si la vibration continue jusqu'à la rupture, les supports qui n'ont pas subi de rupture initiale peuvent présenter des indices d'arrachement tandis que le support cassé ne présente que peu ou pas d'indices d'arrachement.

Détecteur et limiteur de couple

15.3.37 Certains hélicoptères ont un système qui protège la transmission du surcouplage. Déterminer si ce système fonctionnait correctement, s'il a été utilisé et s'il a fonctionné. Cette caractéristique peut parfois mener à une chute du régime du rotor principal si trop de couple est exigé.

Régulateur de régime rotor

15.3.38 Déterminer s'il y avait un régulateur de régime rotor et s'il fonctionnait. Dans certains types d'hélicoptères, le régulateur peut être désactivé délibérément pour produire une puissance supérieure à la puissance maximale admissible. L'analyse des instruments et des voyants du tableau de bord liés au régime rotor peuvent indiquer si un faible régime a contribué à l'accident.

Frein de rotor

15.3.39 Certains hélicoptères sont équipés d'un mécanisme de freinage raccordé à la transmission du rotor principal pour aider à ralentir le rotor à l'arrêt des moteurs. L'activation non intentionnelle des freins de rotor s'est déjà produite ; elle a réduit le régime du rotor principal au point de ne plus pouvoir maintenir le vol. Vérifier la présence de surchauffe, quoique, par leur nature même, les freins de rotor présentent une certaine décoloration causée par la chaleur.

Roue libre

15.3.40 Les hélicoptères sont équipés d'un mécanisme d'embrayage à roue libre entre le moteur et la première partie du système d'entraînement du rotor pour permettre au rotor principal de tourner en autorotation sans avoir à entraîner le moteur en panne. La roue libre débraye automatiquement le moteur du rotor principal lorsque le régime moteur est inférieur à celui du rotor principal. Ces dispositifs ont parfois été installés incorrectement ou ont subi des

défaillances après une maintenance déficiente. La roue libre peut glisser et forcer le moteur à accélérer, vu que la charge de transmission ne requiert plus la puissance du moteur, et le régime rotor à chuter. Le pilote doit souvent interpréter les instruments et prendre des mesures correctives, ce qui, dans certains modèles, peut amener un système automatique à couper le moteur en surrégime. En conduisant à une combinaison de faible régime rotor et d'arrêt de moteur, une défaillance du mécanisme d'embrayage à roue libre peut mener à un accident. Il s'est produit des cas où le mécanisme à roue libre n'a pas débrayé le moteur de la transmission, augmentant la charge de couple en autorotation. Cette situation ne produit pas une force aérodynamique suffisante en autorotation pour maintenir le régime du rotor principal nécessaire au vol. La réduction du régime du rotor principal peut être causée par la charge supplémentaire d'entraînement du régime moteur plus faible, ce qui peut amener les crabots du mécanisme à roue libre à s'avancer. Dans ce cas, il devrait y avoir des marques témoins dans la cage extérieure du mécanisme à roue libre causées par les crabots indiquant qu'ils se sont avancés lors de l'arrêt brusque. Il peut aussi se produire une défaillance de l'accouplement de l'arbre d'entraînement avec le mécanisme à roue libre dû au balancement de la transmission en réaction aux contraintes aérodynamiques et mécaniques. S'assurer que la défaillance ne s'est pas produite en vol.

Embrayage

15.3.41 En raison du plus grand poids du rotor par rapport à la puissance du moteur, par comparaison avec le poids d'une hélice et la puissance d'un moteur d'avion, le rotor d'un hélicoptère à moteur alternatif ou d'un hélicoptère à turbomoteur simple corps doit être déconnecté du moteur au démarrage. Un embrayage permet au moteur de démarrer et de prendre graduellement la charge du rotor. Les deux principaux types d'embrayage sont l'embrayage centrifuge et l'embrayage à entraînement par courroie.

Train d'entraînement

15.3.42 Les arbres d'entraînement sont essentiels au vol et doivent être retrouvés et minutieusement examinés. Déterminer le sens normal de rotation de chaque arbre. Les arbres d'entraînement peuvent présenter un flambage de torsion et une rupture finale en traction. Les raccordements d'arbre d'entraînement sont généralement utilisés pour joindre des sections de l'arbre d'entraînement et la continuité de la chaîne dynamique le long de ces raccordements doit être établie. Les ruptures d'arbres en vol devraient être évidentes. Examiner les attaches et les trous de boulons des raccordements flexibles (accouplements Thomas). La déformation d'un accouplement Thomas est normalement associée à des dommages d'impact. L'absence d'un boulon et un manque de déformation indiquent que le boulon manquait au moment de l'impact. L'extrémité d'entraînement de l'arbre battra l'air et endommagera le capot et la structure avoisinants. Aux points de lubrification des raccordements, vérifier la présence de chaleur et d'éclaboussures de vieille graisse sur la structure environnante. La chaleur n'a pas le temps de s'accumuler durant l'écrasement et les éclaboussures de graisse peuvent indiquer des problèmes de paliers. La vieille graisse peut indiquer une rupture de joint d'étanchéité. Les arbres d'entraînement ont des accouplements à cannelures et/ou des accouplements flexibles pour maintenir la continuité de la chaîne dynamique et le mouvement de la poutre de queue en vol.

Arbres cassés ou déformés

15.3.43 Déterminer le sens de rotation de tous les arbres d'entraînement à l'extérieur du moteur et des boîtes de transmission. Noter le sens de la rupture ou de la déformation de chaque arbre pour déterminer le sens du couple sur ces arbres au moment de la rupture ou de la déformation. La torsion de tubes souples ou d'un morceau de paille en plastique de couleur aident à visualiser la direction du couple appliqué nécessaire pour causer le sens particulier de la déformation de l'arbre. Utiliser ces renseignements pour déduire logiquement si le moteur entraînait la transmission et si la transmission entraînait le rotor au moment de l'impact, ce qui peut permettre d'établir si le rotor était entraîné par le moteur ou s'il tournait en autorotation. Par exemple, dans le Bell 206, l'arbre court entre le moteur et la transmission principale ne montrera de signes de torsion que si le moteur entraînait le rotor principal ; il n'en aura pas si l'hélicoptère était en autorotation. De même, le mât du rotor principal ne se déformera que s'il était entraîné par la transmission. Dans le cas d'un hélicoptère multimoteur, vérifier de quelle manière la puissance des moteurs est combinée et comment la défaillance d'un seul moteur redistribue les couples des arbres.

Arbre d'entraînement moteur-transmission

15.3.44 Les arbres d'entraînement principaux transmettent la puissance des moteurs aux transmissions. Les arbres peuvent aller directement du moteur à la transmission, comme dans les hélicoptères monomoteurs ou certains multimoteurs, ou ils peuvent passer par un engrenage intermédiaire tel qu'une boîte d'engrenages de transfert ou de réduction de vitesse, avant de se raccorder à la transmission principale. Le premier indice d'une rupture ou d'un dysfonctionnement d'un arbre d'entraînement principal peut être un avertissement de faible régime. L'avertissement peut être interprété comme un arrêt du moteur. Un fort bruit ou un claquement lorsque l'arbre de sortie du moteur de désaccouple peut être un autre indice. Le régime du moteur est en général déterminé à un point avant l'arbre de sortie du moteur. Les éléments à examiner lorsque la rupture d'un arbre d'entraînement principal est soupçonnée d'être un facteur dans l'accident sont les lubrifiants, les paliers et les engrenages. Examiner aussi l'embrayage s'il fait partie de la chaîne dynamique et d'une boîte de transmission de transfert. Les accouplements à cannelures et les accouplements souples ont pour but de permettre le mouvement du pylône et de l'arbre tout en maintenant la puissance dans l'arbre d'entraînement principal.

Arbre d'entraînement du rotor principal

15.3.45 L'arbre d'entraînement du rotor principal fait partie de l'ensemble du mât et transmet le couple de la transmission au rotor principal. Cet arbre est soumis à de fortes charges de torsion et de traction et à des moments de flexion. Le mât supporte le poids de l'hélicoptère et entraîne le plateau cyclique à travers duquel fonctionnent les commandes de vol du rotor principal. Dans certains hélicoptères, le mât est un tube stationnaire creux dans l'axe duquel passe un arbre pour transmettre le couple au rotor principal. Vérifier la continuité du mât et si des dommages ont été causés aux éléments de commande qui y sont raccordés. Une courbure du mât peut indiquer quelle pale a heurté un objet solide en premier. Vérifier l'état des butées. Des ruptures de mâts se sont produites en vol par suite de cognements du mât contre le rotor basculant ou de mauvaises procédures de fabrication, d'installation, de maintenance ou de révision. Une rupture du roulement du mât principal peut amener le cisaillement du mât ou l'arrêt du rotor principal. Si le mât s'est détaché, vérifier si le faciès de rupture présente des dommages de fatigue. La plupart du temps, les ruptures de mâts sont dues à des surcharges. Dans le cas d'un hélicoptère à rotor basculant, une section de forme ovale, où les dommages correspondent à l'endroit où le rotor a heurté le mât, indique le cognement du mât. Si les pales ont subi ces mouvements extrêmes, il est aussi probable qu'elles auront aussi cisailé le fuselage.

Arbre d'entraînement du rotor de queue

15.3.46 Examiner l'arbre d'entraînement du rotor de queue pour déterminer le sens de la rupture. Une déformation en torsion de cet arbre peut indiquer que le rotor de queue tournait au moment de l'accident. Le sens de la déformation peut indiquer si la transmission principale s'est arrêtée brusquement ou si elle a continué à tourner. Vérifier s'il y a une rupture des accouplements et des paliers de suspension de l'arbre d'entraînement du rotor de queue ou une décoloration des fixations lubrifiables causée par la chaleur. Chercher des indications de rupture des joints d'étanchéité des paliers de suspension. Vérifier s'il y a enchevêtrement de l'arbre d'entraînement et des câbles de commande. Si l'arbre d'entraînement se détache en vol, il peut endommager l'intérieur de la poutre de queue.

Paliers et raccords

15.3.47 Vérifier si les paliers et les raccords du train d'entraînement présentent des signes de rupture, de boulons mal serrés, de surchauffe ou de manque de lubrification. Certains fabricants peignent les raccords critiques avec une peinture thermosensible ou y fixent un indicateur thermique pour indiquer une surchauffe. Noter l'intégrité des raccords souples et déterminer leur mode de défaillance.

Systèmes

Servocommandes hydrauliques

15.3.48 La plupart des hélicoptères, autres que les petits hélicoptères, utilisent des actionneurs hydrauliques pour réduire les importants efforts nécessaires pour actionner les commandes. Un système hydraulique type comprend des actionneurs (aussi appelés servos) sur chaque commande de vol, une pompe généralement entraînée par la boîte de transmission du rotor principal et un réservoir de fluide hydraulique. Si un hélicoptère ne possède qu'un système hydraulique, il doit pouvoir être contrôlé sans ce système. Dans les hélicoptères où les commandes exigent des efforts tels qu'elles ne peuvent pas être sollicitées sans assistance hydraulique, il peut y avoir au moins deux systèmes hydrauliques indépendants. Certains hélicoptères utilisent des accumulateurs hydrauliques pour stocker la pression, qui peut ensuite être utilisée pendant un court moment dans un atterrissage d'urgence en cas de défaillance de la pompe hydraulique. La défaillance des servocommandes hydrauliques peut rendre l'hélicoptère plus difficile à maîtriser et, dans certains hélicoptères, une défaillance hydraulique peut conduire à une perte de contrôle totale. Les contraintes exercées par les charges de vol et celles qui sont imposées par les impulsions de pression des pompes hydrauliques ont conduit à des ruptures de canalisations, des défaillances de pompes, des défaillances de régulateurs, des ruptures de joints et des ruptures de liaisons de sortie. Avant de déplacer quoi que ce soit, noter les positions de tous les servos hydrauliques. Vérifier le niveau et le type des fluides et la présence de contaminants. Vérifier les filtres et les commutateurs de dérivation. Une défaillance hydraulique imminente peut être indiquée par un grincement, un cliquetis ou un mugissement de la pompe ou des actionneurs, une augmentation des efforts de commande et de retour d'effort et un mouvement limité des commandes. En cas de défaillance hydraulique, il est probable que l'équipage aura désactivé le système hydraulique pour éviter un rétablissement inattendu de la puissance hydraulique durant une phase critique du vol. Il faut cependant tenir compte de la possibilité qu'une désactivation intentionnelle ou non intentionnelle du système hydraulique par l'équipage ait pu amorcer la chaîne des événements qui ont conduit à l'accident.

- a) *Emballement des servocommandes.* L'emballement d'une servocommande est lié à une action du système automatique de commandes de vol ou à une action du pilote qui place accidentellement le système dans un état d'emballement, ce qui peut placer une servocommande dans sa position limite ou la bloquer, et provoquer des caractéristiques de manœuvrabilité indésirables. On peut régler le problème en changeant de système de servocommande ou en sécurisant les servocommandes.
- b) *Défaillances des commandes aux servos hydrauliques ou au-dessous.* Ce type de défaillance se produit dans la partie inférieure des commandes de vol et peut être causé par un désaccouplement ou une rupture des liaisons de commande telles que : biellettes double effet ou tubes de torsion, guignols et tringles d'asservissement ou paliers de tête de bielle. Des défaillances de ce type se sont produites lorsque des écrous se sont dévissés des boulons, soit parce que des écrous autofreinés avaient été mal installés ou réutilisés, soit parce que des écrous crénelés avaient été installés sans goupilles. Le dysfonctionnement des servos peut se produire par suite d'une défaillance interne ou d'une contamination du fluide hydraulique. Si le dysfonctionnement des servos est tel qu'il n'est plus possible d'utiliser les commandes dans le poste de pilotage, les excursions incontrôlées du disque rotor sont probables.
- c) *Défaillances des commandes au-dessus des servos hydrauliques.* Les commandes de vol au-dessus des servos sont soumises à des charges aérodynamiques supérieures à celles des commandes au-dessous des servos, qui amortissent les charges des commandes inférieures. Une défaillance des commandes de vol au-dessus des servos hydrauliques se traduit par un disque rotor incontrôlable. Des défaillances se sont produites à cause de composants mal construits, installés ou entretenus et de la perte d'attaches. Les serrages excessifs ont causé des ruptures des boulons de chape de la biellette de pas au palier à rotule du plateau cyclique extérieur (tournant) ou au guignol de changement de pas de pale à la tête du rotor. Des défaillances se sont produites aux croisillons des plateaux cycliques tournant et fixe.

- d) *Transparence des servos.* La transparence des servos commence lorsque les forces aérodynamiques sont supérieures aux forces hydrauliques et qu'elles sont transmises aux commandes de cyclique et de collectif du pilote. La force maximale que les servos peuvent produire est constante et est fonction de la pression hydraulique et des caractéristiques des servos. Le système est conçu pour dépasser les spécifications des limites de vol indiquées dans le manuel de vol approuvé. Avec des manœuvres excessives et une combinaison de haute vitesse anémométrique, de pas collectif élevé, de poids brut élevé, de charges g élevées et d'altitude-densité élevée, les forces aérodynamiques peuvent augmenter au-delà des forces contraires des servos hydrauliques et la transparence des servos peut se produire. Un système hydraulique mal entretenu peut aussi avoir une incidence sur l'apparition de la transparence des servos. Dans les systèmes à rotor principal tournant dans les sens antihoraire, le servo gauche reçoit la charge la plus élevée lors des manœuvres et la transparence se traduit par un mouvement non commandé du cyclique gauche et arrière accompagné d'un mouvement du collectif vers le bas. L'effort de commande que doit exercer le pilote pour contrer ce phénomène aérodynamique est relativement élevé et pourrait donner à un pilote pris au dépourvu l'impression que les commandes sont bloquées. Si le pilote ne réduit pas la manœuvre, l'hélicoptère s'incline vers la droite et se cabre.

Systeme carburant

15.3.49 Le système carburant comprend le circuit d'alimentation et le circuit de régulation du carburant moteur. Les réservoirs de carburant sont généralement fixés à la cellule le plus près possible du centre de gravité. Il n'y a ainsi qu'une incidence négligeable sur le centre de gravité à mesure que le carburant est brûlé. Un robinet de vidange situé au fond du réservoir de carburant permet au pilote d'évacuer l'eau et les sédiments qui peuvent s'être accumulés dans le réservoir. Une mise à l'air libre carburant empêche la formation d'un vide dans le réservoir et une vidange trop pleine permet l'expansion du carburant sans faire éclater le réservoir. Un indicateur de quantité de carburant sur le tableau de bord du pilote montre la quantité de carburant mesurée par un détecteur placé dans le réservoir. Certaines jauges indiquent la capacité du réservoir en gallons et en livres, et d'autres indiquent le pourcentage du carburant qui reste. Un robinet d'arrêt permet d'arrêter complètement l'écoulement du carburant dans le moteur en cas d'urgence ou d'incendie. La plupart des systèmes d'alimentation en carburant qui ne fonctionnent pas par gravité sont munis à la fois d'une pompe électrique et d'une pompe mécanique entraînée par le moteur. La pompe électrique est utilisée pour maintenir une pression carburant positive pour la pompe moteur et sert aussi de secours en cas de défaillance de la pompe mécanique. Un filtre carburant enlève l'humidité et d'autres sédiments du carburant avant que celui-ci n'arrive au moteur. Les raccords frangibles sont des dispositifs de sécurité installés plus couramment sur les hélicoptères que sur les aéronefs à voilure fixe. Noter la présence et l'efficacité de ces raccords. Pour les vols prolongés, les hélicoptères peuvent aussi être munis de réservoirs de grande autonomie installés dans la cabine. Ces réservoirs doivent être examinés pour en vérifier la sécurité et le fonctionnement.

Pilote automatique et systèmes d'augmentation de la stabilité

15.3.50 Certains hélicoptères utilisent des systèmes d'augmentation de la stabilité (SAS) pour aider à stabiliser l'hélicoptère en amortissant les mouvements de tangage et de roulis causés par les rafales et, dans certains modèles, en réduisant au minimum les oscillations induites par le pilote. Les tout premiers systèmes SAS comprenaient des dispositifs mécaniques, comme une barre stabilisatrice, installés sur les têtes de rotor. Un autre dispositif SAS électromécanique, utilisé au début, est le système de compensation d'effort qui utilise un embrayage magnétique et des ressorts pour maintenir la commande du cyclique dans la position où elle a été laissée. Les gyroscopes sont employés pour produire des signaux électriques qui commandent les servos hydrauliques ou les actionneurs électriques pour incliner le plateau cyclique afin de résister au mouvement de l'hélicoptère. Le système est conçu pour distinguer entre les commandes sollicitées par le pilote et le mouvement induit par une rafale. Un système analogue peut aussi être installé dans le système de commande du rotor de queue pour améliorer la stabilité directionnelle est les caractéristiques de commande. En plus des SAS, les hélicoptères équipés pour le vol IFR sont généralement munis d'un pilote automatique. Les fonctions les plus courantes sont la tenue d'altitude et de cap. Certains systèmes plus évolués comprennent le mode de tenue de vitesse verticale ou de vitesse indiquée (IAS) ; dans ce cas, le pilote automatique maintient une vitesse ascensionnelle/descensionnelle ou IAS constante. Certains systèmes sont reliés à

l'équipement de radionavigation et d'atterrissage pour commander des affichages du directeur de vol. Certains peuvent exécuter des approches aux instruments jusqu'au vol stationnaire et décollage/remise des gaz. Les SAS sont particulièrement utiles pour le vol stationnaire, par exemple lors de sauvetages au-dessus de l'eau ou de l'inspection et la réparation des lignes de haute tension.

Systemes de conditionnement d'air

15.3.51 Le système de refroidissement le plus simple est le refroidissement par air dynamique. Des conduits d'air situés sur le devant et les côtés de l'hélicoptère sont ouverts ou fermés pour laisser entrer l'air dans la cabine. Les hélicoptères à moteurs à pistons utilisent un échangeur de chaleur situé autour du collecteur d'échappement pour fournir la chaleur à la cabine. Les hélicoptères à turbine utilisent l'air de prélèvement pour la chaleur. Les gros hélicoptères peuvent aussi utiliser un petit réchauffeur au gaz. Certains hélicoptères commerciaux ont aussi des conditionneurs d'air pour les climats chauds.

Systemes antigivrage

15.3.52 La plupart des équipements antigivrage installés sur les petits hélicoptères se limitent aux systèmes d'antigivrage d'entrée d'air du moteur et aux systèmes de réchauffage pitot. Les hélicoptères plus gros peuvent avoir des systèmes antigivrage de la cellule et du rotor, mais ces systèmes ne sont pas fréquents en raison de leur complexité, de leur coût et de leur poids. Si le bord d'attaque d'un rotor est réchauffé électriquement pour éviter la formation de givre, il y aura probablement une génératrice CC pour alimenter le système. Les génératrices CC fonctionnent à vitesse fixe et, en raison des performances d'autorotation requises, sont normalement entraînées par la transmission.

15.4 ENQUÊTE SUR L'ENVIRONNEMENT OPÉRATIONNEL

15.4.1 L'enquêteur doit tenir compte de l'environnement opérationnel de l'hélicoptère. Les hélicoptères conçus et construits pour un type d'exploitation particulier peuvent être employés pour d'autres types d'exploitation et subir des contraintes qui n'étaient pas prévues dans la certification d'origine. L'exploitation forestière par hélicoptère peut conduire à une fatigue prématurée des éléments structurels et dynamiques en raison des cycles fréquents de chargement/levage. Le vol près de l'eau salée peut entraîner une corrosion prématurée. L'utilisation constante d'une puissance élevée peut réduire la durée de vie prévue du moteur. Les vols en régions isolées peuvent encourager l'adoption de pratiques opérationnelles et de maintenance inacceptables.

15.4.2 La plupart des éléments dynamiques des giravions sont inspectés périodiquement et ont des durées de vie limitées en service. Certains autres éléments dynamiques et structuraux peuvent ne pas être soumis à des inspections obligatoires parce que leur durée de vie théorique prévue dans les spécifications de conception d'origine dépasse la durée de vie prévue de la cellule. Cependant, en raison de programmes de prolongement de la durée de vie en service et de reconstruction de la cellule, des éléments qui, au départ, n'étaient pas soumis à un cycle d'inspection ou à une limite de durée de vie en service peuvent présenter des ruptures de fatigue.

Aire de décollage et d'atterrissage

15.4.3 L'enquêteur doit examiner l'incidence des caractéristiques de l'aire de décollage et d'atterrissage. Les caractéristiques comprennent la présence d'obstacles sur la trajectoire de vol, la pente de l'aire, l'effet du vent, y compris le lien entre le vent et le terrain environnant, la direction du vol, les obstacles qui entravent la visibilité, les effets de la végétation le long de la trajectoire de vol, l'altitude-densité, l'éclairage de l'aire et les distractions visuelles. Dans les décollages par fort vent de travers ou vent arrière, l'augmentation de la poussée du rotor de queue pour maintenir la direction absorbe plus de puissance du moteur, ce qui laisse moins de puissance disponible pour le rotor principal et la

production de portance. L'enquêteur doit aussi examiner l'efficacité avec laquelle le pilote pouvait voir les caractéristiques et les obstacles de l'aire. En outre, si un accident se produit la nuit, examiner l'incidence de l'éclairage disponible et du marquage des obstacles.

15.4.4 En général, le poids brut, l'altitude et la température ambiante ont une incidence sur les performances de décollage, d'atterrissage et de vol stationnaire. Les données sur les performances de décollage et d'atterrissage fournies par l'hélicoptériste dans le manuel de vol du giravion s'appliquent à des surfaces lisses, sèches, dures et de niveau. La distance d'atterrissage calculée pour les données de performance est mesurée à partir d'un point où la partie la plus basse de l'hélicoptère est à 15,2 m (50 ft) (7,6 m/25 ft pour VTOL) au-dessus de la surface d'atterrissage jusqu'à la partie la plus avant de l'hélicoptère après l'arrêt.

15.4.5 Les hélicoptères passent normalement par une phase de vol stationnaire au décollage et à l'atterrissage. Les phases du décollage dont il faut tenir compte sont l'envol jusqu'au vol stationnaire, l'accélération depuis le vol stationnaire jusqu'à la portance de translation efficace (environ 30 kt) et l'établissement de la montée. Les phases d'atterrissage sont la descente, l'approche jusqu'au vol stationnaire en décélération jusqu'en dessous de la portance de translation efficace et l'atterrissage à partir du vol stationnaire.

15.4.6 Les aires aménagées telles que les aires d'atterrissage d'hélicoptères et les pistes doivent être convenablement marquées et éclairées. Les héliplateformes en terrasse ou au sommet des immeubles peuvent présenter des obstacles sur la trajectoire de vol et des obstacles qui peuvent entraver la capacité de l'hélicoptère de voler en stationnaire dans l'effet de sol. Les héliplateformes situées au sommet d'immeubles et sur les plateformes de forage pétrolier peuvent exiger que l'hélicoptère évolue dans les zones à éviter des diagrammes hauteur-vitesse durant les décollages et les atterrissages. En outre, ces opérations peuvent aussi limiter le poids brut de l'hélicoptère par rapport aux vols à partir du sol.

15.4.7 Les aires non aménagées peuvent aussi poser des problèmes pour les vols des hélicoptères. De mauvaises procédures de décollage et d'atterrissage peuvent restreindre la visibilité en raison de l'effet du sillage du rotor sur la neige, la poussière ou le sable. Des accidents se sont produits parce que le pilote avait mal interprété les indications de vent. Plutôt que d'effectuer des approches normales dans le vent vers des sommets ou des crêtes, le pilote doit effectuer des approches à pente plus forte dans des vents plus forts pour éviter l'air turbulent et les courants descendants. Lorsque l'hélicoptère utilise une aire non aménagée, envisager la possibilité que son train d'atterrissage ait pu accrocher ou heurter des roches, des monticules ou une végétation épaisse, amorçant ainsi l'accident. Les erreurs communes dans les opérations en régions isolées sont de mauvaises procédures de reconnaissance, la non prise en compte des données de performance et le non-respect des zones à éviter des diagrammes hauteur-vitesse.

Givrage du carburateur

15.4.8 Le givrage du carburateur est beaucoup plus critique dans les hélicoptères à moteurs alternatifs que dans les aéronefs à voilure fixe. Dans les aéronefs à voilure fixe, l'hélice joue le rôle de volant à inertie et aide en fait à faire tourner le moteur, même irrégulièrement. Un moteur qui a des ratés est une indication pour le pilote qu'il doit activer le réchauffe carburateur et, s'il agit assez rapidement, peut éviter une défaillance totale moteur. Dans les hélicoptères, l'effet de volant à inertie de l'hélice est absent et le pilote peut ne pas recevoir un avertissement similaire du moteur indiquant une défaillance imminente. Lorsque le pilote se rend compte de la perte de puissance due au givrage du carburateur, il peut être trop tard pour réagir efficacement. L'humidité atmosphérique, même en air pur et à des températures au-dessus du point de congélation, peut causer une accumulation de givre dans le système d'admission au point de causer une défaillance du moteur. Les signes de givrage du carburateur sont très difficiles à détecter parce l'air ambiant du moteur aura probablement pour effet de faire fondre tout givre qui se serait formé dans le carburateur. La seule option pour l'enquêteur peut être de reconstituer les conditions atmosphériques présentes à l'altitude à laquelle volait l'hélicoptère.

Givrage à l'impact

15.4.9 Le givrage à l'impact est formé par des gouttelettes d'eau surfondue se déposant sur les éléments du système d'admission du moteur. Des accumulations particulièrement fortes sont à prévoir dans les endroits du système d'admission où des coudes et des courbes forcent l'air à changer de direction.

Givrage au papillon

15.4.10 Ce givrage se forme au papillon ou près du papillon lorsqu'il est partiellement fermé et que la température de l'air diminue en raison du refroidissement produit par l'augmentation de la vitesse et de l'énergie cinétique de l'air dans une zone d'écoulement d'air restreinte.

Givrage par refroidissement

15.4.11 Ce phénomène est le plus grave de tous les types de givrage du carburateur dans les hélicoptères. La vaporisation du carburant après son introduction dans le flux d'air et la diminution de la pression d'air dans le venturi provoque une forte chute de température dans le carburateur. Si la température du carburateur tombe jusqu'au point de congélation ou au-dessous, le givre peut se former sur les surfaces intérieures du carburateur, y compris le papillon des gaz. Le givrage par refroidissement peut modifier l'écoulement d'air en bloquant le col du collecteur d'admission ; il peut modifier le rapport carburant-air et entraver le débit du carburant et il peut modifier la distribution du mélange ou la quantité du mélange entrant dans les cylindres en dérégulant la distribution du débit de carburant. Le givre par refroidissement peut s'accumuler durant une descente gaz coupés ou en autorotation à des températures d'air ambiant allant jusqu'à 34°C (93°F) et une humidité relative aussi faible que 30 %. À une faible puissance de croisière, le givrage par refroidissement peut se produire à des températures aussi élevées que 17°C (62°F) et à une humidité relative de 60 % ou plus.

Divers

15.4.12 Certains moteurs à pistons atmosphériques comportent un réchauffage automatique du carburateur lorsque le levier du collectif est au-dessous d'un certain réglage. D'autres constructeurs recommandent de laisser le réchauffage du carburateur pendant toute la durée du vol.

15.4.13 Le danger d'un givrage du carburateur est moindre dans les moteurs à injection qui injectent le carburant directement dans le collecteur d'admission.

Authorotation

15.4.14 L'autorotation est mécaniquement possible grâce à la roue libre qui permet au rotor de continuer à tourner même quand le moteur ne tourne pas. La roue libre est normalement considérée comme faisant partie de la transmission. En autorotation, les pales du rotor principal sont uniquement entraînées par le mouvement de l'air qui traverse le disque rotor. En autorotation, le flux d'air créé par la vitesse descendionnelle est principalement déterminé par la vitesse vers l'avant. L'autorotation est en général utilisée en cas de défaillance du moteur, mais elle peut aussi être utilisée dans d'autres situations d'urgence telles que la défaillance du rotor de queue ou une reprise à partir d'un enfoncement par défaut de pas collectif. En cas d'arrêt du moteur, le temps de réaction du pilote est un facteur important car il doit réagir rapidement pour éviter une perte rapide de la rotation du rotor principal. En cas de défaillance du moteur, l'abaissement rapide du collectif permet au pilote de maintenir le régime du rotor.

15.4.15 Étant donné que, sur les pales d'un rotor en autorotation, le vent relatif passe d'un grand angle d'attaque à l'intérieur à un angle d'attaque plus petit à l'extérieur, la composante avant de la portance produite est plus grande près du moyeu et la composante verticale est plus grande vers les extrémités des pales. Cette caractéristique crée, sur le disque rotor, des zones distinctes qui produisent les forces nécessaires au vol en autorotation. La zone autorotative, ou zone d'entraînement, produit une force aérodynamique totale vers l'avant supérieure à toutes les forces de traînée vers

l'arrière et maintient la rotation des pales. La zone entraînée produit une force aérodynamique totale avec une composante verticale plus élevée. Près du centre du disque rotor se situe la zone de décrochage où la composante rotationnelle du vent relatif est si faible que l'angle d'attaque est supérieur à la limite de décrochage de la surface portante. La zone de décrochage crée une traînée qui s'oppose à la direction de rotation et qui doit être dépassée par les forces vers l'avant créées par la zone d'entraînement.

15.4.16 Quel que soit l'effet de l'inertie du rotor, le taux auquel le régime du rotor principal diminue lors d'une défaillance de moteur dépend des conditions de vol exigeant un réglage élevé du collectif, soit : faible vitesse anémométrique, particulièrement aux puissances requises par le vol stationnaire ; grande vitesse ; haute altitude ou haute altitude-densité ; montée à grand angle et à pleine puissance ; forte inclinaison latérale et transport de charges extérieures. Si le levier du collectif n'est pas abaissé, le rotor commence à consommer sa propre énergie et ralentit pour compenser la perte de puissance. Si le levier du collectif n'est toujours pas abaissé, la perte rapide du régime du rotor principal réduit la force centrifuge et entraîne une conicité excessive du rotor au point où le rétablissement du régime du rotor principal devient impossible.

15.4.17 Lors d'un arrêt brusque du moteur, le régime d'un rotor principal à faible inertie chute rapidement et réduit par conséquent le délai de réaction du pilote par rapport à un rotor principal à forte inertie, qui donne plus de temps au pilote pour prendre les mesures nécessaires pour entrer en autorotation. L'avantage des rotors à faible inertie par rapport aux rotors à forte inertie est qu'ils permettent de rétablir facilement le régime du rotor.

15.4.18 La vitesse descensionnelle en autorotation dépend de plusieurs facteurs : altitude, poids brut, régime rotor et vitesse anémométrique. La puissance requise pour entraîner la transmission principale, la transmission du rotor de queue, le rotor de queue et les accessoires entraînés par la transmission augmente aussi la vitesse descensionnelle d'un hélicoptère en autorotation. La commande principale de la vitesse descensionnelle est la vitesse anémométrique. La commande de pas cyclique permet d'obtenir des vitesses plus ou moins élevées, comme dans le vol normal. La vitesse anémométrique des autorotations est établie pour chaque type d'hélicoptère sur la base de conditions météorologiques et de vent moyennes et d'une charge normale. Le régime du rotor principal augmente avec le poids brut et l'altitude-densité et est commandé par le pas collectif.

15.4.19 Les 100 à 175 derniers pieds sont critiques étant donné que la transition en douceur entre la descente en autorotation et l'atterrissage sans moteur doit se faire en douceur. Durant cette étape, le flux d'air qui traverse le rotor est inversé et l'impulsion emmagasinée des rotors est troquée contre une réduction de la vitesse vers l'avant et verticale. Les techniques de cyclique et de collectif à utiliser pour établir l'arrondi dépendent de l'hélicoptère, mais à des vitesses de 45 à 50 kt, il est possible que l'arrondi ne puisse pas ralentir la descente. La décélération doit être continue durant tout l'arrondi afin de réduire la vitesse descensionnelle et la vitesse avant, juste avant le toucher des roues, aux valeurs les plus faibles possibles pour les conditions existantes.

15.4.20 Selon les caractéristiques de la surface, l'hélicoptère peut subir une décélération soudaine après le toucher des roues. Abaisser immédiatement le collectif après le toucher des roues peut forcer le train d'atterrissage à s'enfoncer et à faire capoter l'hélicoptère.

15.4.21 Durant les pratiques d'autorotation avec reprise en vol stationnaire, il faut complètement ouvrir les gaz avant de remonter le levier du collectif, car la reprise du moteur peut causer des problèmes de manœuvrabilité dans de nombreux hélicoptères.

Inertie du rotor principal

15.4.22 L'addition de masse à une pale de rotor augmente la force centrifuge et présente des avantages tels qu'une diminution de l'angle de conicité. Cette technique est employée dans certaines pales à forte inertie où quelques onces de plomb sont placées à l'intérieur, ou près, des extrémités des pales, où le moment angulaire est le plus fort.

15.4.23 Les rotors à forte inertie avec un régime rotor à fort moment angulaire présentent moins de fluctuations de régime ; au régime opérationnel normal, en raison d'angles de conicité plus faibles, le maintien du régime rotor exige moins de puissance, et il est plus facile d'entrer en autorotation et d'exécuter l'arrondi à l'atterrissage à partir de l'autorotation. Les rotors à forte inertie perdent et gagnent de la vitesse rotor lentement par rapport aux rotors à faible inertie. Vu le moment angulaire plus grand et la force centrifuge qui accompagne les rotors à forte inertie, la tête du rotor et la transmission doivent être plus robustes que celles d'un rotor à faible inertie. Les pales doivent aussi être plus fortes étant donné que chaque section de la pale supporte une force centrifuge plus élevée le long de son envergure. Un rotor à forte inertie signifie donc un poids de base plus élevé. Les rotors à forte inertie peuvent être plus dangereux si le régime rotor chute, particulièrement à basse altitude, vu qu'il faut plus de temps pour accélérer et retrouver un régime de sécurité. Un hélicoptère sous-motorisé, avec peu ou pas de marge entre la puissance requise et la puissance disponible, et un rotor à forte inertie risque particulièrement d'avoir un accident étant donné qu'il y a peu ou pas de marge de puissance pour rétablir rapidement un régime de rotor principal assurant la sécurité.

15.4.24 Les rotors à faible inertie avec un régime rotor à faible moment angulaire gagnent et perdent rapidement et facilement de la vitesse rotor, avec de variances selon le couple fourni par le moteur, le travail imposé au rotor par le collectif et de facteurs externes tels que des rafales. Les coûts des rotors à faible inertie sont moindres vu que les pales et le moyeu ont un poids minimal. Comme les rotors à forte inertie, un rotor à faible inertie sous-motorisé peut ne pas avoir assez de puissance pour accélérer le rotor principal jusqu'à un régime de sécurité. Les rotors à faible énergie ont une commande plus rapide d'assiette de disque et sont plus faciles à manœuvrer que les rotors à forte inertie. Les progrès réalisés dans les commandes électroniques des moteurs et les matériaux composites ont amélioré la sécurité et la fiabilité des rotors à faible inertie.

15.4.25 À une altitude donnée, l'inertie du rotor est un facteur essentiel dans la détermination de la taille et de la forme du diagramme hauteur-vitesse. Généralement la plage de décollage d'un rotor à faible inertie continue jusqu'à une vitesse de montée (V_y) à puissance minimale d'environ 45 à 50 kt avant que ne commence la montée. Pour un rotor à forte inertie, la montée commence généralement après la portance en translation efficace (ETL), à environ 15 à 20 kt. La zone à éviter (ombrée) de la partie croisière du diagramme pour les rotors à faible inertie comprend une enveloppe beaucoup plus élevée que celle des rotors à forte inertie.

15.4.26 Les dimensions du fuselage ou du rotor n'indiquent pas toujours l'inertie du rotor. Dans les rotors à faible inertie, le régime du rotor principal chute rapidement à l'arrêt du dernier moteur. En outre, vu le niveau d'inertie relativement faible, il peut être nécessaire de solliciter fortement le collectif pour éviter une survitesse du rotor lorsque l'hélicoptère effectue l'arrondi de l'atterrissage en autorotation, particulièrement près du poids brut maximal aux hautes altitudes.

Basculement dynamique

15.4.27 Le basculement dynamique est un mouvement de roulis provoqué par une composante latérale de la poussée du rotor principal. Lorsque l'hélicoptère touche la surface avec un côté du train d'atterrissage, il peut commencer à basculer et peut s'incliner jusqu'à un point où il n'est plus possible de le maîtriser. Durant les décollages et atterrissages normaux ou en pente, une partie du train d'atterrissage, patin ou roue, agit comme un pivot pendant que, la composante latérale de la poussée du rotor principal produit un moment autour du point de contact avec la surface. Normalement, le moment de roulis est contré par la position du poids de l'aéronef entre les roues ou les patins. Ce moment d'opposition au mouvement de roulis diminue à mesure que l'hélicoptère augmente progressivement son inclinaison latérale tout en maintenant un contact avec la surface. L'hélicoptère atteindra un angle d'inclinaison latérale au-delà duquel il sera impossible d'arrêter le mouvement de roulis. Si l'hélicoptère maintient son contact avec le sol, il basculera sur le côté. L'angle au-delà duquel le basculement est susceptible de se produire s'appelle l'angle de roulis critique. La vitesse à laquelle se produit le mouvement de roulis initial a une incidence considérable sur l'angle de roulis critique (Figure III-15-2).

15.4.28 Les principales causes du basculement dynamique sont une sollicitation inappropriée des commandes et l'incapacité d'agir rapidement pour corriger la situation. Le mouvement inapproprié du cyclique latéral par le pilote ou la dérive latérale de l'aéronef produit un vecteur de poussée latéral lorsque la poussée du rotor principal est approximativement égale au poids de l'aéronef. Cette composante latérale de la poussée tend à déplacer l'hélicoptère latéralement ou à le faire basculer autour d'un point de pivotement. Le point de pivotement nécessaire pour un basculement dynamique est plus bas que le centre de gravité vertical de l'hélicoptère et est normalement la partie la plus basse de l'hélicoptère, c'est-à-dire le train d'atterrissage. Le mouvement de roulis peut se produire au décollage avec une compensation cyclique latérale excessive provoquée par un changement de poids et de charge de l'hélicoptère. Il peut aussi se produire lorsque le mouvement du train d'atterrissage est restreint, par exemple lorsqu'il est coincé dans la boue, la glace ou l'asphalte moule, lorsqu'une attache n'a pas été enlevée ou lorsque l'hélicoptère se déplace latéralement en vol stationnaire et heurte une surface ou un objet. La séquence de basculement dynamique peut se dérouler en aussi peu que deux secondes à partir du début du roulis jusqu'au moment où les pales du rotor heurtent la surface.

15.4.29 Le basculement dynamique peut se produire sur des terrains en pente non aménagés comme sur des surfaces planes. Les facteurs physiques qui contribuent au basculement dynamique sont la vitesse du mouvement de roulis, le centre de gravité latéral, des poids bruts élevés, la poussée du rotor de queue, les vents traversiers, les vents arrière, la surface du sol, les pentes et la conception du rotor. Les opérations sur un navire ou une plateforme flottante, particulièrement si l'aire d'atterrissage n'est pas stable durant l'atterrissage ou le décollage, peuvent contribuer au basculement dynamique. Une perte de référence visuelle due à une obstruction de la visibilité, l'obscurité, la poussière et la neige ont contribué à des accidents de basculement dynamique.

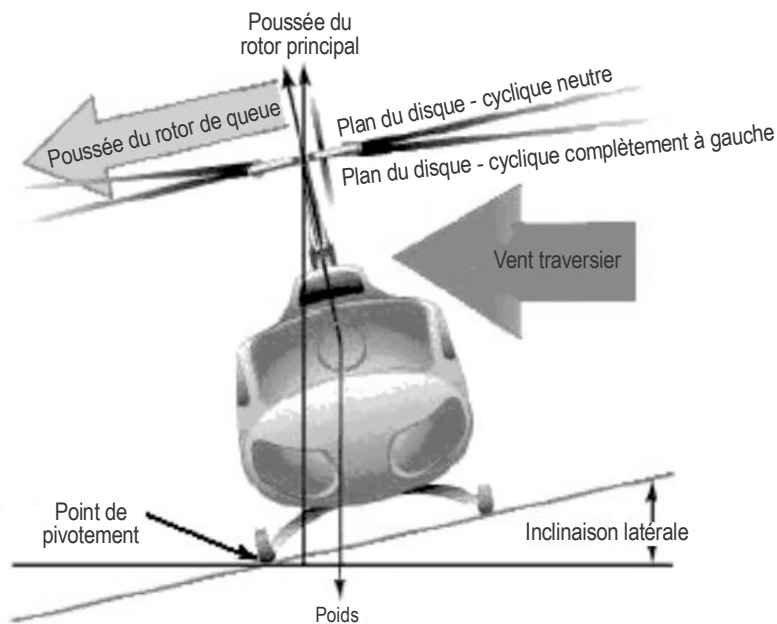


Figure III-15-2. Basculement dynamique

Centrage latéral

15.4.30 L'embarquement et le débarquement des passagers et des membres d'équipage, le chargement ou déchargement du fret et le déplacement des membres d'équipage dans la cabine ont pour effet de modifier le cyclique latéral requis. Si l'hélicoptère utilise des conduites de carburant interconnectées qui permettent au carburant de passer automatiquement d'un côté à l'autre de l'hélicoptère, l'écoulement gravitationnel du carburant vers le réservoir plus bas pourrait considérablement modifier le centre de gravité. Avec une charge asymétrique, l'hélicoptère est plus susceptible de basculer vers le côté le plus lourd.

Poussée du rotor de queue

15.4.31 La tendance à la translation et le moment de rotation produits par le rotor de queue contribuent à la tendance de l'hélicoptère à basculer dynamiquement dans la direction de la poussée anticouple. Durant le vol stationnaire, un hélicoptère muni d'un seul rotor principal tend à dériver dans la direction de la poussée du rotor anticouple. Le mouvement de dérive s'appelle la tendance à la translation. Vu que les rotors de queue sont normalement situés au-dessus du centre de gravité dans un vol stationnaire, la poussée du rotor de queue produit aussi un moment de rotation autour du centre de gravité. Une sollicitation des commandes pour contrer la tendance à la translation et le moment de rotation fait que le train d'atterrissage situé du côté opposé à la poussée du rotor anticouple est plus bas que l'autre pendant le vol stationnaire, ce qui limite l'autorité de la commande cyclique utilisée pour corriger l'amorce du basculement dynamique. Une erreur intrinsèque est intégrée aux commandes et/ou aux supports de la transmission/du rotor de certains hélicoptères pour contrer cette « tendance » naturelle.

Vents de travers

15.4.32 La traînée due au vent exercée sur le fuselage peut contribuer aux conditions de basculement dynamique.

Vents arrière

15.4.33 Les sollicitations rapides de l'anticouple pour compenser les effets des vents arrière peuvent contribuer aux conditions de basculement dynamique.

Pentes

15.4.34 La plupart des accidents de basculement dynamique se produisent pendant les opérations sur terrains en pente. Il arrive souvent que, sur une surface en pente, trop de cyclique soit appliqué vers la pente lorsque le train d'atterrissage sur l'aval de la pente se soulève ayant pour résultat un basculement dynamique de l'hélicoptère vers l'amont de la pente. L'hélicoptère basculera aussi si l'atterrissage ou le décollage se poursuivent après avoir atteint les limites du cyclique durant les opérations sur un terrain en pente.

Conception du rotor principal

15.4.35 Le basculement dynamique concerne jusqu'à un certain point tous les types de rotors, mais semble toucher plus fréquemment les rotors basculants. Le déplacement latéral du manche cyclique dans un hélicoptère à rotor basculant incline le disque rotor et le vecteur de poussée, mais rien d'autre. La tête du rotor basculant doit attendre le vecteur de poussée pour que le fuselage bouge. Cependant lorsqu'un patin ou une roue agit comme point de pivotement, le fuselage est maintenu à la surface et ne peut se déplacer sous le disque rotor. Une tête de rotor articulée ou rigide en léger déséquilibre latéral peut rapidement produire un moment de moyeu fortement perturbateur qui peut causer un basculement dynamique ; une sollicitation contraire du cyclique peut rapidement empêcher un moment de roulis de progresser jusqu'au basculement dynamique.

Charges extérieures

15.4.36 Le pivotement autour d'un point qui se produit dans le basculement dynamique peut aussi se produire en vol durant des opérations avec charge sous élingue si l'hélicoptère dérive latéralement et qu'une sangle se tend. Une réaction similaire se produit durant un atterrissage glissé sur des surfaces meubles si l'hélicoptère dérive latéralement durant la course et que son poids porte sur un côté du train d'atterrissage.

Description

15.4.37 La description suivante du basculement dynamique se base sur un rotor principal tournant dans le sens antihoraire. Pour un rotor tournant dans le sens horaire, il faut inverser la description pour les côtés gauche et droit :

- a) Les facteurs qui contribuent au basculement dynamique d'un rotor principal tournant dans le sens antihoraire sont : 1) patin/roue du côté droit plus bas que ceux du côté gauche avec la tendance à la translation de la poussée du rotor de queue s'ajoutant à la force de basculement ; 2) le centre de gravité latéral droit pousse le patin droit à rester en contact avec le sol ; 3) les vents de travers venant de la gauche entraînent un effet de recul du disque vers la droite ; 4) les commandes de lacet vers la gauche forcent le patin droit de l'hélicoptère à aller vers l'avant.
- b) Lorsque le patin ou la roue du côté droit est sur le côté amont d'une pente, moins de contrôle cyclique latéral est disponible en raison de la tendance à la translation du rotor de queue.

Centre de gravité

15.4.38 Le contrôle du poids et du centrage est une fonction opérationnelle qui incombe à l'exploitant. Les instructions de chargement approuvées figurent dans manuel de vol du giravion (RFM). L'exploitation au-dessus de la limite maximale de poids compromet l'intégrité structurale de l'hélicoptère et a des incidences négatives sur ses performances. L'hélicoptère peut ne pas être capable de soulever le poids maximal indiqué dans le RFM en raison de la puissance disponible dans les conditions de vol réelles. Le centrage est aussi crucial pour certains hélicoptères volant à pleine charge parce que des déplacements du centre de gravité (CG) aussi faibles que de quelques centimètres peuvent considérablement modifier les caractéristiques de manœuvrabilité de l'hélicoptère. Les hélicoptères ont un poids brut maximal intérieur, qui désigne le poids à l'intérieur de la structure de l'hélicoptère, et certains ont un poids brut maximal extérieur, qui se rapporte au poids de l'hélicoptère avec une charge extérieure. Le décollage et l'atterrissage d'un hélicoptère qui n'est pas à l'intérieur de ses limites de poids et de centrage, y compris les atterrissages suivants à des altitudes plus élevées, sont dangereux.

15.4.39 Le CG d'un rotor rigide est large ; il est étroit dans un rotor entièrement articulé, mais pas aussi restrictif que celui d'un rotor semi-articulé ou d'un rotor basculant, qui a une plage très étroite. La plage longitudinale du CG est plus grande que celle du CG latéral et est renforcée par le stabilisateur horizontal ou la gouverne de profondeur.

15.4.40 Le CG est modifié par la présence des membres d'équipage et des passagers et le rangement des bagages. La consommation de carburant durant le vol peut déplacer les limites extérieures du CG. Le mouvement des passagers, du fret et de l'équipage durant le vol peut aussi perturber le CG. Les limites du CG latéral peuvent être dépassées dans certains types d'hélicoptères par des forces extrêmes telles que l'hélicoptère ou la descente en rappel de personnel. Les problèmes de CG peuvent se présenter durant l'envol initial et la mise en stationnaire lorsque le pilote évalue le débattement disponible de la commande de cyclique.

15.4.41 L'exploitation au-dessus d'un poids maximal peut entraîner une déformation structurale ou une défaillance durant le vol si l'hélicoptère rencontre des facteurs de charge excessifs, de fortes rafales ou de la turbulence. Inversement, l'exploitation au-dessous du poids minimum peut avoir des incidences négatives sur les caractéristiques de manœuvrabilité de l'hélicoptère et peut empêcher d'obtenir le régime de rotor principal souhaitable durant l'autorotation. Les devis de poids et centrage contiennent des données essentielles, notamment une liste de tout l'équipement facultatif installé.

15.4.42 Un chargement décentré réduit aussi la manœuvrabilité. La commande de cyclique est moins efficace dans la direction opposée à l'emplacement du CG. Lorsque le CG se trouve directement au-dessous du mât du rotor, l'hélicoptère est à l'horizontale. Si le CG est trop éloigné du mât, le nez de l'hélicoptère s'incline vers l'avant. Un déplacement du CG vers l'avant peut se produire si l'hélicoptère décolle avec un pilote et un passager lourds sans bagages ou sans lestage approprié en arrière du mât du rotor. Avec un CG déplacé vers l'avant, l'hélicoptère a tendance à piquer aux grandes vitesses. La situation empire si les réservoirs de carburant sont situés en arrière du mât du rotor ; comme le poids du carburant diminue à mesure qu'il est consommé, le CG se déplace encore plus vers l'avant et le mouvement du cyclique vers l'arrière est restreint. Le CG peut se déplacer vers l'avant au point où le déplacement du cyclique vers l'arrière n'est plus suffisant pour arrêter l'hélicoptère. En cas de défaillance du moteur et d'autorotation, la commande de cyclique vers l'arrière pourrait ne pas être suffisante pour exécuter correctement l'arrondi avant l'atterrissage. Le CG déplacé vers l'avant n'est pas évident en vol stationnaire par forts vents. Il est essentiel de tenir compte de la vitesse du vent et de son rapport avec le déplacement vers l'arrière de la commande de cyclique.

15.4.43 Si le CG est trop loin vers l'arrière du mât, le nez se cabre. Si le vol continue avec un CG vers l'arrière, il peut être impossible de piloter l'hélicoptère dans la plage supérieure de vitesses admissibles parce que la commande de cyclique vers l'avant est insuffisante pour maintenir une assiette en piqué. Dans le cas d'un CG arrière extrême, une rafale ou un vent fort pourrait accélérer l'hélicoptère jusqu'à une vitesse supérieure à celle qui est produite en poussant au maximum la commande de cyclique. Dans ce cas, la dissymétrie de la portance et le battement des pales pourrait incliner le disque rotor vers l'arrière. Avec la commande cyclique déjà à fond vers l'avant, le disque rotor pourrait heurter la poutre de queue.

État de vortex

Anneaux tourbillonnaires

15.4.44 Un hélicoptère en vol stationnaire stable hors effet de sol (HES) produit une poussée totale équivalente au poids total de l'hélicoptère et produit des tourbillons le long de l'envergure des pales. Il se forme, à l'extrémité des pales d'un hélicoptère en vol stationnaire, un anneau tourbillonnaire continu qui s'écoule vers le bas en forme de spirale à partir d'un point situé juste au-dessous de l'extrémité de chaque pale. Tant que le tourbillon de l'extrémité des pales reste relativement petit, il a très peu d'incidence sur la poussée totale produite par les pales du rotor. Dans la zone de la pale près de l'emplanture, il y a un léger écoulement d'air vers le haut. Si le levier de pas collectif est légèrement abaissé, la poussée totale n'égale plus le poids total de l'hélicoptère et il commence à descendre en cherchant à trouver l'équilibre entre la poussée et le poids à une vitesse descensionnelle donnée. L'écoulement de l'air vers le haut à des vitesses de descente de faibles à modérées diminue l'angle d'attaque du flux d'air induit et il se produit une augmentation de poussée entre la zone médiane et la zone extérieure des pales et l'hélicoptère descend à une vitesse constante. Les tourbillons des extrémités des pales consomment de la puissance moteur mais ne produisent pas de portance utile. Tant que les tourbillons spiralent vers le bas et restent petits, le seul effet est une petite perte d'efficacité du rotor. À mesure que la vitesse descensionnelle augmente, l'angle d'attaque des zones intérieures des pales augmente et la zone d'emplanture des pales amorce un décrochage. Un anneau tourbillonnaire secondaire se forme à l'emplanture des pales, à l'intersection du flux d'air montant et du flux d'air induit (vers le bas) (Figure III-15-3).

État de vortex imminent

15.4.45 Si la vitesse descensionnelle continue à augmenter et les pales du rotor se rapprochent de plus en plus des spirales des tourbillons d'extrémité précédents, les tourbillons commencent à s'agrandir. L'hélicoptère atteint un point où la plus grande partie de la puissance développée par le moteur se perd en accélération de l'air dans une configuration en forme d'anneau. En fait, l'hélicoptère vole dans sa propre déflexion d'air agité vers le bas. Le rotor principal n'est en décrochage que dans les zones intérieures près du moyeu. Les symptômes caractéristiques de cet état sont une augmentation du niveau des vibrations basse fréquence de la cellule, des mouvements de tangage et de roulis et une augmentation de la vitesse descensionnelle avec l'augmentation du pas collectif. L'augmentation du pas collectif renforce l'action des tourbillons à l'extrémité des pales et réduit l'angle d'attaque, ainsi que la portance produite, aux zones extérieures des pales. La zone de décrochage augmente dans les zones intérieures des pales. Les zones intérieures et extérieures des pales produisent moins de poussée et augmentent la vitesse descensionnelle. L'abaissement du collectif force les zones intérieures des pales à s'enfoncer dans un décrochage et la zone d'extrémité à réduire encore plus son coefficient de portance. L'hélicoptère est en état de vortex.

État de vortex

15.4.46 L'état de vortex est une phase de vol en descente caractérisée par le passage d'un flux d'air non uniforme et instable à travers les pales du rotor. Cet état apparaît lorsque l'hélicoptère vole à une vitesse inférieure à la portance de translation équivalente, à une vitesse descensionnelle d'environ un quart de la vitesse induite en vol stationnaire et à un réglage du collectif à puissance partielle. À ce point de la descente, les tourbillons des extrémités des pales ont augmenté juste au-dessous des pales du rotor et l'hélicoptère commence à subir des niveaux de plus en plus élevés de vibrations ainsi que des oscillations en tangage et en roulis non commandées. Des variations de flux et des vibrations extrêmes commencent lorsque la vitesse descensionnelle est d'environ la moitié de la vitesse induite en vol stationnaire. Le vortex à l'intersection du flux d'air ascendant sur les zones intérieures des pales et du flux d'air descendant des zones extérieures se déplace vers le centre du disque ayant pour résultat une masse nette de flux d'air à travers les pales égale à zéro. Les effets de l'état de vortex atteignent leur maximum aux trois quarts environ de la vitesse induite en vol stationnaire à mesure que les tourbillons traversent périodiquement les rotors créant un air fortement instable et turbulent avec des niveaux très élevés de vibrations, des oscillations en tangage et en roulis non commandées et une perte de contrôle. À environ une fois et quart la vitesse induite en vol stationnaire, les effets de l'état de vortex disparaissent et un sillage perturbé se forme dans le flux d'air ascendant au-dessus des pales du rotor. Cependant, l'hélicoptère est maintenant en descente dans un sillage de turbulence ; il est très instable, n'est contrôlé ni par le cyclique ni par le collectif et sa vitesse descensionnelle augmente et peut se rapprocher de 1 830 m/min (6 000 pi/min). Une autorotation d'équilibre se produit généralement dans le sillage turbulent pendant laquelle il est possible de reprendre la maîtrise de l'hélicoptère.

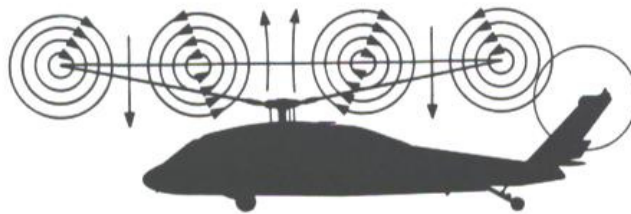


Figure III-15-3. État de vortex

Enfoncement par défaut de pas collectif

15.4.47 Les termes « enfoncement par défaut de pas collectif » et « décrochage rotor » sont utilisés pour décrire une situation où un hélicoptère continue à s'enfoncer même quand la puissance maximale est appliquée. C'est l'équivalent hélicoptère du décrochage des aéronefs à voilure fixe. Certaines écoles de pilotage d'hélicoptères exigent une démonstration de l'enfoncement par défaut de pas collectif aux premières étapes de l'état de vortex. La procédure de rétablissement normale enseignée consiste à réduire le pas collectif, à piquer pour augmenter la vitesse vers l'avant et à sortir de l'air perturbé. Si l'altitude le permet, le rétablissement peut consister à passer en autorotation. Dans certaines écoles de pilotage d'hélicoptères, particulièrement les écoles militaires, qui disposent de gros hélicoptères avec beaucoup de puissance excédentaire, il est enseigné aux élèves, aux premiers symptômes de l'enfoncement par défaut de pas collectif, à pousser le cyclique vers l'avant et à augmenter le collectif, particulièrement si l'hélicoptère est près du sol. Il convient de noter que la première fois qu'il se trouve en situation d'enfoncement par défaut de pas collectif, le pilote a d'abord tendance à essayer d'arrêter la descente en augmentant le pas collectif, qui, très probablement, augmentera la zone de décrochage des zones intérieures des pales et augmentera la vitesse descensionnelle.

Effet de la charge au disque

15.4.48 Le débit du flux d'air induit au disque rotor est fonction de la charge au disque rotor et de l'altitude-densité. Il faut être prudent dans l'utilisation de textes qui indiquent une vitesse descensionnelle « élevée » vu qu'elle est relative à la charge au disque. De nombreux documents indiquent que les premiers effets de l'état de vortex sont perçus à une vitesse descensionnelle d'environ 90 m/min (300 pi/min), un quart de la vitesse induite en stationnaire. Cette valeur se fonde sur un hélicoptère avec une charge au disque légère, d'environ 2 lb/ft², et volant au niveau de la mer. Une charge au disque de 10 lb/ft² au niveau de la mer représente un quart de vitesse induite en stationnaire d'environ 208 m/min (685 ft/min). À des altitudes-densité plus élevées, le flux d'air induit augmente pour produire la même poussée. Les concepteurs d'hélicoptères retardent souvent l'entrée dans l'effet d'état de vortex en augmentant la charge au disque et, donc, en augmentant le débit d'air induit.

Autorotation et état de vortex

15.4.49 À l'amorce d'une autorotation normale avec le pas collectif abaissé, la vitesse descensionnelle est trop élevée pour que l'état de vortex se développe. En outre, la mise en autorotation permet de sortir de l'état de vortex et de l'enfoncement par défaut de pas collectif. Cependant, l'état de vortex survient parfois durant des arrondis très rapides à faible puissance à la fin d'une autorotation ou durant des manœuvres de type arrêt-rapide.

Puissance insuffisante pour finir l'approche

15.4.50 Il arrive souvent qu'à la fin d'une approche à l'atterrissage, à un poids brut élevé et/ou à un altitude-densité élevée, l'hélicoptère subisse un atterrissage brutal parce qu'il n'a pas assez de puissance pour finir l'approche. La vitesse descensionnelle peut ne pas avoir été suffisante pour placer l'hélicoptère dans la phase d'amorce de l'état de vortex. Dans ce cas, le flux d'air traversant le rotor est normal ; il ne se produit aucune turbulence ni aucune vibration de la cellule caractéristique de l'état de vortex.

Conditions de vol

15.4.51 Les accidents liés à l'état de vortex se produisent souvent durant les approches à l'atterrissage. Les facteurs qui contribuent à ces accidents sont les approches à forte pente à des vitesses descensionnelles élevées, des altitudes-densité élevées où la marge entre la puissance requise et la puissance disponible diminue, et les approches vent arrière. On compte aussi parmi les conditions qui ont contribué à ces accidents les approches et les décollages en formation lorsque les hélicoptères qui suivent l'hélicoptère leader volent dans l'air perturbé du leader, les vols avec vent arrière avec un charge extérieure extrême, les tentatives de voler en stationnaire HES à des altitudes au-dessus du plafond de vol stationnaire et le vol HES sans maintenir un contrôle relativement précis de l'altitude.

État de vortex du rotor de queue

15.4.52 Voir le § 15.4.140, Perte d'efficacité du rotor de queue.

Cognement du mât

15.4.53 Le cognement du mât se produit seulement dans les systèmes à rotor suspendu, ou basculant, et commence souvent par des sollicitations inappropriées de la commande cyclique par le pilote qui se traduisent par des conditions de vol inférieures à 0,5 g. Le cognement catastrophique du mât se produit en vol lorsque l'angle de battement du rotor principal dépasse ses limites théoriques (environ 12°). Les butées fixes des chapes des pales entrent en contact avec le mât et le déforment avec une force suffisante pour détacher le rotor du mât.

15.4.54 Le rotor basculant compte sur la portance produite par le rotor principal pour contrer le poids de l'hélicoptère. Les moments produits par les forces aérodynamiques exercées sur la tête du rotor basculant dans des conditions de vol normales maintiennent la position du fuselage par rapport au disque rotor. Un déplacement brusque vers l'avant de la commande cyclique à partir d'un vol rectiligne en palier ou à la fin d'une montée peut mettre l'hélicoptère dans une condition de faible g. Le déplacement du cyclique vers l'avant réduit les angles d'attaque des pales et le mouvement de l'hélicoptère vers le haut et vers l'avant augmente le flux d'air induit. Pareil au gyroscope, le rotor principal continue à suivre sa trajectoire de vol en conservant la même assiette. La poussée du rotor principal d'un rotor basculant en vol à faible g est considérablement réduite jusqu'au point où le cyclique latéral n'a que peu ou pas d'effet. Dans les systèmes à rotor tournant dans le sens antihoraire en situation de faible g, il n'y a que peu ou pas de poussée à gauche pour compenser le moment de roulis à droite produit par la position du rotor de queue au-dessus du centre de gravité de l'hélicoptère. La poussée du rotor crée aussi un lacet vers la gauche. En vol à faible g, le rotor principal continue à répondre aux sollicitations de la commande cyclique mais, comme il ne produit pas de poussée efficace, la réponse n'est pas transmise au fuselage. Si le pilote essaie d'abord de corriger le roulis vers la droite en poussant le cyclique vers la gauche, qui est une réponse « normale », l'angle de cognement des pales du rotor principal peut augmenter suffisamment pour permettre aux butées fixes des chapes des pales d'entrer en contact avec le mât. Le mât d'un rotor basculant est très long ; l'impact des chapes des pales contre le mât en vol produit une forte contrainte qui peut amener la déformation du mât et le détachement du rotor principal, ou peut permettre aux pales du rotor principal de heurter la poutre de queue. Le faciès de rupture d'un mât cassé par suite de cognements a une apparence ovale ou rectangulaire. En raison de ses girations imprévisibles, un rotor principal peut heurter le fuselage en vol après s'être détaché.

Forts angles d'inclinaison latérale

15.4.55 À des angles se rapprochant de 90°, le pilote peut accidentellement décharger le rotor s'il ne maintient pas un g positif suffisant (supérieur à 0,5 g) durant toute la manœuvre et le rétablissement. Les angles de battement des pales du rotor principal à un faible g, combinés à la commande cyclique latérale, peuvent conduire les chapes des pales à heurter le mât et à le casser. Un battement excessif des pales durant un rétablissement à faible g à partir d'un fort angle d'inclinaison latérale peut aussi permettre à une pale de heurter le fuselage.

Sollicitation brusque des commandes

15.4.56 Des inversions rapides de roulis et de tangage peuvent déplacer le plan du disque rotor plus rapidement que ne peut le faire le fuselage, conduisant au cognement du mât ou à un contact des pales avec le fuselage. Une sollicitation brusque des commandes pourrait être le résultat d'un événement extérieur tel qu'une manœuvre d'évitement d'un oiseau ou d'un obstacle. Des sollicitations brusques des commandes peuvent aussi produire un couple hélicoptère-pilote qui se traduit par un rebondissement du collectif (marsouinage) pouvant produire un battement excessif des pales.

Dépassement du domaine de vol

15.4.57 À de grandes vitesses vers l'avant dans certains types d'hélicoptères, le décrochage de la pale reculante peut progresser jusqu'à un refoulement du rotor principal et un battement excessif des pales, se traduisant par le cognement du mât et le contact entre les pales et le fuselage s'il n'est pas arrêté immédiatement. Une vitesse latérale excessive (glissade) contribue aussi à un battement excessif des pales et à la possibilité d'un cognement du mât.

Faible régime du rotor principal

15.4.58 Un régime trop faible du rotor principal à partir duquel le retour au régime normal est impossible diminue le moment rotatif (force centrifuge) des pales du rotor principal nécessaire pour contrer les forces aérodynamiques et la conicité. Un régime aussi faible peut entraîner un battement excessif des pales du rotor sans changement du vent relatif, ce qui peut entraîner le cognement du mât ou le contact entre les pales et le fuselage.

Défaillances mécaniques

15.4.59 Les défaillances mécaniques peuvent provoquer des mouvements brusques autour des axes de lacet, de roulis et de tangage de l'hélicoptère, menant au cognement du mât. La réaction du pilote à une défaillance soudaine du moteur, à une perte de la transmission du rotor de queue ou à un déplacement soudain du centre de gravité longitudinal, tel que la perte de la boîte de transmission du rotor de queue ou d'un autre élément structurel peut incliner le disque au-delà de ses limites et conduire au cognement du mât. Un hélicoptère muni de flotteurs fixes aura tendance à dérapier en roulis en opposition au battement du rotor, réduisant la marge du contact de la chape de la pale avec le mât du rotor.

Divers

15.4.60 D'autres conditions de vol qui pourraient provoquer des sollicitations brusques des commandes conduisant au cognement du mât sont notamment la turbulence, les rafales et la translation latérale à la vitesse ou près de la vitesse maximale admissible de l'hélicoptère.

15.4.61 Les facteurs contributifs comprennent l'altitude-densité, des poids bruts élevés et le chargement hors des limites du CG.

15.4.62 Le cognement non catastrophique du mât peut aussi se produire dans des conditions de fort vent durant le démarrage et l'arrêt, durant les atterrissages sur terrain en pente et durant les vérifications des commandes au sol.

15.4.63 *Martèlements de la butée d'affaissement.* Les systèmes rotor multipales présentent un phénomène semblable ; un battement excessif des pales durant des manœuvres à faible g peut entraîner un contact des pales avec les butées du mât. Même si les martèlements de la butée d'affaissement ne causeront pas de rupture du mât, un battement excessif des pales peut parfois conduire à un contact entre les pales et le fuselage.

Résonance sol

15.4.64 La résonance sol est un couple potentiellement destructif de mouvement avance-recul des pales d'une tête de rotor entièrement articulée d'un hélicoptère en contact avec le sol basculant vers l'avant et vers l'arrière et d'un côté à l'autre sur son train d'atterrissage lorsque les pales du rotor sont déphasées l'une par rapport à l'autre. Le rotor principal agit comme un volant à inertie. Le mouvement déphasé des pales déplace le centre de gravité loin du mât en une spirale divergente, créant une vibration dans la cellule. On peut reconnaître le début de la résonance par un lent mouvement de bascule du fuselage qui se transforme en vibration oscillante d'amplitude croissante. Sans mesures correctives dès le début, l'oscillation peut rapidement croître jusqu'à ce que l'hélicoptère subisse des dommages majeurs ou qu'il soit détruit.

15.4.65 La résonance sol est fonction de l'amortissement, tant dans la tête du rotor autour des articulations avance-recul (traînée) que dans le train d'atterrissage. Les moments les plus critiques pour la résonance sont juste avant l'envol de l'hélicoptère ou juste avant que le plein poids de l'hélicoptère ne repose sur l'atterrisseur à l'atterrissage. Durant ces moments, les éléments du train d'atterrissage sont complètement déployés et ne peuvent pas fournir l'amortissement requis. La résonance sol s'est aussi produite durant les vérifications de puissance et durant la circulation au sol lorsque l'hélicoptère est secoué quand le train d'atterrissage heurte un objet. Si le régime est faible, le moyen à utiliser normalement pour arrêter la résonance est de fermer les gaz immédiatement pour arrêter rapidement le rotor et abaisser complètement le collectif pour amener les pales au petit pas. Si le régime se situe dans la plage normale d'utilisation, il faut généralement essayer de décoller l'hélicoptère du sol pour permettre aux pales de se réaligner.

Problèmes causés par l'équipage de conduite

15.4.66 Durant l'atterrissage d'un hélicoptère, s'il est amené lentement à prendre contact avec le sol et à reposer légèrement sur le train d'atterrissage, un mouvement d'oscillation peut s'amorcer et conduire à la résonance sol. De même, un atterrissage dur ou mal exécuté peut aussi déplacer les pales et amorcer une résonance sol. Le même phénomène peut se produire lorsque le décollage et la mise en stationnaire sont exécutés en appliquant lentement le pas collectif tout en maintenant l'hélicoptère légèrement appuyé sur le train d'atterrissage. Une secousse latérale au moment de l'atterrissage peut aussi modifier l'espacement correct entre les pales et induire une résonance sol. Le couplage aéronef-pilote peut encore exacerber la situation si le pilote sollicite les commandes en désynchronisation avec les oscillations de la résonance sol.

Procédures de maintenance

15.4.67 Les constructeurs conçoivent les hélicoptères pour assurer un amortissement mutuel entre le rotor principal et le train d'atterrissage. Tout ce qui peut dérégler cet amortissement mutuel peut amener une résonance sol. Les amortisseurs oléopneumatiques et les pneus du train d'atterrissage principal et les amortisseurs avance-recul du rotor principal doivent être maintenus dans un état conforme aux normes de navigabilité. Des pressions inégales des amortisseurs oléopneumatiques et des pneus, qui ne correspondent pas ou qui sont dérégées, peuvent aggraver les oscillations créées par une pale déphasée par rapport aux autres pales du rotor principal. Le mouvement déphasé des pales en avance et en recul peut se produire si les amortisseurs de traînée ne sont pas en correspondance ou sont mal entretenus. Des pales de rotor principal déséquilibrées ou un mauvais alignement peut aussi contribuer à créer des fréquences et des oscillations qui conduisent à la résonance sol. Il convient donc de tenir compte de la résonance au sol dans les briefings prévus lors d'opérations au sol initiales ou de maintenance après une modification du système rotor ou des servocommandes de vol. Les arrimages doivent être enlevés pour s'assurer que le train d'atterrissage peut se déplacer librement.

Défaillance d'équipement

15.4.68 La liberté de mouvement des pales du rotor autour des articulations d'avance-recul exige l'utilisation d'un dispositif d'amortissement pour chaque pale afin de maintenir une relation angulaire presque égale entre les pales du rotor dans le plan de rotation, évitant ainsi une oscillation excessive et un déséquilibre géométrique. Les dysfonctionnements des amortisseurs à l'atterrissage ou au décollage peuvent dérégler le déplacement angulaire des pales, déplacer le centre de gravité et conduire à une rupture structurelle. Généralement, les dysfonctionnements en vol ne sont pas très perceptibles sauf pour une légère augmentation des vibrations de la cellule. Les amortisseurs avance-recul sont généralement de type à frottement, hydraulique ou élastomère. Les amortisseurs avance-recul de type à frottement et hydrauliques permettent généralement des excursions assez importantes des pales tandis que les amortisseurs avance-recul de type élastomère ne permettent pas aux pales de s'écarter très loin de leur espace géométrique et tendent donc à fournir une meilleure résistance à la résonance sol.

Résonance air

15.4.69 Un phénomène analogue à la résonance sol peut se produire en vol, particulièrement avec des rotors rigides. Les rotors rigides modernes sont munis d'un type d'amortisseur avance-recul et d'amortisseurs dans le système de retenue du pylône. L'hélicoptère peut subir un phénomène d'instabilité oscillatoire en vol appelé résonance air qui peut se produire en raison du couplage dynamique de la flexibilité du rotor et de la flexibilité de la retenue du pylône. Les considérations qui s'appliquent à la résonance sol s'appliquent aussi à la résonance air, sauf que les variables de retenue du pylône remplacent les variables du train d'atterrissage. La résonance air s'est produite en conditions de performances maximales telles que le transport d'une charge extérieure, les pilotes ayant corrigé la résonance air en abandonnant la charge et en changeant la dynamique entre le rotor et le pylône.

Rebond du collectif

15.4.70 Le rebond du collectif, parfois appelé marsouinage, est un phénomène de couplage hélicoptère-pilote causé par le mouvement du levier de collectif dans une direction opposée au mouvement longitudinal du fuselage avec pour résultat une dynamique de l'aéronef qui, de manière inattendue, s'écarte rapidement de la commande et de la réponse attendues par le pilote. Le mouvement opposé créé par le rebond du collectif peut s'amplifier rapidement et s'il n'est pas corrigé, peut conduire à une perte de contrôle ou à la destruction de l'hélicoptère en trois ou quatre rebonds. Ce phénomène s'amorce normalement lorsqu'il y a un jeu excessif dans le levier de collectif, amenant une réaction biodynamique dans le bras du pilote qui commande le collectif. Les accélérations de l'hélicoptère sur le bras du pilote augmentent l'amplitude des accélérations verticales. En outre, les retards mécaniques et aérodynamiques entre la sollicitation de la commande et la réaction de l'hélicoptère peuvent amener le pilote à solliciter la commande plus que nécessaire. Lorsque l'hélicoptère réagit à cet ensemble de sollicitations, le pilote peut appliquer une commande opposée pour corriger la situation et sortir de la synchronisation avec les mouvements réels. Ce phénomène peut se produire dans n'importe quelle phase du vol, du vol stationnaire jusqu'au vol vers l'avant à grande vitesse, et est normalement amorcé par la réaction du pilote à un événement extérieur tel que des rafales de vent ou une manœuvre pour éviter un oiseau. Un élément environnemental qui peut entraver le redressement après un rebond du collectif est le manque, ou le mauvais choix, de références visuelles extérieures nécessaires pour éviter ou redresser un rebond du collectif. Même s'il est recommandé d'avoir un frottement du collectif pour éviter le rebond, une sollicitation excessive pour déplacer un collectif dont le réglage de frottement est trop serré peut aussi conduire au rebond. Le rebond du collectif en vol peut conduire à une instabilité du rotor principal et amorcer un contact entre les pales du rotor et le fuselage ou un cognement du mât.

15.4.71 Les charges extérieures peuvent aussi causer des oscillations longitudinales et latérales en vol stationnaire et en vol vers l'avant, conduisant à un rebond catastrophique du collectif. Les effets de couplage d'une élinguée sont fonction de la stabilité pendulaire de la charge, de la fréquence pendulaire, du retard de phase et de la réaction du pilote dans l'application des commandes, et sont normalement plus prononcés dans le mouvement latéral. D'autres facteurs peuvent comprendre l'aérodynamique de la charge, la longueur des sangles et des câbles de la charge, l'élasticité des sangles et des câbles, le sillage du rotor et la vitesse de rotation de la charge. Une réaction déphasée du pilote peut avoir pour conséquence des oscillations soutenues et incontrôlables conduisant à la perte de la charge, à des contraintes excessives sur l'hélicoptère et à la perte de contrôle.

15.4.72 Un phénomène de couplage hélicoptère-pilote semblable peut se produire latéralement en vol stationnaire si la réaction du pilote est désynchronisée par rapport au mouvement réel de l'hélicoptère. Même s'il ne conduit pas à la destruction de l'hélicoptère, il peut conduire à une perte de contrôle. La position du compensateur cyclique à « off » peut aggraver le phénomène puisqu'il n'y a plus de relation entre la position actuelle du cyclique et la position neutre du cyclique. Des oscillations latérales incontrôlables en vol stationnaire peuvent conduire à un toucher des roues accidentel et à un basculement dynamique.

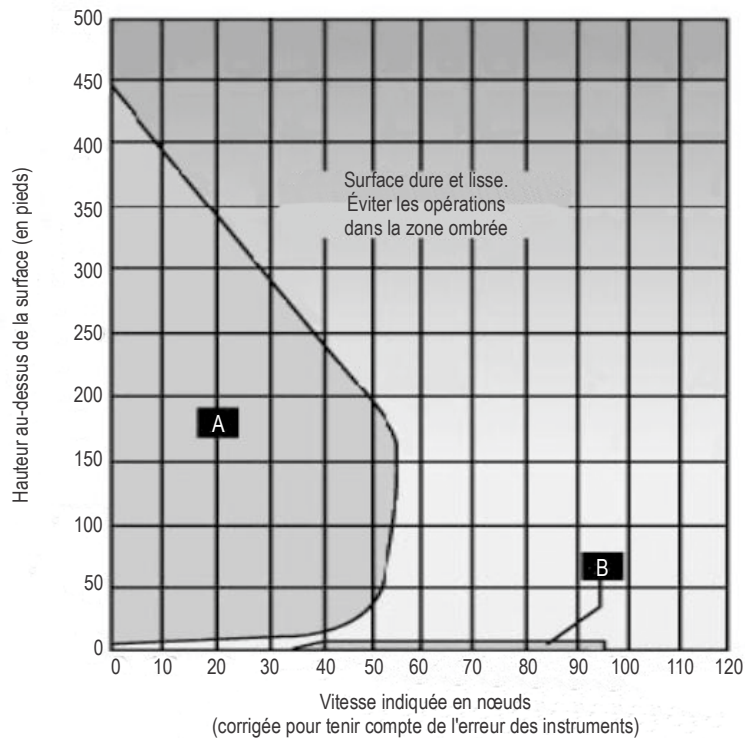


Figure III-15-4. Diagramme hauteur-vitesse

15.4.73 Le « rebond au sol » se produit pendant que l'hélicoptère est au sol. Bien que bénin, ce phénomène indésirable commence par le rebond de l'hélicoptère sur l'axe vertical puis s'aggrave par un couplage hélicoptère-pilote dans une tentative d'arrêter le rebond avec le collectif, particulièrement s'il n'y a que peu ou pas de frottement dans la commande de collectif. Le bras du pilote se déplace dans la direction opposée à celle du fuselage. L'amplitude du rebond au sol peut augmenter rapidement ; le rebond au sol peut conduire à la résonance sol.

Diagramme hauteur-vitesse

15.4.74 Le diagramme hauteur-vitesse, parfois appelé courbe de l'homme mort, définit une enveloppe de vitesse anémométrique et de hauteur au-dessus du sol dans laquelle il est impossible d'effectuer en sécurité un atterrissage sans moteur ou avec un moteur hors de fonctionnement. Avant le 31 janvier 1983, le diagramme hauteur-vitesse était une limite opérationnelle. Elle limitait les opérations des hélicoptères dans diverses applications. Le diagramme hauteur-vitesse est aujourd'hui une information de performance pour les hélicoptères de catégorie B dont le nombre maximal de sièges passagers est égal ou inférieur à 9, mais demeure une limite pour les hélicoptères de catégorie A et les hélicoptères de catégorie B dont le nombre de sièges passagers est égal ou supérieur à 10. Les diagrammes hauteur-vitesse ont pour base un délai de 1 seconde pour la prise des mesures appropriées par le pilote.

15.4.75 La capacité d'un hélicoptère d'atterrir en autorotation en toute sécurité après une défaillance moteur est limitée par la structure et la conception d'un hélicoptère donné pour certaines combinaisons de hauteur géométrique et de vitesse anémométrique. Pour les hélicoptères monomoteurs et les hélicoptères multimoteurs sans isolement, le diagramme hauteur-vitesse est basé sur une défaillance soudaine de tous les moteurs (Figure III-15-4). Les défaillances moteur qui se produisent dans la zone ombrée (zone à éviter) du diagramme pour le vol à grande vitesse et le vol en palier (croisière) peuvent avoir un risque élevé de causer des dommages graves à l'hélicoptère et des blessures aux

occupants. Dans le cas d'une autorotation amorcée avec une combinaison de haute altitude et de faible vitesse anémométrique, il faut s'attendre à des forces d'impact verticales importantes. Dans le cas d'une autorotation amorcée avec une combinaison de basse altitude et de vitesse anémométrique élevée, il faut s'attendre à des forces d'impact horizontales élevées. Une défaillance moteur qui se produit dans la cassure de la courbe est moins cruciale pourvu qu'il y ait une aire d'atterrissage sûre. Les zones ombrées du diagramme sont séparées par un couloir de décollage offrant un chemin hors des zones à éviter où le pilote peut décoller en utilisant des compétences normales de pilotage.

Givrage en vol

15.4.76 Le givrage en vol perturbe le flux d'air autour des surfaces exposées, des irrégularités de surface et des entrées. L'accumulation de givre varie avec le temps d'exposition aux conditions de givrage, la température et la taille des gouttelettes d'eau, l'humidité relative et la forme de la surface et des entrées. Le givre se forme lorsque l'humidité est élevée et à des températures égales ou inférieures à 0 °C (32 °F). Il se forme sur l'extrados des pales du rotor principal où la pression est réduite en raison des plus grandes vitesses relatives d'écoulement qui créent une diminution de la pression et de la température. La forme irrégulière du givre réduit l'efficacité aérodynamique des pales.

15.4.77 Le rythme d'accumulation du givre sur de petites surfaces telles que grillages d'admission, drains ou événements est fonction de la vitesse de l'aéronef. L'accumulation de givre sur les pales de rotor est fonction de la vitesse de rotation. Les sections de pales qui se déplacent plus rapidement rencontrent plus de gouttelettes par seconde et accumulent le givre plus rapidement. Les sections qui se déplacent à des vitesses relatives plus élevées produisent de la chaleur par frottement et peuvent empêcher la formation de givre près des extrémités des pales en vol normal. À des températures de 0 °C à -6 °C (32 °F à 20 °F), par exemple, le givre se forme sur le bord d'attaque des pales à partir de l'emplanture jusqu'à environ 70 % de la longueur de la pale en allant vers l'extrémité, l'accumulation maximale de givre se produisant approximativement au milieu de cette zone. En général, à ces températures, la section restante de 30 %, où se produit la plus grande partie de la portance en vol propulsé est libre de givre en raison de la chaleur de frottement.

15.4.78 La rapidité avec laquelle le givrage en vol dégrade les performances dépend de l'intensité des conditions de givrage et de la forme du givre. Le givrage en vol peut augmenter le coefficient de traînée. Les systèmes passifs d'antigivrage utilisés contre l'accumulation de givre comprennent des matériaux et des revêtements. Le premier avertissement d'accumulation de givre pour le pilote peut être une augmentation du pas collectif pour maintenir le vol en palier et une augmentation de la puissance pour maintenir le régime du rotor.

15.4.79 Le givre peut adhérer à la surface du rotor pendant que l'hélicoptère est au sol avec les rotors arrêtés ou en marche. L'efficacité des pales et la portée opérationnelle de l'hélicoptère, la vitesse ascensionnelle et les performances en vol stationnaire sont considérablement réduites par de petites quantités de givre. La visibilité à travers le pare-brise peut être restreinte par la condensation à l'intérieur du pare-brise qui se transforme en givre. Le givrage des accès du système pitot-statique peut causer des erreurs graves dans les données d'altitude et de vitesse anémométrique qui risquent de compromettre la sécurité du vol.

15.4.80 Un givrage léger en vol sur les rotors et les surfaces aérodynamiques peut se traduire par des commandes de vol lentes et la vibration de la cellule. Le givre se forme sur les angles vifs, les antennes, les liaisons de commande et autres éléments semblables. Il augmente le poids de l'hélicoptère et les besoins en portance. L'accumulation de givre peut aussi nuire au fonctionnement des butées d'affaissement.

15.4.81 Des accumulations modérées de givre sur les pales de rotor peuvent forcer l'hélicoptère à amorcer une descente même après l'application de toute la puissance disponible. L'accumulation de givre sur la poutre de queue peut amener l'hélicoptère à dépasser ses limites de CG longitudinales.

15.4.82 Une certaine quantité de givre doit s'accumuler avant qu'il ne puisse se détacher naturellement. Le givre se détache plus facilement des pales à haute portance et flexibles que des pales à haute performance et plus rigides. La température de l'air extérieur a une grande influence sur le décollement du givre. Des sollicitations rapides des commandes

ou des changements rapides de vitesse du rotor peuvent provoquer un décollement asymétrique du givre. Le décollement asymétrique du givre des pales du rotor principal et du rotor de queue cause un déséquilibre, une flexion des pales et une augmentation des vibrations de la cellule. Les déséquilibres des pales du rotor principal par le décollement du givre peuvent entraîner l'instabilité du rotor principal et des vibrations potentiellement destructrices. Les contraintes exercées sur le système rotor et la cellule peuvent dépasser les limites structurales et de fatigue des pales, du mât et des structures de support du rotor principal et du rotor de queue. Le décollement du givre peut aussi endommager des éléments essentiels au vol et compromettre le vol. Le givre qui se détache pendant que l'hélicoptère est au sol est dangereux pour le personnel au sol, les passagers et l'équipement situé à proximité des rotors en mouvement.

15.4.83 Les pales minces à haute performance sont plus vulnérables au givrage que les pales plus épaisses à haute portance. Les pales à petit rayon avec un régime rotor plus élevé tendent à accumuler le givre plus rapidement que les pales qui tournent à un régime plus bas.

15.4.84 Le givrage en vol peut gravement dégrader les caractéristiques d'autorotation. L'efficacité des pales du rotor est faible. En autorotation, la zone d'entraînement de la pale est située près du milieu de l'envergure, c'est-à-dire celle où s'accumule aussi le plus de givre. La vitesse descensionnelle en autorotation doit être supérieure pour compenser la perte d'efficacité. La butée basse du collectif peut être trop haute pour établir le régime rotor désiré. La vitesse minimale de sécurité du rotor pour maintenir une vitesse descensionnelle acceptable sera plus élevée que la normale. L'augmentation de la traînée créée par la présence de givre sur les pales réduit la capacité d'accélérer le rotor dans l'arrondi. Vu que la capacité de portance maximale est moindre, l'augmentation du facteur de charge qui peut être obtenue par l'augmentation du pas collectif à la fin de l'autorotation est minime ou nulle. L'enquêteur constatera peut-être que le régime du rotor principal a diminué et que les pales du rotor principal ont subi un battement excessif avec des résultats catastrophiques.

15.4.85 Vu que très peu d'hélicoptères ont l'approbation de voler dans des conditions de givrage connues, la présence de givre est très rare dans les opérations normales des hélicoptères. Ceux qui ont l'approbation de voler en conditions de givrage connues sont généralement de gros hélicoptères équipés de systèmes de détection du givrage ou de moyens de déterminer la formation de givre sur les parties essentielles de l'hélicoptère. Le dégivrage des pales du rotor se fait normalement à l'aide d'un système électrique alimenté par la génératrice CA montée sur la transmission. Les entrées d'air du moteur peuvent être chauffées électriquement ou par l'air de prélèvement. Dans le cas des hélicoptères qui sont munis de systèmes de dégivrage, l'enquêteur doit être conscient que ces systèmes ont des limites. Le vol dans la pluie verglaçante ou la bruine se congelant est interdit. Un dégivrage incomplet peut se produire si le système de dégivrage est utilisé avant qu'il y ait une accumulation suffisante de givre sur les pales. D'autres problèmes peuvent survenir si le système de dégivrage est déphasé et le givre est éliminé de manière asymétrique. Le système peut tomber en panne. Après une défaillance du système de dégivrage, un hélicoptère devrait pouvoir être contrôlé pendant 15 minutes. En cas de défaillance du moteur, un hélicoptère approuvé pour le vol en conditions de givrage connues devrait pouvoir atterrir en autorotation en toute sécurité.

Pas excessif

15.4.86 Le pas excessif est un phénomène qui se produit lorsque l'augmentation du pas collectif atteint un point où la traînée créée par l'angle d'attaque des pales du rotor principal est telle qu'il est impossible, même avec toute la puissance disponible du moteur, de maintenir ou de rétablir le régime opérationnel normal. À faible régime rotor, l'angle d'attaque des pales augmente, la conicité augmente et la traînée augmente. L'augmentation du collectif ne servira qu'à faire chuter encore plus le régime du rotor. Les grands angles d'incidence et la traînée rotor réduisent le régime du rotor. Le régime du rotor principal peut diminuer au point où toutes les pales décrochent. Le rotor de queue est perturbé et la commande anticouple peut être perdue.

15.4.87 Si le pilote permet que le régime du rotor chute au point où toutes les pales du rotor sont en décrochage, le résultat en altitude est généralement fatal. Ce phénomène peut se produire de plusieurs façons : permettre simplement au régime rotor de chuter, coordonner lentement l'application des gaz et l'augmentation du pas collectif,

tourner la manette des gaz dans le mauvais sens ou appliquer trop de collectif pour la puissance disponible. Lorsque le régime du rotor diminue, le pilote essaie de conserver la même portance en augmentant le pas. À mesure que le pas augmente, la traînée diminue, ce qui exige plus de puissance pour essayer d'accélérer les pales jusqu'à rétablir le régime approprié. Lorsque la puissance n'est plus disponible pour maintenir le régime, et donc la portance, l'hélicoptère commence à descendre, ce qui modifie le vent relatif et augmente encore plus l'angle d'attaque. À un faible régime rotor, il se produit une forte conicité qui produit de fortes contraintes en flexion sur les pales. Il peut s'ensuivre de grands angles de battement et des problèmes de pilotabilité. À un certain point le décrochage des pales s'amorce si le régime n'est pas rétabli. L'abaissement complet du collectif peut aggraver le décrochage. Si toutes les pales décrochent, il est impossible d'obtenir un flux d'air stabilisé à travers les pales. La rotation des pales peut s'arrêter avant que l'hélicoptère ne descende jusqu'à la surface.

15.4.88 Une technique que peut appliquer le pilote pour effectuer un rétablissement après un pas excessif en autorotation est d'augmenter immédiatement les gaz, si possible, tout en abaissant légèrement le collectif. Cette manœuvre réduit le pas du rotor principal, l'angle de conicité et la traînée. Elle peut être répétée plusieurs fois pour rétablir le régime de fonctionnement normal. En vol en altitude, le collectif n'est généralement abaissé qu'une fois pour essayer de rétablir la vitesse du rotor. La quantité d'abaissement du collectif dépend de l'altitude.

15.4.89 Le phénomène du pas excessif peut se produire dans n'importe quelle phase du vol. Un poids brut élevé, une haute altitude-densité et des températures élevées peuvent y contribuer. Une commande brusque à la fin d'une autorotation, un arrêt rapide, une approche à l'atterrissage ou un atterrissage interrompu et des opérations dans des conditions où le vol stationnaire hors effet de sol est impossible peuvent amorcer le phénomène de pas excessif.

15.4.90 Le pas excessif menant à un faible régime et au décrochage des pales est plus fréquent dans les hélicoptères propulsés par de petits moteurs à pistons munis de pales à faible inertie. Avec un moteur à pistons, le régime du moteur chute aussi et le moteur peut s'arrêter durant le pas excessif.

15.4.91 Les moteurs à turbine sont aussi sensibles au phénomène du pas excessif mais il se produit beaucoup moins fréquemment. Lorsque l'hélicoptère vole à faible puissance comme en autorotation, le générateur de gaz de la turbine tourne aussi à faible régime. Une augmentation du pas collectif à la fin de l'autorotation exige de la puissance de la turbine libre. Le délai entre la demande de puissance et l'obtention de la puissance entraîne un affaissement du régime du rotor principal. L'application des gaz et du collectif peut ne pas être coordonnée et le régulateur peut ne pas augmenter le débit de carburant assez rapidement. Si l'augmentation du pas collectif est brusque, l'affaissement peut être assez important pour ralentir le rotor au point d'atteindre le pas excessif. La plupart des hélicoptères à turbine utilisent un « anticipateur » dans le mouvement du collectif pour compenser le délai entre la demande et l'obtention de la puissance.

15.4.92 L'avertissement de faible vitesse de rotor est requis sur tous les giravions monomoteurs et sur les giravions multimoteurs qui n'ont pas d'augmentation automatique de la puissance du moteur ou des moteurs restants sur défaillance d'un moteur. Les hélicoptéristes installent cet avertissement sur la plupart des hélicoptères multimoteurs. La partie sonore de l'alarme de faible régime est généralement distinctif pour éviter la confusion avec d'autres alarmes. Le système d'avertissement de faible régime est normalement muni d'un commutateur ou d'un bouton de désactivation qui peut être actionné par le pilote. Au moins un hélicoptériste a installé un commutateur d'avertissement de faible régime à la position complètement abaissée du collectif.

Décrochage de la pale reculante

15.4.93 Le décrochage de la pale reculante se produit lorsque l'angle d'attaque de la pale reculante dépasse l'angle d'attaque de décrochage de la section de la pale. Ce problème commence sans grandes conséquences au vol à vitesse modérée à l'extrémité de la pale reculante du rotor à cause du battement des pales et de l'écoulement plus lent de l'air relatif. Pour que la pale reculante produise la même poussée et la même portance que la pale avançante, elle doit fonctionner dans cet écoulement d'air plus lent à un angle d'attaque plus grand. Si on augmente le pas de la pale ou la vitesse avant, la partie du disque rotor en décrochage s'agrandit et le décrochage progresse vers le moyeu à partir de

l'extrémité de la pale du rotor. L'hélicoptère peut commencer à vibrer à une basse fréquence qui est proportionnelle au nombre de pales du rotor et à la vitesse du rotor. Comme les moments de tangage de la pale sont transmis par la tête du rotor et le système de commande de vol, le pilote peut ressentir des vibrations, un fonctionnement dur et une vibration du manche. Lorsqu'environ 15 % du disque rotor est en décrochage, l'hélicoptère peut se cabrer violemment, subir de fortes vibrations et une tendance au roulis dans la direction de la pale reculante. L'état de décrochage empêche le battement d'égalisation de la portance et l'angle plus grand de la pale aggrave encore plus le décrochage de la pale reculante. Si le décrochage est grave, la tendance au cabré peut devenir incontrôlable et il peut se produire une perte de contrôle partielle ou une perte de contrôle sans possibilité de rétablissement.

15.4.94 Si les conditions de décrochage de la pale reculante se produisent lentement, les vibrations et la réaction des commandes fournissent un avertissement suffisant.

Rétablissement

15.4.95 Déplacer le cyclique vers l'arrière ne fait qu'aggraver le décrochage vu qu'il produit un effet d'arrondi, augmentant ainsi les angles d'attaque. Le pousser vers l'avant aggrave aussi le décrochage vu que l'angle d'attaque de la pale reculante augmente. Pour effectuer le rétablissement à partir d'un décrochage de pale reculante, il faut abaisser le collectif pour réduire l'angle d'attaque puis déplacer le cyclique vers l'arrière pour ralentir l'hélicoptère. Si un faible régime de rotor est un facteur dans le décrochage de la pale reculante, il faut augmenter le régime du rotor.

Haute altitude-densité

15.4.96 L'augmentation de l'altitude-densité exige d'augmenter les angles d'attaque des pales pour conserver la portance à une vitesse anémométrique donnée.

Poids brut élevé

15.4.97 Lorsque le poids de l'hélicoptère se rapproche du poids brut maximal, il faut augmenter les angles d'attaque des pales pour produire plus de portance afin de compenser le poids plus élevé.

Faible régime rotor

15.4.98 Lorsque le régime rotor baisse par rapport au régime opérationnel normal, il faut augmenter les angles d'attaque des pales pour obtenir une poussée donnée du rotor, et donc un plus grand angle d'attaque.

Manœuvres

15.4.99 Des sollicitations excessives ou brusques des commandes à grande vitesse vers l'avant augmentent la portance requise et l'angle d'attaque des pales.

Rafales de vent

15.4.100 Les courants d'air ascendants augmentent temporairement l'angle d'attaque des pales.

Décrochage de la pale avançante

15.4.101 Le décrochage de la pale avançante se produit dans des conditions de vol semblables à celles du décrochage de la pale reculante : vitesse anémométrique élevée, hautes altitudes-densité et poids bruts élevés. À des nombres de Mach élevés dans la zone de l'extrémité de la pale avançante, les effets de compressibilité du flux d'air dus à la formation d'ondes de choc localisées sur l'extrados déplacent le centre de pression vers l'arrière. De fortes augmentations de la traînée associées aux ondes de choc perturbent le flux d'air. Les vibrations se font sentir dans tout l'hélicoptère. Le nez de l'hélicoptère a tendance à piquer et l'hélicoptère a tendance à s'incliner latéralement dans la

direction du décrochage de la pale avançante. Dans certaines conditions, l'hélicoptère peut subir des dommages structuraux. Certaines conceptions nouvelles de pales de rotor contrent cet effet de la pale avançante avec une pale dont la partie extérieure est en flèche ou avec une torsion de la pale pour réduire l'angle d'attaque à l'extrémité de la pale.

Altitude-densité

15.4.102 L'altitude-densité est l'altitude dans l'atmosphère type correspondant à une valeur particulière de la densité de l'air. Même si l'altitude-densité est souvent interprétée comme l'altitude-pression corrigée pour tenir compte des différences de température non type, la définition de l'altitude-densité dans les opérations d'hélicoptère comprend la teneur en humidité de l'air. Des altitudes-densité plus élevées signifient une diminution des performances de l'hélicoptère. Les altitudes-densité élevées peuvent être présentes aux faibles altitudes par temps chaud.

15.4.103 L'altitude-densité, plus que tout autre facteur, perturbe les performances opérationnelles de l'hélicoptère. La plupart des courbes et des calculs de performance fournis dans les manuels des giravions sont basés sur les effets de l'altitude-densité sur les performances en vol stationnaire. Par exemple, lorsque l'altitude-densité augmente, la puissance requise en vol stationnaire augmente. Dans l'air de faible densité de l'altitude-densité plus élevée, l'angle d'attaque des pales est augmenté, avec une augmentation de la traînée, pour fournir la même portance qu'aux altitudes plus basses. Les changements d'altitude-densité ont une incidence sur les diagrammes hauteur-vitesse. À mesure que l'altitude-densité augmente, la hauteur minimale de croisière augmente et la vitesse minimale augmente à la cassure de la courbe.

15.4.104 La puissance de sortie du moteur diminue avec l'augmentation de l'altitude-densité. Tous les moteurs atteignent une altitude au-dessus de laquelle la puissance développée commence à diminuer. La puissance développée par un moteur à pistons qui n'est pas suralimenté diminue avec l'augmentation de l'altitude au-dessus du niveau de la mer. La puissance développée par un moteur à pistons suralimenté se maintient jusqu'à une certaine altitude au-dessus de niveau de la mer puis diminue au-dessus de cette altitude. Un moteur à turbine détaré type développe la même puissance du niveau de la mer jusqu'à une altitude plus élevée que celle d'un moteur à pistons suralimenté, mais il atteint lui aussi une altitude au-dessus de laquelle la puissance développée décroît. À de très hautes altitudes-densité, l'application maximale des gaz sur un hélicoptère, quel qu'il soit, peut ne pas produire 100 % du régime rotor normal (Figure III-15-5).

15.4.105 Dans l'air de faible densité des hautes altitudes-densité, les pales du rotor principal doivent présenter un angle d'attaque plus élevé pour produire la même portance qu'au niveau de la mer. Avec l'augmentation de l'angle d'attaque, le flux induit au-dessus du disque rotor est plus élevé et la vitesse de déflexion vers le bas augmente.

15.4.106 La pression partielle des altitudes-densité plus élevées aura une incidence sur les systèmes. Par exemple, il peut être nécessaire d'utiliser des pompes de gavage carburant à certaines altitudes-densité pour assurer une pression suffisante à la pompe carburant entraînée par le moteur.

15.4.107 L'augmentation de l'altitude-densité exige de réduire le poids brut.

15.4.108 La hauteur maximale du vol stationnaire dans l'effet de sol diminue avec l'augmentation de l'altitude-densité. L'hélicoptère peut atteindre une altitude-densité où le vol stationnaire dans l'effet de sol et la montée verticale après le décollage peuvent être impossibles.

15.4.109 À des altitudes-densité élevées, les rotors de queue requièrent plus de puissance pour augmenter l'angle d'attaque et produire une poussée suffisante pour compenser le couple du rotor principal. Dans certains hélicoptères, la demande supplémentaire de puissance du rotor de queue avec l'augmentation de l'altitude-densité a des incidences sur les performances. Durant les opérations en haute altitude-densité, l'anticouple maximal produit par le rotor de queue en vol stationnaire peut ne pas être suffisant pour compenser le couple du rotor principal même si le poids brut est en-deçà des limites. Certains hélicoptères ont une altitude-densité maximale établie sur la base des capacités de son système anticouple.

Effet de sol

15.4.110 L'effet de sol applicable à l'hélicoptère est semblable à celui qui s'applique aux aéronefs à voilure fixe. Un hélicoptère qui vole en stationnaire dans l'effet de sol (DES) à environ un diamètre de disque rotor ou moins au-dessus de la surface produit plus de portance et requiert moins de puissance pour le même poids que lorsqu'il vole en stationnaire hors effet de sol (HES). Dans le vol stationnaire DES, la vitesse verticale de la déflexion induite cesse et le flux induit au disque rotor diminue (Figure III-15-6). L'angle d'attaque des pales augmente avec une augmentation correspondante de la portance. L'effet de sol permet la production de portance sur une partie plus grande de la pale en réduisant la production de tourbillons à l'extrémité de la pale.

15.4.111 Au-dessus d'un diamètre de disque rotor, sans vitesse vers l'avant, le flux d'air induit n'est plus restreint et les tourbillons aux extrémités des pales augmentent. La traînée augmente, ce qui signifie un angle de pas plus grand et il faut plus de puissance en vol stationnaire HES pour que l'air traverse le rotor vers le bas. La puissance requise en vol stationnaire HES est supérieure à celle qui est requise en vol stationnaire DES.

15.4.112 Au décollage à partir d'un vol stationnaire DES, à mesure que la vitesse anémométrique commence à augmenter, les avantages de l'effet de sol diminuent jusqu'à ce que la vitesse de portance de translation efficace (ETL) soit atteinte. La puissance requise pour passer du vol stationnaire à l'ETL augmente pour maintenir la même capacité de portance et la même hauteur au-dessus de la surface. Une fois que l'ETL est atteinte, la puissance requise diminue rapidement jusqu'à la valeur de la puissance de montée. Contrairement au phénomène d'effet de sol des aéronefs à voilure fixe, l'effet de sol des hélicoptères disparaît à une vitesse relativement basse après l'ETL.

15.4.113 L'effet de sol est à son maximum sur une surface ferme et lisse lorsqu'il n'y a pas de vent. Les hautes herbes, un terrain difficile, les revêtements, la proximité des bâtiments et les plans d'eau modifient l'écoulement du flux d'air, entraînant une recirculation et l'augmentation des tourbillons à l'extrémité du rotor.

15.4.114 On peut trouver des surfaces irrégulières lors de vols effectués pour les opérations de transport de charges extérieures, d'exploitation forestière ou d'hélicoptère, ou de vols à partir de plateformes, d'immeubles, de crêtes, de cols, de terrains en pente et d'espaces exigus. Lors des approches ou des vols stationnaires au-dessus d'une surface irrégulière, il est possible qu'une partie du disque rotor soit dans l'effet de sol et le reste hors effet de sol, ce qui produit un moment de tangage ou de roulis dans l'hélicoptère en raison de la production non symétrique de poussée du rotor sur tout le disque rotor.

Graphiques des performances

15.4.115 Les performances des hélicoptères sont basées sur leur capacité ou non de voler en stationnaire. Le vol en stationnaire exige plus de puissance que tout autre régime de vol. Le vol en stationnaire est considérablement influencé par l'altitude-densité. Dans l'élaboration des graphiques des performances, les hélicoptéristes posent certaines hypothèses sur l'état de l'hélicoptère et sur les aptitudes du pilote. Il est supposé que l'hélicoptère est en bon état de fonctionnement. Les performances des moteurs sont basées sur le moteur de spécifications de performances minimales installé à moins qu'une dépréciation normale des performances du moteur ne soit approuvée. Il est supposé que le pilote suit les procédures d'exploitation normales et qu'il a des compétences de pilotage moyennes, c'est-à-dire qu'il est capable d'exécuter correctement toutes les tâches requises au moment approprié. Les hélicoptéristes ne testent pas l'hélicoptère dans toutes les conditions indiquées sur le graphique des performances ; les valeurs qui ne sont pas testées sont déterminées par calcul. Même s'ils tiennent compte des effets de l'utilisation de l'hélicoptère, tels que la saleté des pales ou l'usure des paliers, les hélicoptéristes ne sont pas tenus d'inclure des facteurs de sécurité dans les données de performance. Cependant, l'autorité de certification est responsable d'effectuer des essais périodiques pour vérifier l'adéquation des données de performance.

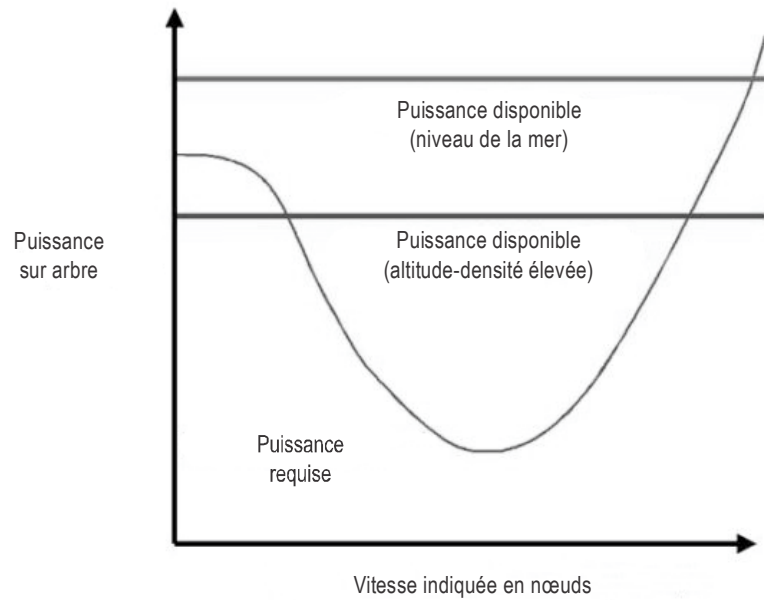


Figure III-15-5. Puissance disponible et puissance requise

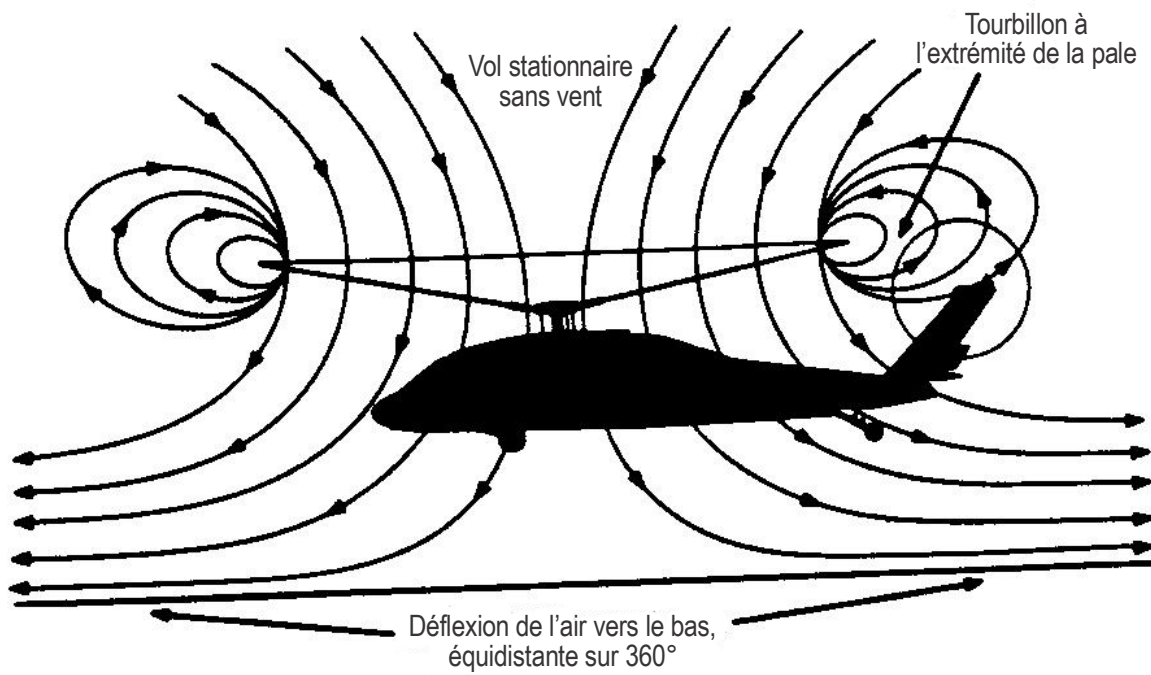


Figure III-15-6. Vol stationnaire dans l'effet de sol

15.4.116 Chaque manuel de vol de giravion est différent et contient des renseignements qui s'appliquent spécifiquement à un hélicoptère donné, à l'équipement qui y est installé et à sa masse et son centrage. La section qui traite des limites comprend les limites imposées par la réglementation et toute limite que l'hélicoptériste estime nécessaire pour assurer la sécurité des vols. Certains graphiques de performances qui figurent dans la section des données de performance peuvent représenter des limites si la section des limites d'emploi contient un renvoi indiquant qu'il s'agit de limites.

15.4.117 Les limites de poids figurent dans la section des limites d'emploi. Dans le cas de poids qui varient avec l'altitude, la température et d'autres variables, les graphiques figurent normalement dans la section des données de performance et ils représentent des limites si la section des limites d'emploi contient un renvoi à cet effet. De même les graphiques sur les centres de gravité qui figurent dans la section des données de performance peuvent représenter des limites si la section des limites d'emploi contient un renvoi à cet effet.

15.4.118 La section des données de performance comprend tous les renseignements requis par la réglementation et tout renseignement supplémentaire que l'hélicoptériste estime nécessaire pour renforcer la sécurité. Les graphiques qui figurent généralement dans la section des données de performance peuvent être utiles durant l'enquête :

- a) graphiques de vérification de puissance ;
- b) information sur le vol stationnaire : performances en vol stationnaire DES et HES pour un hélicoptère monomoteur et/ou multimoteur, et comprend les effets du vent relatif ;
- c) performances de décollage et d'atterrissage : profils de décollage et d'atterrissage, courbes hauteur-vitesse, vitesses d'autorotation, décollage et atterrissage pour franchir des obstacles de 15 m (50 ft) et toute autre donnée applicable à l'hélicoptère ;
- d) étalonnage de la vitesse anémométrique ;
- e) le diagramme hauteur-vitesse donne des informations pour les hélicoptères de catégorie B de 9 072 kg (20 000 lb) ou moins, dont le nombre de sièges passagers est égal ou inférieur à 9. Cependant, le diagramme hauteur-vitesse est une limite pour les hélicoptères de catégorie A et ceux de catégorie B dont le nombre de sièges passages est égal ou supérieur à 10. Pour les hélicoptères de catégorie A, le diagramme hauteur-vitesse de la section des limites d'emploi est facultatif si les procédures et les profils qui figurent dans la section des procédures normales ou la section des données de performance donnent des renseignements similaires à ceux du diagramme hauteur-vitesse et si la section des limites d'emploi contient des renvois indiquant qu'il s'agit de prescriptions obligatoires.

15.4.119 Le supplément sur l'équipement opérationnel peut modifier les limites, les procédures (normales et d'urgence) et les caractéristiques de performance de l'hélicoptère de base. Ce supplément contient souvent des renseignements qui ne concordent peut-être pas si deux ou plusieurs ensembles d'équipement optionnels ont été installés sur l'hélicoptère de base.

15.4.120 Les données de performance présentées dans la section des données de l'hélicoptériste, ou des données non approuvées, ne doivent pas excéder les limites opérationnelles. Par exemple, si les limites de poids, altitude, température (WAT) applicables à l'aire de décollage et d'atterrissage sont fondées sur des performances en effet de sol à une hauteur de patins de 1,5 m (5 ft) au-dessus du sol, les données de performance de vol stationnaire à une hauteur de patins de 0,9 m (3 ft) au-dessus du sol permettant une augmentation des poids en vol stationnaire ne doivent pas être présentées dans la section des données de l'hélicoptériste à moins qu'il ne soit clairement indiqué que ces données excèdent les limites d'exploitation normales.

15.4.121 Les données de poids et centrage, par rapport au poids et chargement, figurent dans une section distincte, qui comprend des tableaux sur l'équipage, les passagers, le carburant et l'huile, le fret et d'autres tableaux de chargement applicables à l'hélicoptère.

15.4.122 Les performances des giravions peuvent varier considérablement sur de courts vols en raison des grands changements de poids, d'altitude-densité et de conditions de vol stationnaire, ce qui peut demander des calculs supplémentaires de performance du rotor lorsque les conditions des missions changent. Des dossiers tels que les changements de profils de missions et les calculs des performances sont essentiels pour assurer la sécurité des vols et doivent être pris en compte dans les enquêtes sur les accidents.

Portance de translation efficace

15.4.123 Du point de vue opérationnel, la portance de translation est la portance additionnelle (ou poussée rotor) obtenue, au même réglage de puissance, d'une meilleure efficacité du système rotor lorsque la vitesse anémométrique dépasse les 12 à 16 kt.

15.4.124 En vol stationnaire stable, sans vent et avec seulement une composante verticale du flux d'air traversant les pales du rotor, un hélicoptère ne produit pas de portance de translation. On peut le visualiser comme un hélicoptère en équilibre sur une bulle d'air. La portance de translation commence avec un flux d'air horizontal traversant le rotor. À des vitesses très faibles, le pilote ne peut pratiquement pas détecter la portance de translation. À des vitesses d'environ 5 à 7 kt, les tourbillons à l'avant de l'hélicoptère se déplacent vers l'intérieur sous l'extrémité de la pale du rotor. L'air des tourbillons traverse le rotor avec une composante vers le bas. Sans modification du pas collectif, ou de la puissance, le rotor ne produit pas autant de vitesse induite et ne produit donc pas autant de portance qu'il en produisait en vol stationnaire. L'hélicoptère s'enfonce légèrement. À mesure que la vitesse augmente de 12 à 15 kt, la portance de translation se fait sentir par une vibration et un tremblement de la cellule. À cette vitesse, le rotor sort des tourbillons et entre dans une zone d'air relativement calme. Le changement d'écoulement d'air à travers le rotor vers l'horizontale augmente l'angle d'attaque et la portance des pales. L'hélicoptère a atteint une vitesse appelée portance de translation efficace. Le nez tend à cabrer. Sans application du cyclique, l'hélicoptère commence à monter, d'où le terme portance de translation. En air calme, l'efficacité du rotor de queue s'améliore et la poussée augmente ; l'hélicoptère est animé d'un mouvement de lacet vers la gauche et a une tendance à la translation causée par la poussée du rotor de queue au-dessus du centre de gravité qui incline l'hélicoptère vers la droite dans un système rotor tournant dans le sens antihoraire. Si le décollage continue à l'horizontale, le pilote peut progressivement réduire la puissance jusqu'à ce que l'hélicoptère atteigne une vitesse d'environ 50 à 60 kt. Au-delà de cette vitesse, la traînée parasite est supérieure à la portance de translation efficace et il faut augmenter le collectif pour obtenir des vitesses supérieures.

15.4.125 Durant une approche avec mise en vol stationnaire ou atterrissage roulé, l'hélicoptère vole d'abord en air calme puis atteint une vitesse d'environ 16 à 12 kt ; l'hélicoptère entre alors dans ses tourbillons et perd la portance de translation. À ce point, la vitesse descendionnelle de l'hélicoptère augmente à moins que la puissance ne soit augmentée pour compenser la perte de portance de translation. Il faut augmenter la poussée du rotor de queue pour compenser le vol en air perturbé et l'augmentation de la poussée du rotor principal.

15.4.126 Même si le vent est un facteur important dans la portance de translation, le vol en conditions de vent défavorables peut changer rapidement et de manière imprévisible les valeurs de portance de translation, notamment dans les vols en région montagneuse ou près d'obstacles. L'hélicoptère peut rencontrer des courants descendants juste au moment où la puissance est augmentée pour compenser la perte de portance de translation. Dans les opérations à basse vitesse anémométrique à l'atterrissage ou au décollage du côté sous le vent d'une montagne, l'hélicoptère peut traverser une limite horizontale de cisaillement ou une inversion thermique, réduisant considérablement la portance de translation.

Un moteur hors de fonctionnement

15.4.127 Si un hélicoptère multimoteur subit une défaillance de moteur dans une phase critique du vol, le premier facteur déterminant dans la réussite de l'atterrissage est la quantité de puissance excédentaire disponible dans l'autre ou les autres moteurs. L'hélicoptère est particulièrement vulnérable aux puissances élevées, par exemple, durant le vol stationnaire ou à l'application de puissance pour le décollage et l'atterrissage. Les facteurs contributifs sont notamment le poids et le centre de gravité de l'hélicoptère et l'altitude-densité.

15.4.128 Les hélicoptères multimoteurs peuvent être de catégorie A ou B. Pour les hélicoptères de catégorie A, le concept d'un moteur hors de fonctionnement (OEI) limite le poids au décollage de l'hélicoptère de sorte qu'il peut exécuter un atterrissage en sécurité si une défaillance de moteur se produit au point de décision au décollage (TDP) ou avant, ou qu'il peut continuer le décollage si la défaillance du moteur se produit au TDP ou après.

15.4.129 L'utilisation du TDP est analogue au V1 dans les aéronefs de transport. Avant le TDP, le pilote est en mode « arrêt » vu que l'hélicoptère n'a pas encore assez d'énergie pour poursuivre le vol. Au TDP, le pilote est en mode « départ » et s'il se produit une défaillance de moteur à ce point ou après, le décollage doit être poursuivi parce qu'il n'y a plus de surface suffisante pour interrompre le décollage. Le régime d'urgence du moteur en bon état doit être utilisé pendant toute la durée autorisée.

15.4.130 Les anciens systèmes de commande de moteur sur les hélicoptères mutiturbines ont des régimes moteur d'urgence en cas d'OEI qui ne sont pas de beaucoup supérieurs à ceux de l'exploitation bimoteur. Les systèmes FADEC ont grandement amélioré les performances des régimes d'urgence en cas d'OEI. Dans le cas des systèmes non FADEC, les limites du moteur pour l'OEI sont de 30 min et de 2,5 min. Les moteurs FADEC ont normalement des régimes d'urgence de 30 s et de 2 min. Les systèmes FADEC comportent normalement un sélecteur de mode formation qui permet de réduire artificiellement les limites du « bon » moteur pour pouvoir effectuer la formation OEI. L'ordinateur FADEC devrait automatiquement prendre la priorité sur le mode formation s'il détecte une défaillance du « bon » moteur.

15.4.131 Les limites du système carburant et d'autres limites peuvent empêcher le moteur d'atteindre le régime OEI lorsqu'il est demandé. Normalement, les commandes électroniques peuvent détecter la défaillance du moteur et augmenter automatiquement les limites d'exploitation de « normal » à « limites OEI ».

15.4.132 Le point de décision à l'atterrissage (LDP) est le point à partir duquel l'hélicoptère doit atterrir. Si un hélicoptère multimoteur subit une défaillance de moteur avant le LDP, le pilote a le choix de continuer l'approche ou d'amorcer un atterrissage interrompu. Après le LDP, l'hélicoptère n'a plus l'énergie suffisante pour assurer la transition à l'atterrissage interrompu sans prendre contact avec la surface et doit atterrir. L'atterrissage interrompu ne s'applique pas aux hélicoptères de catégorie B.

15.4.133 L'utilisation de la puissance totale disponible de tous les moteurs en fonctionnement (AEO) au décollage n'est pas normalement possible en raison de facteurs tels que les contraintes imposées par la hauteur-vitesse.

15.4.134 Les données de décollage et d'atterrissage dans la section des données de performance du manuel de vol du giravion ont été établies pour des opérations sur des surfaces lisses, sèches, dures et planes. En outre, les données OEI ont été établies sans le fonctionnement de circuits de prélèvement d'air tels que le chauffage de la cabine ou le dégivrage du pare-brise.

15.4.135 Le concept de l'utilisation limitée du régime OEI part du principe que la puissance OEI doit être disponible en cas de nécessité. Son succès dépend fortement de la validité de la base de données, de la maintenance des moteurs, des systèmes de détection et d'indication et du soin apporté aux vérifications de puissance. Les moteurs munis du système FADEC peuvent assurer la surveillance continue des tendances.

15.4.136 Les vérifications périodiques classiques de puissance et de rendement maximal ne sont pas pratiques dans le cadre du concept de régime à utilisation limitée en raison de la diminution rapide de durée de vie utile durant l'exposition aux régimes et aux températures de moteurs applicables aux régimes à utilisation limitée.

15.4.137 Si l'hélicoptère descend trop bas durant la poursuite d'un décollage ou durant un atterrissage interrompu, il est possible qu'il soit incapable d'exécuter un arrondi en cas de nécessité.

15.4.138 Un centre de gravité déplacé vers l'arrière peut restreindre la visibilité vers l'avant au-dessus du nez. Un centre de gravité déplacé vers l'avant peut avoir une incidence sur les performances de montée.

15.4.139 La technique employée durant le décollage peut grandement contribuer au succès d'une opération OEI. Une sous-rotation ou une surrotation au moment d'amorcer le décollage et une surapplication ou sous-application de puissance au décollage peut empêcher d'atteindre les vitesses et altitudes essentielles à la réussite de l'opération OEI.

Perte d'efficacité du rotor de queue

15.4.140 La perte d'efficacité du rotor de queue (LTE), ou lacet imprévu, est une caractéristique critique de vol aérodynamique basse vitesse qui peut conduire à un lacet rapide non commandé qui ne s'arrête pas seul et qui, s'il n'est pas corrigé, peut conduire à la perte de contrôle de l'hélicoptère. La LTE n'est pas liée au dysfonctionnement d'un équipement ou à une mauvaise maintenance et peut se produire dans tous les hélicoptères monorotors munis d'un rotor de queue. Le rotor de queue ne décroche pas, mais il devient inefficace et ne peut plus produire la poussée suffisante pour arrêter le lacet. Même si d'autres facteurs ont une incidence sur la LTE, elle est généralement causée par les effets de certaines directions du vent à des vitesses inférieures à 30 kt ou par des vitesses angulaires de lacet excessives. La poussée requise du rotor de queue augmente avec l'augmentation du poids brut et de l'altitude-densité. À de hautes altitudes-densité, le plafond de vol stationnaire peut être limité par la marge de poussée du rotor de queue et pas nécessairement par la puissance disponible. Ces conditions peuvent aussi se produire durant le transport de charges extérieures. Si la charge est excessive, le régime du rotor principal peut diminuer ou l'efficacité de l'anticouple du rotor de queue peut être dépassée, conduisant à un lacet incontrôlable.

15.4.141 Durant la conception, le rotor de queue est dimensionné pour équilibrer le couple du rotor principal et pour assurer une stabilité directionnelle. Il est testé pour donner une marge suffisante de commande de lacet pour les manœuvres de vol et pour compenser les effets du vent ambiant. La LTE se produit vers la droite dans les hélicoptères monorotors munis d'un rotor principal tournant dans le sens antihoraire et d'un rotor de queue.

15.4.142 Les essais de certification partent du principe que le pilote connaît l'azimut critique du vent et qu'il maintient le contrôle de l'hélicoptère en évitant le développement de vitesses de lacet excessives.

15.4.143 *Effet du vent.* Lorsque le vent frappe le nez de l'hélicoptère en vol stationnaire ou à un vol à des vitesses inférieures à 30 kt, le fuselage et le stabilisateur vertical tendent à se mettre dans le lit du vent et à maintenir le nez de l'hélicoptère face au vent. Si le vent vient de côté, l'hélicoptère tend à s'orienter face au vent. La poussée requise du rotor de queue varie selon le côté de l'hélicoptère frappé par le vent. Dans le cas d'un hélicoptère dont le rotor principal tourne dans le sens antihoraire, le vent qui vient du côté gauche réduit l'efficacité du rotor de queue et crée une tendance au lacet vers la droite.

- a) Vents relatifs de 120 à 240° : l'hélicoptère essaie de se mettre nez face au vent relatif.
- b) Vents relatifs de 210 à 330° : causent le développement de l'état de vortex du rotor de queue. Le flux d'air traversant le rotor de queue est instable et non uniforme et crée des variations de poussée.
- c) Vents relatifs de 285 à 315° : le vent relatif souffle le vortex du rotor principal dans le rotor de queue, créant une turbulence extrême.

15.4.144 Facteurs ayant une incidence sur l'ampleur de la LTE :

- a) *Poids brut et altitude-densité.* Une augmentation de l'un ou de l'autre réduit la marge entre la puissance maximale disponible et la puissance requise pour le vol stationnaire ;
- b) *Faible vitesse indiquée.* À 30 kt et au-dessous, le rotor de queue doit produire presque 100 % du contrôle directionnel. En outre, à des vitesses anémométriques inférieures à la portance de translation efficace, l'hélicoptère exige une augmentation sensible du collectif/de la poussée pour se maintenir à une hauteur au-dessus de la surface, ce qui réduit la marge entre la puissance maximale disponible et la puissance requise pour le vol stationnaire ;
- c) *Hauteur du vol stationnaire.* Le vol stationnaire hors effet de sol exige plus de puissance et de couple, ce qui réduit la marge entre la puissance maximale disponible et la puissance requise pour le vol stationnaire ;
- d) *Affaiblissement du régime du rotor principal.* Une application rapide de puissance peut causer un affaiblissement transitoire. Toute diminution du régime du rotor principal entraîne une réduction correspondante du régime et de la poussée du rotor de queue.

15.4.145 Les opérations vent arrière contribuent à la LTE. Un vent arrière qui tourne vers la droite avec un rotor tournant dans le sens antihoraire à faible vitesse peut entraîner un lacet imprévu vers la droite, conduisant à la LTE. L'augmentation soudaine de la demande de portance/couple lors de la perte de portance de translation durant une approche par vent arrière, particulièrement à un poids brut et à une altitude-densité élevés, peut dépasser la puissance anticouple disponible du rotor de queue.

15.4.146 S'il est nécessaire d'appliquer fortement la pédale anticouple et de la maintenir durant une phase de vol telle que le vol stationnaire HES avec une charge extérieure, il peut ne pas rester suffisamment de débattement de la pédale anticouple pour contrer un lacet imprévu.

15.4.147 Une procédure recommandée pour contrôler la LTE consiste à réduire le collectif pour réduire le couple. Cette procédure peut causer une augmentation de la vitesse descensionnelle et un contact accidentel avec la surface. S'il est impossible de reprendre le contrôle, et si l'altitude le permet, la meilleure solution peut être une autorotation.

15.4.148 La disponibilité de la poussée du rotor de queue peut être limitée par un mauvais réglage du rotor de queue.

Chapitre 16

ENQUÊTE SUR LES FACTEURS HUMAINS

16.1 GÉNÉRALITÉS

16.1.1 Le présent chapitre du Manuel se veut un guide général pour l'enquête sur la contribution humaine aux accidents d'aviation. Conformément à la Circulaire 240, *Facteurs humains, Étude n° 7, Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents*, il préconise l'adoption d'une approche systémique des enquêtes. Que l'enquête soit menée par un seul enquêteur ou par une équipe d'enquêteurs, l'approche systémique permet de s'assurer que l'enquête sur les facteurs humains est intégrée à l'enquête générale, c'est-à-dire qu'on lui accorde suffisamment de temps et de ressources et qu'elle n'est pas reléguée au rang d'activité secondaire. Pour l'enquêteur seul, comme pour l'équipe d'enquête, l'application de cette méthode permet de mener une enquête plus efficace et plus complète.

Objectif

16.1.2 L'objectif de l'enquête sur les facteurs humains dans les accidents d'aviation est de rehausser la sécurité de l'aviation :

- a) en déterminant comment l'erreur humaine a pu causer l'accident ou y contribuer ;
- b) en identifiant les dangers pour la sécurité en fonction des limites des performances humaines ;
- c) en formulant des recommandations visant à éliminer ou à réduire les conséquences d'interventions erronées ou de mauvaises décisions de personnes ou de groupes liés à l'accident.

Portée

16.1.3 Pour atteindre cet objectif, la collecte et l'analyse des données sur les facteurs humains doivent être aussi méthodiques et complètes que celles de tout autre domaine de l'enquête, ce qui signifie que l'enquête doit aller plus loin que l'examen des actions de l'équipage de conduite et inclure l'analyse des personnes ou des groupes impliqués dans l'accident, qu'il s'agisse de l'encadrement, de l'organisme de réglementation ou du constructeur.

16.1.4 Dans un système de transport complexe, interactif et bien protégé comme celui de l'industrie aéronautique, les accidents sont rarement causés uniquement par l'action ou l'inaction des intervenants directs : ils sont le résultat de l'interaction d'une série de facteurs latents déjà présents dans le système. Dans presque tous les aspects d'une enquête, des décisions de la direction et des superviseurs jusqu'aux activités de maintenance et à la performance des pilotes, il est possible d'identifier des facteurs de performances humaines qui peuvent aider à expliquer la chaîne d'événements qui a mené à l'accident. Une enquête qui n'est axée que sur les intervenants directs crée une barrière qui empêche d'identifier les dangers systémiques pour la sécurité et de saisir l'occasion d'éliminer ou de réduire les conséquences de ces dangers en formulant des recommandations.

Aperçu

16.1.5 Le présent chapitre donne des indications sur la manière d'intégrer l'enquête sur les facteurs humains à l'enquête générale. Ces indications s'appliquent autant à une enquête menée par un seul enquêteur chargé de tous les aspects de l'enquête qu'à une enquête menée par un ou plusieurs enquêteurs affectés exclusivement à l'examen des facteurs humains.

16.2 APPROCHE SYSTÉMIQUE DE L'ENQUÊTE SUR LES FACTEURS HUMAINS

Cadres des facteurs humains

16.2.1 En général, les données à recueillir sur les facteurs humains entrent dans deux catégories : l'information qui permettra aux enquêteurs de reconstituer chronologiquement et en détail chaque événement important qui s'est produit avant et, s'il y a lieu, après l'accident (cette chronologie doit surtout porter sur les comportements et sur leurs incidences sur l'enchaînement des événements de l'accident), et l'information contextuelle qui permettra aux enquêteurs d'expliquer les raisons de ces comportements.

16.2.2 L'élément humain peut contribuer aux accidents de trois manières. La première consiste à contribuer directement à l'accident en posant un geste dangereux : il s'agit généralement d'une défaillance active d'un intervenant sur les lieux de l'accident et elle est souvent désignée par « une erreur de l'opérateur, de l'utilisateur ou du pilote ». La deuxième, qui est aussi la conséquence d'une intervention directe, est le fait d'être le récepteur ou l'utilisateur de conditions dangereuses. La troisième est le fait de contribuer indirectement à des actions ou à des conditions dangereuses par le biais d'un acte dangereux ou d'une défaillance latente préalable. Cette troisième forme de contribution met en évidence les relations et les liens entre les actions et les conditions dangereuses et, par conséquent, souligne la nécessité de tenir compte de plusieurs couches de causes sous-jacentes et de facteurs contributifs.

16.2.3 Les paragraphes qui suivent décrivent quatre cadres [modèle SHEL, modèle d'enchaînement causal de Reason, conditions dangereuses latentes (LUC), et comportement et erreur], qui aideront l'enquêteur à recueillir et à analyser les données pertinentes sur l'accident et à déterminer les diverses couches des causes sous-jacentes et des facteurs contributifs. La description des quatre cadres est suivie d'une description d'un outil d'enquête, le processus intégré d'enquête sur les facteurs humains, qui incorpore les quatre cadres dans un processus d'enquête pas à pas.

Modèle SHEL

16.2.4 Le modèle SHEL (Figure III-16-1), conçu par Edwards (1972) et modifié par Hawkins (1987), présente une méthode systématique de collecte des données. Chaque élément du modèle SHEL (acronyme de *software*, *hardware*, *environment and liveware*), soit l'information, le matériel, l'environnement et l'être humain, représente un des éléments fondamentaux des études sur les facteurs humains.

16.2.5 L'être humain se trouve au centre du modèle et constitue l'élément le plus crucial et le plus souple. Cet élément représente n'importe quelle personne qui participe au déroulement du vol et il ne doit donc pas se limiter à l'équipage de conduite. Chaque personne représentée par cet élément central apporte ses limites et ses forces, qu'elles soient physiques, physiologiques, psychologiques ou psychosociales.

16.2.6 L'élément central, l'humain, n'agit pas de façon isolée: il a des interactions avec chacun des autres éléments. Les bords de ce bloc ne sont pas simples et rectilignes et il faut donc que les autres blocs s'y engrènent soigneusement pour éviter les tensions et, à la longue, une rupture (un accident). L'enquête sur les facteurs humains doit localiser les désajustements qui ont contribué à l'événement ; les données recueillies au cours de l'enquête devraient donc permettre d'examiner et d'analyser en profondeur chaque élément du modèle SHEL et ses interactions avec l'élément central.

- a) *Humain-matériel (humain-machine)*. Cette interaction comprend les interactions physiques ou mentales entre l'humain et la machine, les limites de conception et les particularités de la configuration du poste de travail.
- b) *Humain-information (humain-système)*. Cette interaction concerne la nature du transfert d'information entre l'humain et les systèmes de soutien tels que les listes de vérifications, les manuels, la formation, les procédures et les règlements.
- c) *Humain-environnement*. Cette interaction se divise en deux domaines :
 - 1) Interne : confort personnel et conditions de travail.
 - 2) Externe : conditions météorologiques, environnement aéroportuaire et infrastructure.
- d) *Humain-humain* (entre personnes). Cette interaction explore la nature des ruptures dans les interactions et les communications entre personnes.

Note.— Les § 16.3.4 et 16.3.5 donnent des directives sur la collecte des données sur les facteurs humains afin de faciliter l'utilisation du modèle SHEL.

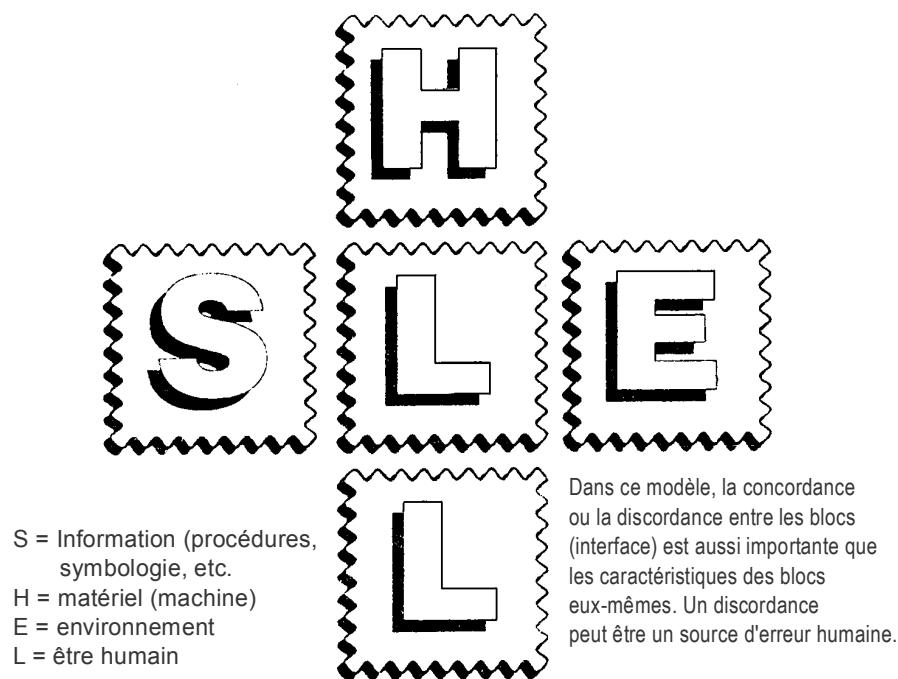


Figure III-16-1. Modèle SHEL (adapté de Hawkins, 1975)

Modèle d'enchaînement causal de Reason

16.2.7 James Reason a proposé (1990) un cadre qui explique comment les humains contribuent à perturber des systèmes complexes, interactifs et bien protégés comme celui de l'industrie aéronautique. Dans ce système, les accidents sont rarement causés uniquement par les défaillances actives ou des actions dangereuses des intervenants directs. Selon le modèle de Reason, les accidents sont le résultat de l'interaction d'une série de défauts, ou défaillances latentes, déjà présents dans le système (Figure III-16-2).

16.2.8 Les deux types de défaillances, actives et latentes, dépendent du caractère plus ou moins immédiat de leurs conséquences. Une défaillance active est une erreur ou une infraction qui entraîne des effets néfastes immédiats. Elle est généralement imputable à l'intervenant direct, par exemple, un pilote qui actionne le levier de commande du train d'atterrissage au lieu du levier de commande des volets. Une défaillance latente est le résultat d'une décision ou d'une mesure prise longtemps avant que l'accident survienne et dont les conséquences négatives peuvent prendre beaucoup de temps à se manifester. Elle se produit généralement au niveau des décideurs, de l'organisme de réglementation ou de l'encadrement, c'est-à-dire au niveau de personnes éloignées de l'événement dans le temps et dans l'espace. Il peut s'agir, par exemple, d'une décision de fusion de deux compagnies qui n'est pas assortie de formation pour uniformiser les procédures d'exploitation. Elle peut aussi être introduite à n'importe quel niveau du système par l'état de l'être humain, par exemple des politiques qui conduisent à un manque de motivation ou à la fatigue, par exemple.

16.2.9 Les défaillances latentes, issues de décisions contestables ou de mesures inappropriées, même si elles ne sont pas dangereuses par elles-mêmes, peuvent se conjuguer pour ouvrir une «brèche» qui permet à une défaillance active provoquée par un pilote, un contrôleur de la circulation aérienne ou un mécanicien de briser toutes les défenses du système et d'aboutir à un accident. Les intervenants directs «héritent» des défauts du système. Ce sont eux qui font face à une situation dans laquelle les problèmes techniques, les conditions adverses ou leurs propres actions révéleront les défaillances latentes présentes dans le système. Dans un système bien protégé, les défaillances latentes et les défaillances actives interagissent, mais il est rare qu'elles brisent les défenses. Quand celles-ci sont efficaces, le résultat est un événement mineur, un incident tout au plus ; si elles ne le sont pas, il se produit un accident.

- a) *Décisions de la haute direction* : Les défaillances latentes comprennent notamment des décisions de la haute direction, des directeurs de services de compagnies aériennes ou des agents chargés de la réglementation. Lorsqu'elle affecte des ressources, la direction doit trouver un équilibre entre, notamment, la sécurité et les coûts. Ces objectifs peuvent entrer en conflit et donner lieu à de mauvaises décisions qui se répercuteront dans tout le système.
- b) *Carences de l'encadrement hiérarchique*. Les décisions des gestionnaires, même les mauvaises, doivent être mises en œuvre par le personnel d'encadrement par le biais de procédures d'exploitation normalisées (SOP), de programmes de formation, d'établissement des horaires des vols et des équipages, etc. S'il existe également des carences à ce niveau, elles renforceront le potentiel d'accident des décisions de la direction : par exemple, un agent technique d'exploitation qui a incorrectement évalué les conditions opérationnelles peut compromettre la sécurité en essayant de suivre une politique qui ne s'applique pas à la situation.
- c) *Existence de conditions préalables*. Si certaines caractéristiques ou conditions préalables, telles qu'un environnement improductif, des effectifs peu motivés ou en mauvaise santé, des machines en mauvais état de fonctionnement et des procédures mal établies, sont présentes dans le système, elles auront une incidence sur les actions de l'intervenant direct et deviendront une source d'actions dangereuses.
- d) *Défaillances latentes*. Les mauvaises décisions prises par la direction, les carences de l'encadrement hiérarchique et l'existence de conditions préalables au niveau de l'exécutant représentent les défaillances latentes du système.
- e) *Actions dangereuses*. Les actions dangereuses prennent différentes formes et, en raison des erreurs, ne peuvent jamais être complètement éliminées.
- f) *Défenses*. Dans un système complexe et bien gardé, ces défaillances latentes demeurent en dormance pendant longtemps sans incidence sensible sur la sécurité parce que des défenses très efficaces, comme les vérifications, les procédures ou les GPWS, permettent à un grand nombre de ces défauts d'être présents simultanément dans le système sans conséquences graves.

- g) *Conjoncture favorable.* La trajectoire d'un accident se dessine lorsque des actions dangereuses interagissent avec des défaillances latentes présentes dans le système et brisent toutes les défenses du système, créant ainsi une « conjoncture favorable » pour qu'un accident se produise.
- h) *Résumé.* De nombreux actes dangereux sont posés sans conséquences parce que les conditions existantes ne favorisent pas une interaction entre toutes les carences présentes dans le système. Par conséquent, les enquêteurs ne doivent pas seulement examiner les actions dangereuses exécutées par les intervenants directs, mais doivent aussi examiner les actions dangereuses et les défenses inadéquates ou supprimées, tout au long de la trajectoire de l'accident, jusqu'aux niveaux de la haute direction. La prise en compte des carences des niveaux supérieurs, en plus de celles qui sont étroitement liées aux actions dangereuses, permet à l'enquêteur de formuler des mesures préventives qui se répercuteront sur un grand ensemble d'événements.

Cadre des conditions dangereuses latentes (LUC)

16.2.10 Le cadre LUC est un prolongement du modèle de Reason qui met l'accent sur un moyen systématique d'examiner les facteurs personnels et organisationnels. Ce cadre comprend les éléments du modèle SHELL dans le concept de latence de Reason. Les LUC comprennent tous les facteurs latents du système de transport qui peuvent avoir des incidences préjudiciables sur la sécurité des opérations ou de la maintenance. Elles comprennent les facteurs latents au niveau personnel et au niveau organisationnel et s'appellent globalement les facteurs LUC. Il convient de noter que les événements comportent un élément de hasard, c'est-à-dire que les opérations peuvent être exécutées année après année dans les mêmes conditions dangereuses sans conséquences ; cependant, un jour quelconque, un élément supplémentaire de « malchance » vient s'ajouter à l'équation et la tragédie frappe.

16.2.11 Les LUC personnelles (facteurs P-LUC) comprennent des facteurs tels que l'état d'esprit de la personne, son bien-être physique, etc. ; ces facteurs peuvent avoir des incidences préjudiciables sur les opérations ou les activités de maintenance. Les LUC organisationnelles (facteurs O-LUC) sont les facteurs qui dépassent le cadre de la personne et qui risquent d'avoir des incidences négatives sur les performances personnelles ou des équipes dans les opérations ou les activités de maintenance.

Facteurs P-LUC

16.2.12 Les LUC personnelles s'appellent des facteurs P-LUC. Ces facteurs peuvent limiter ou dégrader les performances attendues d'une personne, ayant pour résultat un type quelconque d'erreur. Les incidences potentiellement préjudiciables des facteurs P-LUC peuvent être atténuées par la personne ou par l'organisation si elles sont décelées à temps. À part la collecte de faits au niveau de la personne, il peut être difficile pour le système de transport d'identifier les problèmes « personnels ». Cependant, le facteur P-LUC peut parfois être symptomatique d'un facteur O-LUC plus systémique, qui peut permettre de remédier à un problème plus large. Les facteurs P-LUC et O-LUC sont illustrés dans le cadre de Reason à la Figure III-16-3.

16.2.13 Les facteurs P-LUC sont parfois appelés facteurs physiques, physiologiques, psychologiques et psychosociaux. Des renseignements plus détaillés sur le type de renseignements à prendre en compte dans le cadre des facteurs P-LUC figurent à la rubrique *Directives de collecte des données*, §16.3.5, alinéa a), *L'être humain – l'individu*.

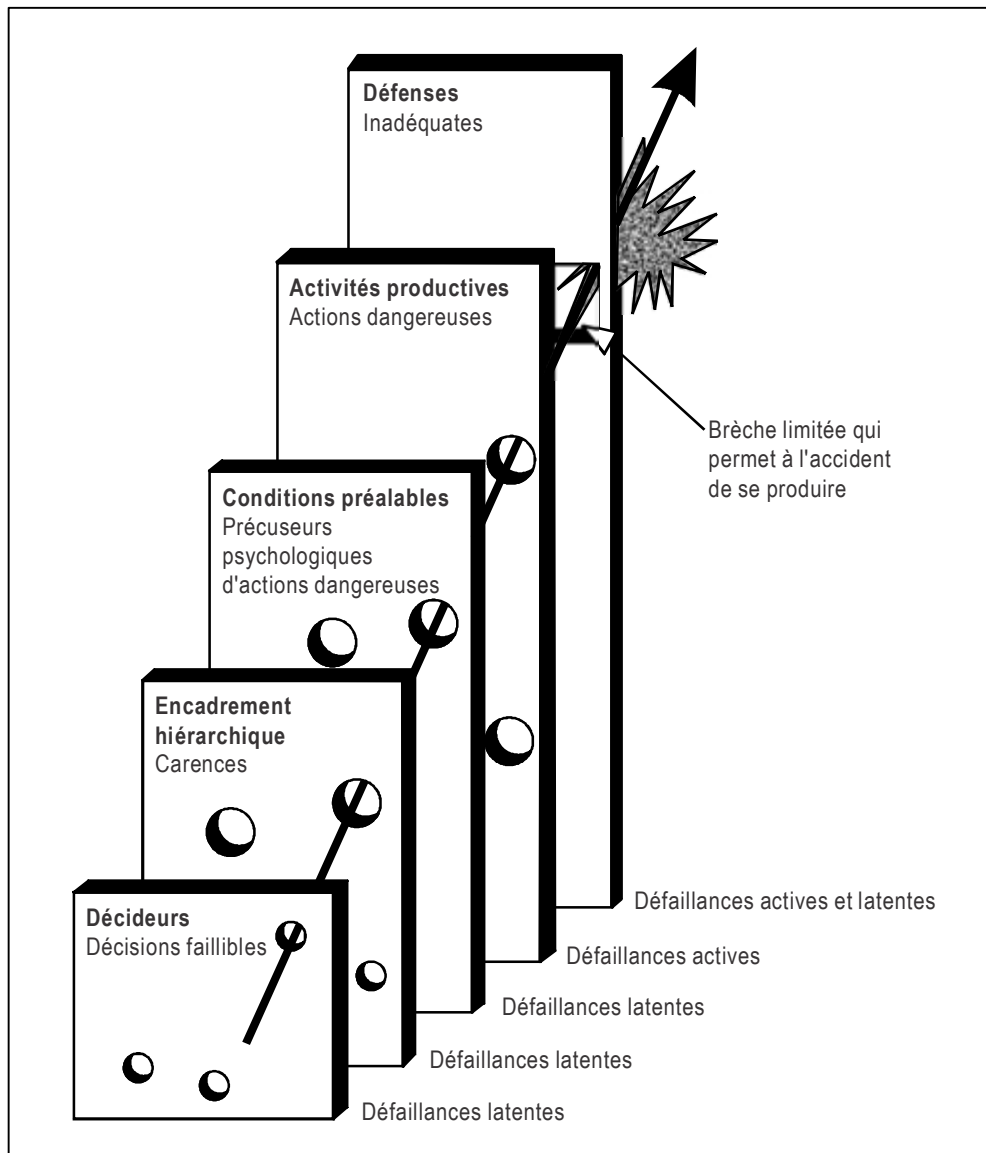


Figure III-16-2. Modèle de Reason

Facteurs O-LUC

16.2.14 Les LUC organisationnelles s'appellent des facteurs O-LUC. Les pratiques de la direction de la compagnie, le climat réglementaire et même les attitudes des employés, encouragées par les associations professionnelles, peuvent avoir des effets préjudiciables sur les performances humaines dans les opérations et les activités de maintenance. Les alinéas qui suivent indiquent quelques-uns des principaux facteurs O-LUC ; des renseignements plus détaillés sur le type de renseignements à prendre en compte dans le cadre de chacun de ces facteurs figurent à la rubrique *Directives de collecte des données*, §16.3.5, *Interface humain-humain*, *Interface humain-matériel*, etc.

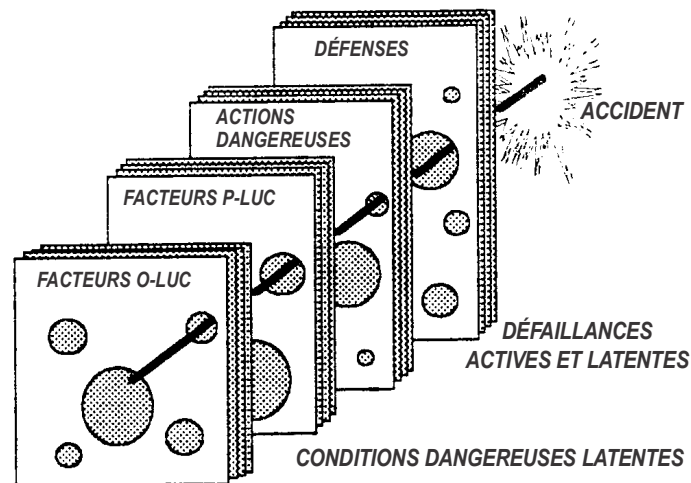


Figure III-16-3. LUC dans le cadre de Reason

a) Conception :

- 1) Mauvaise conception de l'équipement, notamment une mauvaise prise en compte des besoins en matière d'interface humain-machine pour éviter les erreurs.
- 2) Mauvaise conception des tâches, qui ne tient pas compte des interfaces du modèle SHEL.

b) Personnel :

- 1) Lacunes dans la sélection initiale (et continue) du personnel ayant les connaissances, les habiletés et l'attitude requises pour exécuter le travail de manière sûre et efficace.
- 2) Carences dans les connaissances et les habiletés dont ont besoin les employés pour exécuter leur travail en sécurité et qui découlent des lacunes dans la formation.
- 3) Pratiques d'établissement des horaires du personnel d'exploitation et de maintenance qui peuvent compromettre les performances personnelles ou des équipes.
- 4) Lacunes dans les programmes de suivi et de soutien du personnel mis en place pour veiller à ce que les employés maintiennent leur capacité d'exécuter les tâches qui leur sont confiées.
- 5) Pratiques de rémunération qui encouragent les employés à prendre des raccourcis.

c) Procédures et pratiques d'exploitation acceptées :

- 1) Procédures prescrites par la compagnie qui sont difficiles à suivre, ambiguës, incomplètes, erronées ou inaccessibles, ou absence de procédures.
- 2) Pratiques d'exploitation ou de maintenance acceptées qui sont différentes des procédures prescrites et créent des conditions qui peuvent conduire à des erreurs.

d) Communications :

- 1) Les informations nécessaires à la sécurité et à l'efficacité de l'exploitation et de la maintenance ne sont pas envoyées ou pas reçues, ou ne sont pas comprises par les destinataires ; les informations ne sont pas claires, elles sont ambiguës ou présentées sous une forme inintelligible.

e) Organisation :

- 1) Carences dans la philosophie et les politiques de l'organisation en matière d'exploitation, créant des conditions propices aux erreurs.
- 2) Objectifs organisationnels incompatibles, c'est-à-dire que les objectifs de production sont en conflit avec le maintien d'un environnement d'exploitation sûr.
- 3) Carences dans la structure de l'organisation ou dans sa façon de conduire les activités, qui entravent l'efficacité des communications entre la direction et l'exploitation ou la maintenance.
- 4) Carences dans le climat de sécurité de l'organisation qui fait que les responsabilités sont mal définies et que les signes avant-coureurs sont négligés.

f) Environnement de travail :

- 1) Conditions propices aux actions dangereuses ou aux erreurs en matière de sécurité en raison des conditions physiques du lieu de travail qui ont une incidence sur les performances des individus ou des équipes.

g) Réglementation :

- 1) Carences dans la réglementation qui gouverne l'exploitation et la maintenance en transport.
- 2) Carences dans la certification de l'équipement, du personnel et/ou des procédures.
- 3) Carences dans la surveillance, l'audit et l'inspection des opérations et de la maintenance dans le système de transport.

h) Associations et syndicats :

- 1) Philosophies, politiques ou pratiques qui créent des conditions propices à l'erreur humaine et aux actions dangereuses.

i) Défenses :

- 1) Carences dans l'identification et la diffusion des risques connus et dans la manière de les gérer : sensibilisation à la sécurité.
- 2) Carences dans la fourniture de systèmes de détection et d'avertissement adéquats au personnel pour leur permettre de percevoir un événement dangereux à temps pour le prévenir.
- 3) Carences dans la « marge d'erreurs » du système qui font qu'il est difficile de sortir d'une situation dangereuse sans subir des lésions ou des dommages.
- 4) Carences dans les capacités du système de répondre aux situations d'urgence, ce qui aggrave les conséquences d'un accident.

16.2.15 Ces LUC de l'organisation et de la gestion fournissent le contexte opérationnel des erreurs humaines commises par le personnel d'exploitation et de maintenance. Chaque facteur LUC représente un danger potentiel qui peut être systématiquement identifié, validé et corrigé.

Comportement et erreurs

16.2.16 Les paragraphes qui suivent décrivent les modes de comportement, l'erreur humaine et l'interaction entre le comportement et l'erreur. Le cadre comportement-erreur a été adapté de la taxonomie des comportements de Rasmussen (1987) et du système générique de modélisation des erreurs (GEMS) de Reason (1990), qui facilite l'établissement de liens entre une erreur et le niveau de performances d'une personne (comportement) au moment de la défaillance.

Modes de comportement

16.2.17 Pour comprendre comment les personnes commettent des erreurs, il faut d'abord examiner comment elles se comportent. Rasmussen (1987) a établi une taxonomie de comportements qui décrit les performances sur la base de trois niveaux de prise de décision, décrits ci-après :

- a) Les *performances basées sur les habiletés* décrivent le comportement d'une personne dans une activité qu'elle connaît bien. Les actions tendent à être accomplies sur la base de routines intégrées ; les performances basées sur les habiletés sont en général une réponse automatique dans laquelle il n'y a que peu ou pas de prise de décision consciente.
- b) Les *performances basées sur les règles* sont moins automatiques. Les décisions sont fondées sur des procédures apprises ; ces procédures sont enregistrées dans la mémoire à long terme et exigent l'intervention du centre de prise de décision et de la mémoire de travail parce les comportements basés sur les règles se produisent au niveau conscient. La réponse est gouvernée par un algorithme « si-alors », c'est-à-dire « si » telle est la situation, « alors » tel est le diagnostic ; si tel est le diagnostic, alors tel est le correctif ;
- c) Les *performances basées sur les connaissances* sont un comportement qui se produit lorsqu'un opérateur se trouve confronté à des situations nouvelles pour lesquelles il existe peu de règles préétablies, mais qui exigent de prendre des mesures appropriées. Sans règles pour le guider, l'opérateur fonde ses décisions sur ses connaissances et son expérience.

À partir de la description des comportements selon la taxonomie habiletés-règles-connaissances, on peut examiner comment les personnes commettent des erreurs dans chacun de ces modes de comportement.

Erreur humaine

16.2.18 Il existe deux grandes catégories d'erreurs : les actions qui s'écartent de l'intention ou qui ne sont pas intentionnelles (actions qui ne se déroulent pas comme prévu) et les actions qui sont intentionnelles (actions qui se déroulent comme prévu, mais qui ne donnent les résultats escomptés). Les erreurs peuvent encore être divisées en deux types qui dépendent en grande partie de l'examen du concept d'action intentionnelle. Il est important de noter que « l'intentionnalité » désigne l'action elle-même et non l'intention de commettre une erreur.

- a) *Actions non intentionnelles*. « L'action exécutée est-elle l'action prévue ? » Si la réponse à cette question est non, l'action est non intentionnelle. Une action non intentionnelle qui aboutit à une erreur vient d'une défaillance dans l'exécution de l'action, c'est-à-dire qu'il y a une différence entre ce qui devait se passer et ce qui s'est réellement passé. Une erreur d'exécution est soit une inadvertance, soit un oubli.

Les inadvertances se produisent par manque d'attention vis-à-vis l'exécution de l'action. Par exemple, un opérateur essaie d'atteindre un commutateur, sans le regarder, et le place à la position OFF à partir de la position STANDBY alors qu'il avait l'intention de le placer à la position ON.

Un oubli est une action non intentionnelle découlant d'une défaillance de la mémoire. Par exemple, une personne suit une série d'instructions et oublie une des étapes de l'exécution de la tâche.

Qu'il s'agisse d'une inadvertance ou d'un oubli, l'action prévue est l'action qui convient à la situation, mais l'opérateur ne réussit pas à l'exécuter correctement.

- b) *Actions intentionnelles.* « L'action exécutée est-elle l'action prévue ? » Si la réponse à cette question est oui, l'action est intentionnelle. Une action intentionnelle qui aboutit à une erreur ou à une violation est un défaut de planification, c'est-à-dire que l'action intentionnelle n'était pas appropriée. Une erreur de planification est soit une faute, soit une violation. Avec ce type d'erreur, l'action se déroule exactement comme prévu mais n'atteint pas les résultats désirés ; autrement dit, l'erreur se situe dans la planification : c'est la mauvaise action pour la situation. Les fautes sont souvent des défaillances du processus de pensée et du processus de prise de décision. Elles sont généralement plus subtiles que les inadvertances et les oublis, et beaucoup de temps peut s'écouler entre l'exécution de l'action erronée et sa détection.

Il faut faire une distinction entre fautes et violations : il y a faute lorsqu'il n'y a pas d'intention de commettre une erreur ; il y a violation lorsqu'il y a une décision délibérée d'agir contre une règle ou un plan. Le terme « violation » indique un ajustement ou un changement calculé apporté à une règle ou à un plan, ce qui distingue ce type d'erreur des autres types d'erreurs, c'est-à-dire les inadvertances, les oublis et les fautes.

16.2.19 Malgré le fait qu'il s'agit d'actions délibérées, les personnes qui commettent certaines violations (violations de routine ou exceptionnelles) essaient d'agir correctement et il faut donc distinguer ces erreurs du sabotage, qui suppose une intention malveillante. Les violations de routine se produisent tous les jours lorsque les personnes modifient régulièrement les procédures de travail ou ne s'y conforment pas rigoureusement, souvent parce que les pratiques sont mal conçues ou le travail est mal défini. Par contre, une violation exceptionnelle est souvent une dérogation unique à une pratique, par exemple à Tchernobyl, où on n'a délibérément pas tenu compte des règlements de sécurité afin d'exécuter un test de sécurité. L'objectif cependant n'était pas de commettre un acte malveillant, mais en fait visait plutôt à améliorer la sécurité du système.

Cadre comportement-erreur

16.2.20 Le système GEMS de Reason (1990) fournit un cadre qui combine la taxonomie des comportements de Rasmussen basée sur les habiletés-règles-connaissances avec les types d'erreurs humaines pour obtenir les erreurs suivantes :

- 1) inadvertances et oublis basés sur les habiletés ;
- 2) fautes basées sur les règles ;
- 3) fautes basées sur les connaissances.

Glendon et McKenna (1995) ont mis de l'avant l'argument selon lequel les violations sont généralement basées sur les règles et seulement parfois sur les connaissances. Cependant, vu qu'une évaluation de l'information (par exemple, une règle ou un plan) est associée à une violation, ce type de défaillance semble se produire plus souvent au niveau des performances basées sur les connaissances (Hudson, 1991).

- a) *Inadvertances et oublis basés sur les habiletés.* Si l'erreur est basée sur les habiletés, il s'est produit une inadvertance ou un oubli soit par inattention, soit par excès d'attention. L'inattention consiste à ne pas exercer le contrôle attentionnel nécessaire au déroulement d'un processus ; l'excès d'attention consiste à effectuer le contrôle attentionnel mais au mauvais moment dans le déroulement de l'action. L'inattention peut découler de quelque chose d'aussi simple qu'une interruption ; dans ce cas, l'opérateur omet la vérification requise parce qu'il est interrompu ou distrait par un événement externe tel qu'un appel radio qui interrompt la procédure de la liste de vérifications ; résultat, il saute une vérification. L'attention excessive peut aussi mener à une omission. Si l'opérateur estime qu'il se trouve plus loin dans le déroulement d'une action qu'il ne l'est en réalité, il peut omettre une étape de la séquence. Une liste des modes spécifiques de défaillance par groupe de comportement établie à partir de plusieurs sources (Norman, 1981; Norman, 1988; Weiner et Nagel, 1988; Reason, 1990) et leur description figure à l'Appendice 1 au présent chapitre.
- b) *Fautes basées sur les règles.* Si l'erreur est basée sur les règles, il s'est produit une faute soit parce que la mauvaise règle a été appliquée, soit parce que la bonne règle a été mal appliquée. Une mauvaise règle est une règle qui est incorrecte, inefficace ou contre-indiquée (l'Appendice 1 au présent chapitre donne plus de détails sur les modes de défaillance au niveau des règles). Une bonne règle est une règle dont l'utilité dans les circonstances données a été démontrée. Une erreur qui consiste à mal appliquer une bonne règle est une erreur où la règle appliquée ne convient plus aux circonstances (l'Appendice 1 au présent chapitre donne des exemples de modes de défaillance au niveau des règles).
- c) *Fautes basées sur les connaissances.* Lorsqu'aucune règle ne s'applique à une situation donnée, il faut trouver de nouvelles solutions ou établir de nouveaux plans (Hudson, 1991). Une erreur qui se produit durant la formulation de solutions ou de plans est une faute basée sur les connaissances. Ces erreurs se produisent parce que l'opérateur n'a pas toutes les informations requises pour créer un modèle mental exact du problème. À ce niveau, les modes de défaillance peuvent découler de préjugés tels que les préjugés de confirmation, c'est-à-dire que l'opérateur cherche des informations qui vont confirmer ce qu'il estime déjà être vrai et écarte toute information qui ne cadre pas avec l'hypothèse choisie (l'Appendice 1 au présent chapitre donne des exemples de modes de défaillance au niveau des connaissances).

Processus intégré d'enquête sur les facteurs humains

16.2.21 Les cadres système-organisation et erreur humaine-comportement décrits aux § 16.2.1 à 16.2.20 permettent aux enquêteurs d'axer les recherches sur les conditions dangereuses potentielles que les enquêtes sur les facteurs humains cherchent à mettre au jour. Le processus indiqué ci-après intègre ces cadres dans une méthode systématique par étapes à employer dans les enquêtes sur les facteurs humains. Voir l'Appendice 2 au présent chapitre pour plus de détails sur chacune des étapes de ce processus.

16.2.22 Ce processus (illustré à la Figure III-16-4) s'applique autant aux accidents qu'aux incidents (dans les paragraphes qui suivent, le terme accident comprend aussi les incidents). Il comprend sept étapes :

- 1) collecte des données sur l'accident ;
- 2) détermination de la séquence de l'accident ;
- 3) identification des actions/décisions et conditions dangereuses¹;

1. Une condition dangereuse est parfois le résultat d'un événement naturel. Une action ou une décision dangereuse est parfois le résultat d'une condition dangereuse, elle-même créée par une mauvaise décision. Dans le premier cas, l'enquêteur peut passer de l'étape 3 à l'étape 7 ; dans le deuxième cas, il doit effectuer toutes les étapes de 3 à 7.

et pour chaque action (décision) dangereuse :

- 4) identification des erreurs et des violations ;
- 5) identification des modes de défaillance ;
- 6) identification des précurseurs de comportement ;
- 7) identification des problèmes de sécurité potentiels.

Les étapes 3 à 6 sont utiles à l'enquête parce qu'elles facilitent l'identification des conditions dangereuses latentes. L'étape 7, l'identification des problèmes de sécurité potentiels, est largement fondée sur les facteurs identifiés dans les précurseurs de comportement.

Étape 1 — Collecte des données sur l'accident

La première étape du processus d'enquête sur les facteurs humains est la collecte de renseignements relatifs au travail, soient ceux qui concernent le personnel, les tâches, l'équipement et les conditions environnementales liés à l'accident.

Dans les systèmes complexes, où il existe de nombreuses interactions entre les éléments constitutifs, il y a un danger constant de négliger ou de perdre des informations cruciales durant l'enquête. L'emploi du modèle SHEL par l'enquêteur comme outil organisationnel pour la collecte des données sur les lieux de travail permet d'éviter des problèmes en aval :

- a) parce qu'il tient compte de tous les éléments importants du système de travail ;
- b) parce qu'il favorise l'examen des relations entre les éléments du système de travail ;
- c) parce qu'il met en évidence les facteurs qui agissent sur les performances humaines en reliant tous les éléments périphériques à l'élément humain central.

La Figure III-16-5 est une adaptation de la manière d'appliquer ce modèle à un système complexe où il existe plusieurs éléments SHEL (humain, matériel, information et environnement).

Étape 2 — Détermination de la séquence de l'accident

Lorsque l'enquêteur passe aux questions « comment et pourquoi », il est nécessaire de relier les événements et les circonstances identifiées à la première étape du processus. L'enquêteur peut utiliser le modèle des causes d'accidents de Reason (1990), qui emploie un cadre de production, pour déterminer l'enchaînement des événements qui ont mené à l'accident. Le modèle de Reason facilite aussi l'organisation des données sur le système de travail recueillies à l'aide du modèle SHEL et permet de mieux comprendre leur incidence sur les performances humaines. La séquence de l'accident est établie en organisant les informations relatives aux événements de l'accident et aux circonstances qui entourent un des cinq éléments de production : décideurs, encadrement hiérarchique, conditions préalables, activités productives et défenses.

Les éléments de production eux-mêmes suivent une structure temporelle. Cet aspect temporel est un facteur important dans l'organisation des informations puisque les événements et les circonstances qui peuvent conduire à un accident (et qui sont donc des facteurs causaux) ne sont pas nécessairement proches du lieu de l'accident, ni dans le temps ni dans l'espace. L'organisation séquentielle des données causales introduit le concept des facteurs actifs et des facteurs latents de Reason (1990) (voir § 16.2.7 à 16.2.9).

En pratique, les étapes 1 et 2 ne s'excluent pas mutuellement. Pour faciliter cette activité simultanée, les modèles SHEL et de Reason peuvent être combinés, comme le montre la Figure III-16-6.

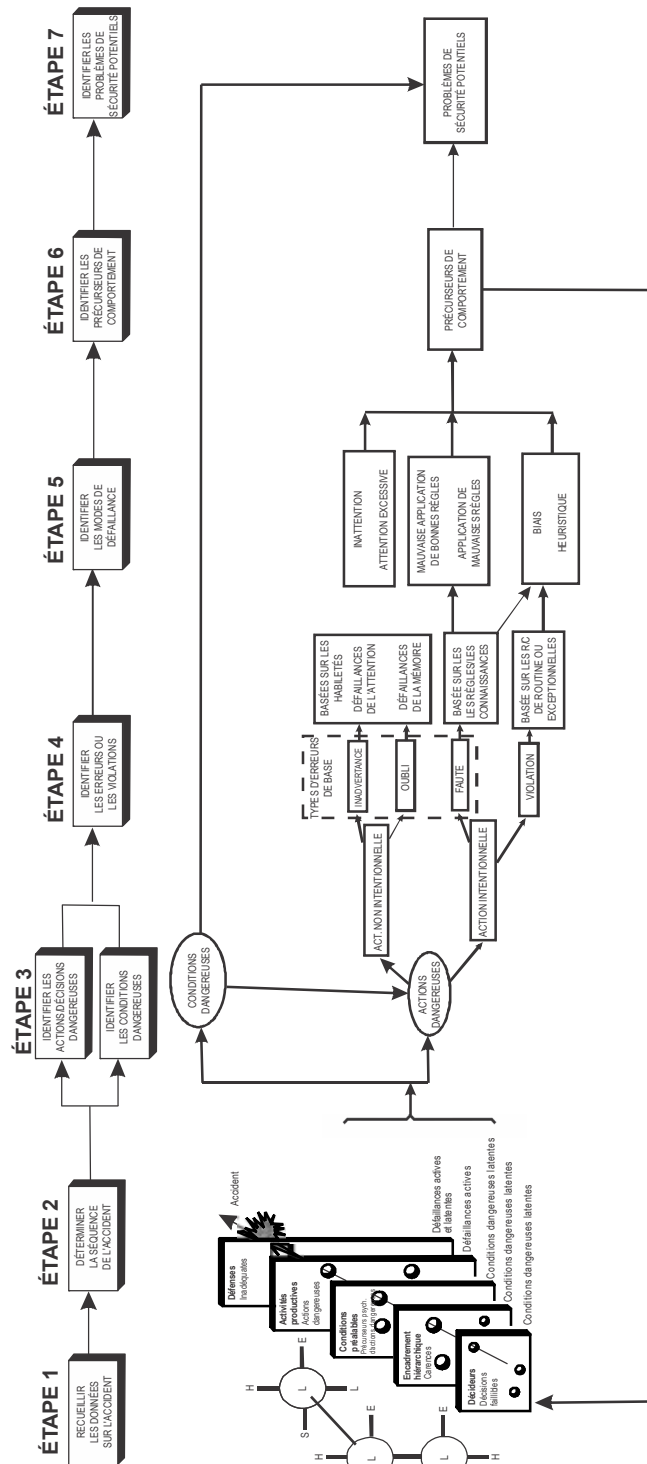


Figure III-16-4. Processus intégré d'enquête sur les accidents

Étape 3 — Identification des actions/décisions et conditions dangereuses

À l'étape 3 du processus, l'enquête et/ou l'analyse se simplifie ; les informations recueillies et organisées à l'aide du modèle SHEL, du modèle de Reason et des cadres LUC sont utilisées pour commencer à identifier les actions/décisions et conditions dangereuses. Plusieurs actions, décisions et/ou conditions peuvent être des éléments potentiellement dangereux et il est donc nécessaire de répéter les évaluations des faits de l'accident. Le modèle hybride SHEL-Reason (Figure III-16-6) peut être une base utile pour effectuer ces évaluations itératives.

Une fois qu'une action, décision ou condition dangereuse a été détectée, il faut en déterminer l'origine. Une enquête plus poussée et/ou une analyse plus approfondie peuvent révéler d'autres actions, décisions ou conditions dangereuses qui ont précédé le facteur causal d'abord identifié.

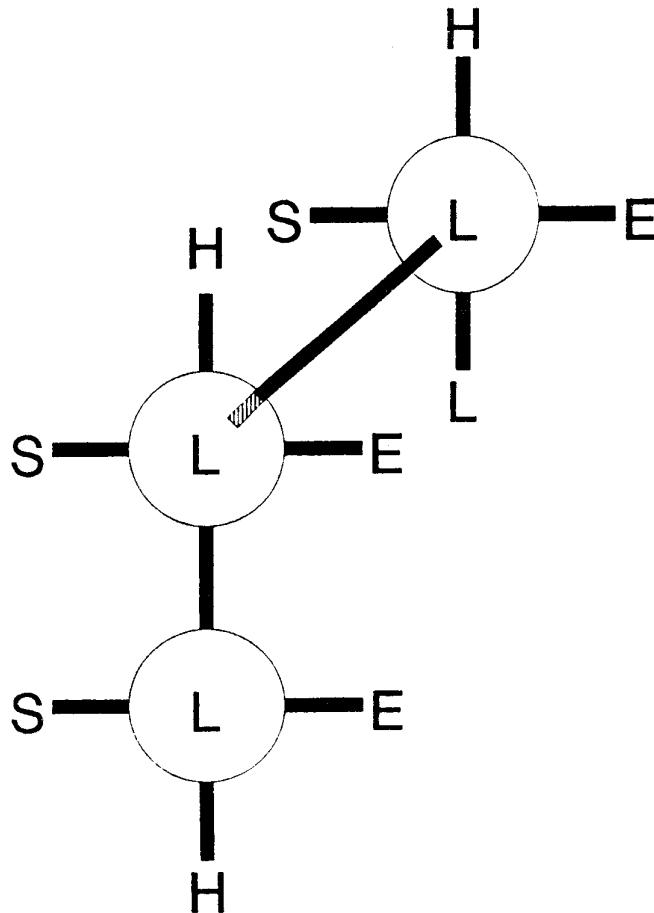


Figure III-16-5. Modèle SHEL modifié

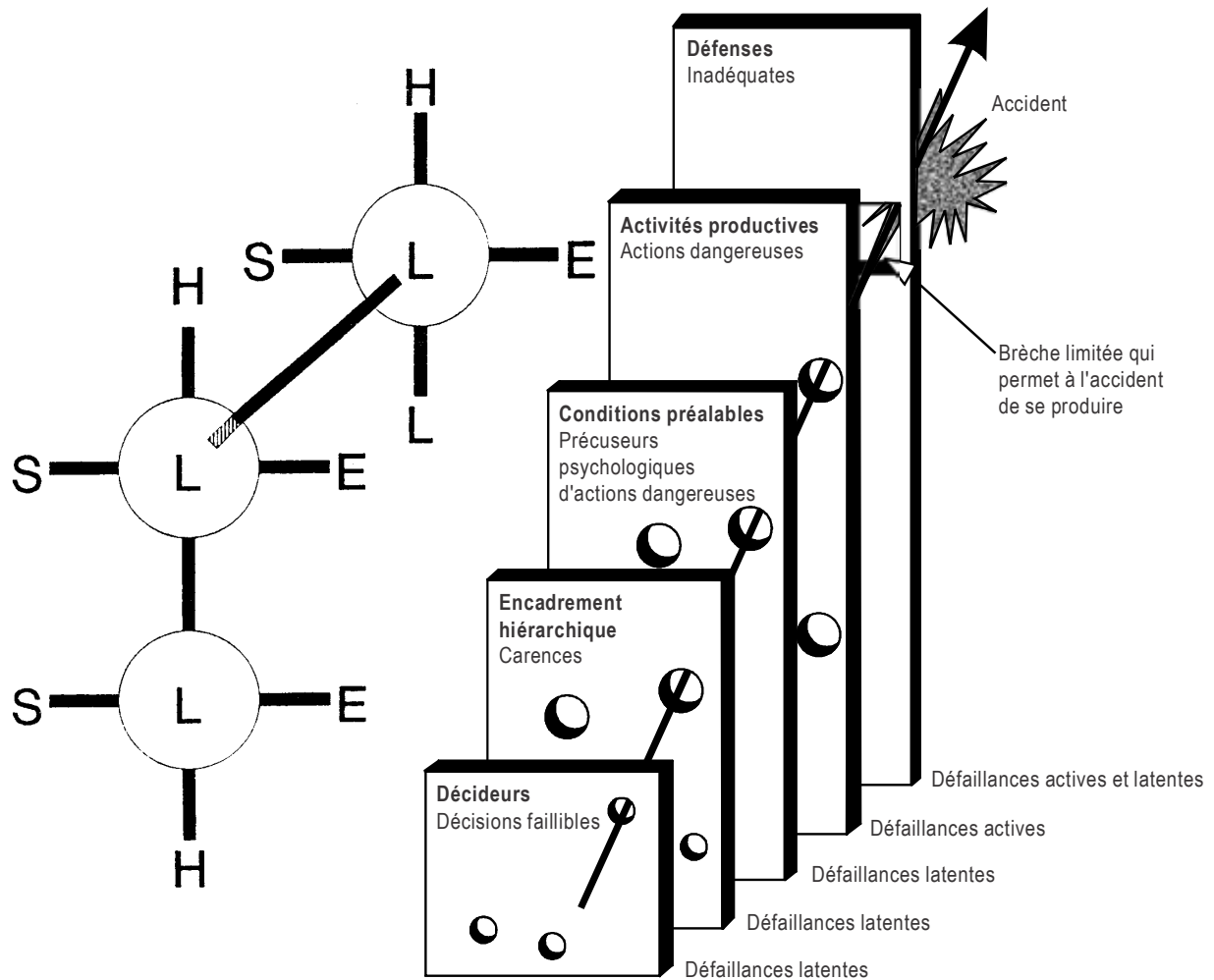


Figure III-16-6. Modèle hybride SHEL-Reason

La dernière action dangereuse qui précipite l'accident constitue souvent un point de départ commode pour reconstituer l'accident.

Exemple. Après les étapes 1 et 2, l'enquêteur détermine qu'une des actions dangereuses est le fait de n'avoir pas vérifié un des éléments de la liste de vérifications.

Note.— Cet exemple sera utilisé et développé dans toute la section pour illustrer le processus.

Les données recueillies pendant l'enquête (c'est-à-dire les événements et les circonstances) peuvent être organisées, à l'aide de plusieurs éléments du modèle SHEL modifié, en un cadre de travail entourant un modèle d'événement (dans le cas présent, le scénario de l'accident) basé sur le modèle de Reason. Chaque accident peut ainsi être décrit par un seul cadre d'événements et de circonstances ; l'enquêteur peut alors identifier ceux qui constituent les actions, décisions et conditions dangereuses liées à l'accident.

Étape 4 — Identification des erreurs et des violations

L'étape 4 est exécutée pour chaque action ou décision dangereuse et commence par une question simple : « Quelle est l'erreur qui a fini par rendre cette action ou cette décision dangereuse ? » (Voir le § 16.2.8 pour l'explication des termes utilisés dans cette étape.)

L'identification du type d'erreur ou de violation comprend deux sous-étapes (Figure III-16-7) :

- 1) *Action non intentionnelle ou intentionnelle.* Déterminer d'abord si l'erreur ou la violation était non intentionnelle ou intentionnelle.
- 2) *Erreur ou violation.* Déterminer l'erreur ou la violation qui décrit le mieux la défaillance, sans oublier la décision prise au sujet de l'intentionnalité. Il y a quatre catégories possibles: inadvertance, oubli, faute et violation.

Poursuivant l'exemple de l'action dangereuse décrite plus haut, l'enquêteur peut déterminer que le fait de ne pas vérifier un élément de la liste de vérifications (l'action dangereuse) est non intentionnel et qu'il est dû à une inadvertance parce que l'opérateur a sauté une étape dans la séquence.

Étape 5 — Identification des modes de défaillance

L'étape 5 consiste à identifier la décision qui a finalement conduit à l'action ou à la décision erronée établie à l'étape 3, en plaçant les erreurs (inadvertances, oublis et fautes) et les violations dans le contexte des performances (comportements) ; autrement dit, quelles étaient les performances de la personne au moment de la défaillance ?

Le cadre GEMS facilite l'établissement de liens entre une erreur ou une violation et le niveau de performance d'une personne au moment où s'est produite la défaillance. En passant à l'étape suivante (Figure III-16-8), on commence à comprendre comment les erreurs et les violations sont liées à des défaillances de comportement courants (modes de défaillance) et ne sont pas nécessairement le résultat d'un comportement irrationnel.

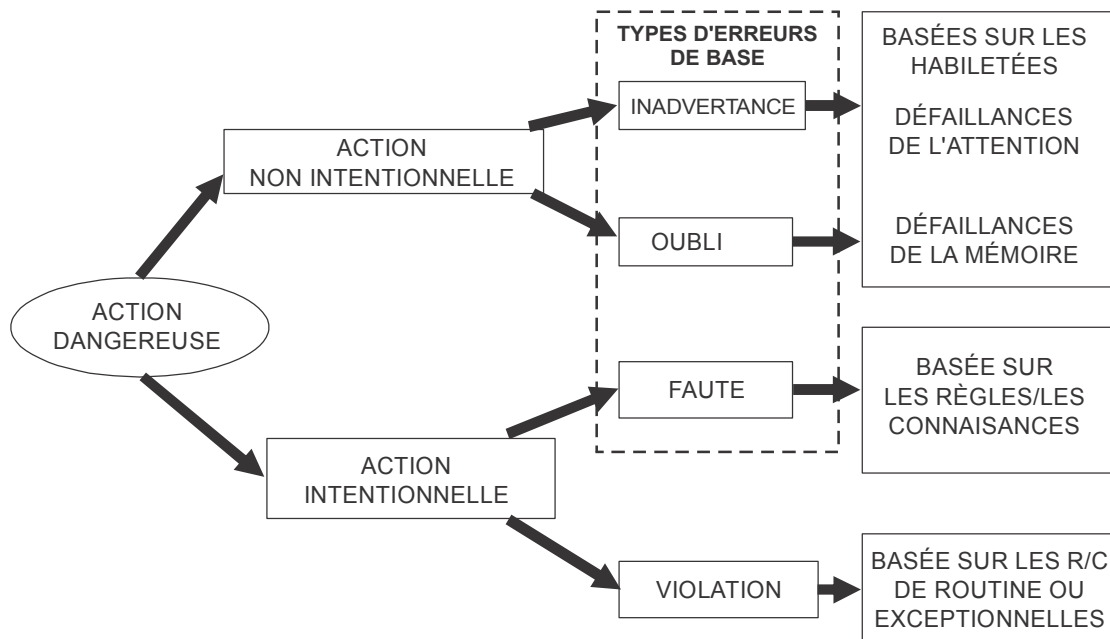


Figure III-16-7. Cadre GEMS (adapté de Reason, 1990)

Les erreurs et les violations sont mises en correspondance avec trois catégories de comportements (§ 16.2.16 à 16.2.20) :

- 1) inadvertances et oublis basés sur les habiletés ;
- 2) fautes basées sur les règles ;
- 3) fautes basées sur les connaissances.

Il existe plusieurs modes de défaillance dans chaque niveau de performance (catégorie de comportement) ; (la Figure III-16-8 donne une description générale des modes de défaillance). Les erreurs et les violations identifiées à l'étape 4 peuvent être reliées à ces modes de défaillance à l'aide du cheminement illustré par les Figures III-16-7 à III-16-8.

Exemple. Après avoir déterminé que l'action dangereuse, c'est-à-dire d'avoir sauté un élément de la liste de vérification, était non intentionnelle et que l'erreur était une inadvertance, l'enquêteur relie l'erreur au niveau de performance et détermine que l'opérateur présentait un comportement basé sur les habiletés. Les modes de défaillance qui se produisent dans les comportements basés sur les habiletés sont décrits en Appendice 1 au présent chapitre. Dans l'exemple déjà utilisé, l'enquêteur, après avoir élaboré le scénario de l'accident, sait que, pendant qu'il exécutait la procédure de liste de vérifications, le pilote a reçu un appel de l'ATC pour lui donner l'autorisation de départ. L'enquêteur voit alors qu'un des modes de défaillance au niveau du comportement basé sur les habiletés est une omission commise après une interruption, qui s'est concrétisée par l'interruption d'une vérification requise par un événement extérieur. Dans ce mode de défaillance, la séquence initiale de l'action, c'est-à-dire l'exécution de la procédure de vérification, se poursuit avec l'omission d'un ou de plusieurs éléments. Dans le cas de l'exemple, les deux tâches, le contrôle de la liste de vérifications et la confirmation de la réception de l'autorisation de départ, exigeaient les mêmes ressources attentionnelles et c'est le contrôle des éléments de la liste de vérification qui en a souffert.

Étape 6 — Identification des précurseurs de comportement

L'étape 5 porte sur l'identification des modes de défaillance, qui décrivent les mauvaises prises de décision ou les actions dangereuses. Pour déterminer les causes sous-jacentes et les facteurs contributifs d'une décision, d'une personne ou d'un groupe, il est important de déterminer s'il existe des facteurs dans le système de travail qui ont pu faciliter l'expression du mode de défaillance (et donc de l'erreur ou de la violation et de l'action dangereuse). Ces facteurs s'appellent des précurseurs de comportement. Les précurseurs de comportement peuvent être déterminés en examinant les informations sur le système de travail recueillies et organisées à l'aide des cadres SHEL, Reason ou LUC dans les étapes 1 et 2. Le réexamen de ces données montre encore une fois la nature itérative du processus d'enquête ; il peut même être estimé nécessaire d'approfondir l'enquête.

Les trois niveaux de performance ou de comportement peuvent être divisés en défaillances de comportements courants, ou modes de défaillance. L'Appendice 1 au présent chapitre donne une description des modes de défaillance.

Exemple. En réexaminant les données recueillies, l'enquêteur découvre qu'un des précurseurs de comportement est la conception de la liste de vérifications elle-même. Il s'agit d'une liste papier qui ne comporte aucune indication permettant au pilote de suivre la séquence de vérification. En l'absence de cette aide, c'est au pilote qu'il incombe de s'assurer qu'aucun élément n'a été omis. En constatant que la conception de la liste pose problème, l'enquêteur a découvert une condition dangereuse latente dans le système. Ces conditions dangereuses latentes dans l'organisation et la gestion sont les précurseurs de comportement qui conduisent le personnel d'exploitation ou de maintenance à exécuter des actions dangereuses ou à prendre des décisions dangereuses. Elles représentent des dangers potentiels qui peuvent être systématiquement identifiés, validés et corrigés.

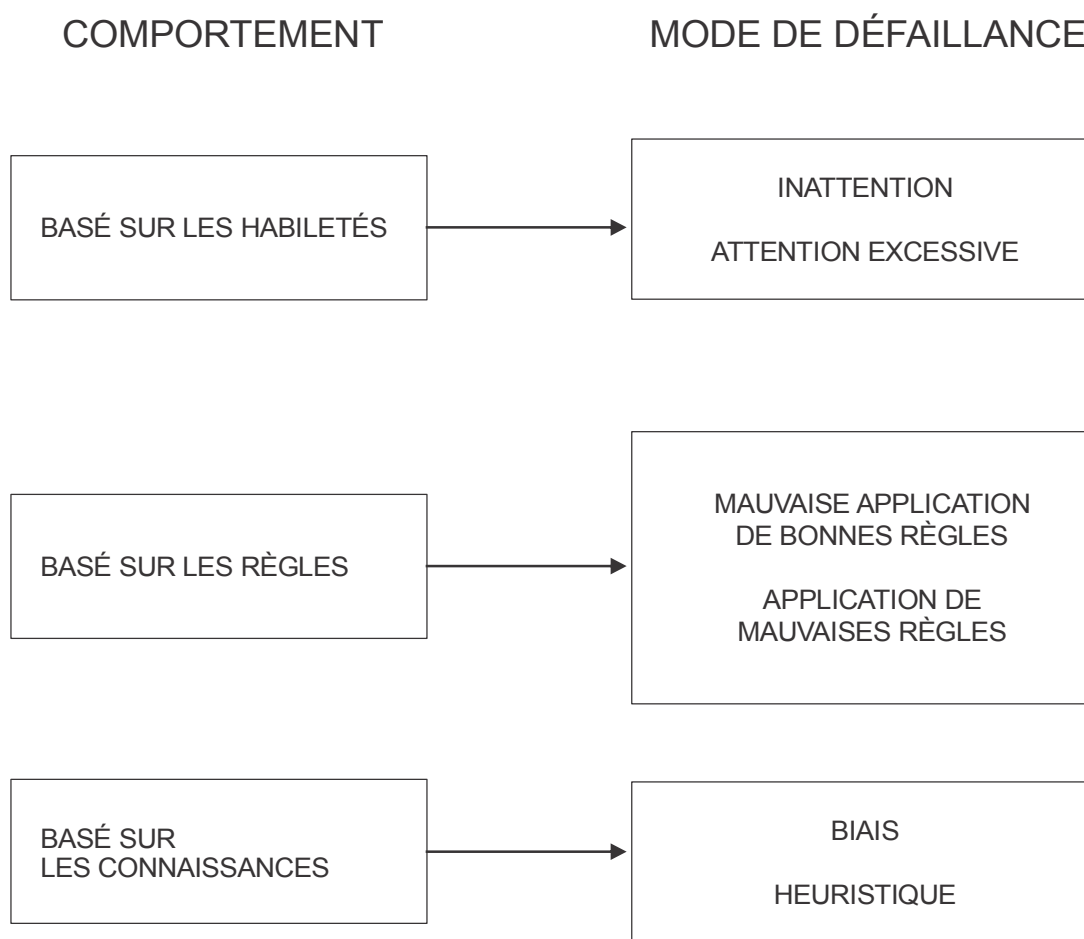


Figure III-16-8. Division des comportements en modes de défaillance

Étape 7 — Identification des problèmes de sécurité potentiels

À l'étape 7, l'enquêteur identifie les conditions latentes dangereuses créées naturellement ou par suite d'une décision faillible qui constituent des problèmes de sécurité potentiels. Dans la plupart des cas, l'identification des problèmes de sécurité potentiels est largement fondée sur les facteurs identifiés comme précurseurs de comportement, ce qui, une fois encore, souligne l'importance de procéder de manière systématique aux étapes 1 et 2 du processus, car elles sont la base des étapes suivantes de l'analyse.

S'il y a lieu, les problèmes de sécurité potentiels peuvent être analysés plus avant pour déterminer les carences en matière de sécurité et les mesures de sécurité qui pourraient être recommandées.

Résumé

Le processus intégré d'enquête sur les facteurs humains est un outil visant à permettre aux enquêteurs et aux analystes d'identifier plus facilement les conditions dangereuses directes et sous-jacentes liées aux accidents de transport. Les cadres présentés, qui sont le fondement du processus, sont tirés de la littérature sur les facteurs humains vu que l'élément humain est un facteur qui contribue de manière importante aux accidents. L'étape finale du processus est l'identification des problèmes de sécurité potentiels, qui peuvent être utilisés pour identifier les carences systémiques de sécurité.

16.3 ACTIVITÉS D'ENQUÊTE

Collecte des informations

16.3.1 Le succès de l'enquête sur les facteurs humains dépend largement de la quantité et de la qualité des informations recueillies. Comme les accidents sont tous différents, l'enquêteur doit déterminer le type et la qualité des données qu'il convient de recueillir et d'examiner. En général, il est préférable d'obtenir le plus grand nombre de renseignements possible au début de l'enquête puis d'éliminer les données superflues au fur et à mesure que l'enquête progresse.

16.3.2 Utiliser le modèle conceptuel SHEL décrit plus haut pour orienter la collecte des données. En général, recueillir des données sur des faits qui permettent :

- a) de reconstituer tous les événements comportementaux importants qui se sont produits ;
- b) d'examiner et d'analyser en profondeur les interfaces SHEL pour déterminer où se sont produites les défaillances ;
- c) de déterminer ce qui a pu influencer ou motiver les personnes liées à l'accident à exécuter une action particulière ;
- d) de confirmer l'existence d'une carence de sécurité identifiée.

Sources d'information

16.3.3 Les informations pertinentes pour l'enquête sur un accident d'aviation peuvent provenir de nombreuses sources. Les sources principales pour les facteurs humains comprennent les indices fournis par le matériel, les documents papier, les enregistrements de conversations et de données de vol, les entrevues, les observations directes d'activités du personnel aéronautique et les simulations. Les sources secondaires sont les bases de données sur les accidents/incidents d'aviation, les documents de référence et les spécialistes des facteurs humains.

a) Sources principales

- 1) Les indices fournis par le matériel sont le plus souvent associés à l'aéronef, mais ils peuvent aussi provenir d'autres postes de travail et équipements utilisés par le personnel aéronautique (contrôleurs de la circulation aérienne, agents de bord, personnel de maintenance et d'entretien). On compte parmi les sources spécifiques l'épave, un aéronef de configuration similaire, les données de l'avionneur, les dossiers et registres de la compagnie, le matériel de maintenance et d'entretien, les installations et le matériel du contrôle de la circulation aérienne, etc.

- 2) La documentation papier s'applique à toutes les interfaces du modèle SHEL. Elle comprend les documents suivants :

dossiers personnels et carnets de vol des membres d'équipage,
certificats et licences,
dossiers de la compagnie concernant le personnel et la formation,
manuels de vol des avions,
manuels et procédures d'exploitation normalisées de la compagnie,
manuels et programmes de formation,
calendriers de formation et calendriers opérationnels de la compagnie,
dossiers de l'organisme de réglementation,
prévisions météorologiques, dossiers et matériel de briefing,

documents relatifs aux plans de vol,
dossiers médicaux,
résultats des examens médicaux et des autopsies.

- 3) Les enregistrements des données de vol et les enregistrements radar de l'ATC sont de sources d'information utiles pour établir la séquence des événements et examiner les interfaces humain-humain. Les programmes de suivi des enregistrements de bord utilisés par certaines compagnies aériennes sont une mine d'informations sur les procédures opérationnelles normalement appliquées par les équipages. En plus des enregistreurs de données de vol classiques, les aéronefs de nouvelle génération sont dotés d'enregistreurs de maintenance et de composants électroniques à mémoire non volatile qui peuvent aussi fournir des renseignements. Les enregistrements audio (ATC et CVR) sont d'incalculables sources d'information pour l'examen des interfaces humain-humain et humain-matériel. En plus de conserver les communications du personnel, ces enregistrements peuvent fournir des indices sur l'état d'esprit d'une personne et sur son niveau de stress ou de fatigue. Il est donc essentiel de les faire écouter par des personnes qui connaissent les membres d'équipage non seulement pour confirmer l'identité des interlocuteurs, mais aussi pour déceler toute anomalie dans le débit ou le mode d'expression. Il est essentiel aussi que les personnes qui connaissent les procédures opérationnelles particulières de l'équipage de conduite écoutent les enregistrements de manière à obtenir une image plus complète des activités non verbales de l'équipage.
- 4) Les entrevues avec des personnes directement ou indirectement liées à l'accident constituent une importante source d'informations.

Exemples de personnes qu'il peut être nécessaire d'interroger :

Membres de l'équipage de conduite	Membres de l'équipage de cabine
Autres membres d'équipage	Passagers
Contrôleurs de la circulation aérienne	Témoins oculaires
Manutentionnaires au sol	Agents techniques d'exploitation
Responsables du briefing météo	Manutentionnaires de bagages
Personnel de dégivrage	Techniciens de maintenance
Propriétaire de la compagnie	Chef des opérations aériennes
Chef pilote	Chef instructeur
Instructeurs	Pilote vérificateur
Autres pilotes de la compagnie	Anciens employeurs
Superviseurs	
Chef de la maintenance	Techniciens de maintenance
Techniciens spécialisés	
Examineurs en vol	Inspecteurs de navigabilité
Auditeurs	Organismes de réglementation
Médecin	Psychologue
Médecin examinateur	Collègues
Amis	Membres de la famille

Les connaissances glanées lors de ces entrevues peuvent servir à confirmer, à clarifier ou à compléter les données obtenues d'autres sources. En l'absence de données mesurables, les entrevues deviennent l'unique source d'information. Les enquêteurs doivent donc bien connaître les techniques d'entrevue. L'Appendice 2 des Facteurs humains, Étude n° 7, *Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents* (Cir 240) de l'OACI, contient des éléments indicatifs sur ces techniques.

b) Sources secondaires

- 1) Les faits pertinents relatifs aux facteurs humains ne sont pas tous recueillis sur le terrain. Après l'enquête sur place, l'enquêteur peut obtenir d'autres renseignements sur les facteurs humains de plusieurs sources pour faciliter l'analyse des renseignements factuels recueillis sur le terrain. Ces données secondaires proviennent de plusieurs sources.
- 2) L'observation directe des actions exécutées en situation réelle peut révéler d'importantes informations sur les facteurs humains. Elle peut porter sur les activités suivantes :

Opérations aériennes
Entraînement au vol
Maintenance
Contrôle de la circulation aérienne.
- 3) Les simulations permettent de reconstituer l'accident et peuvent aider à mieux comprendre l'enchaînement des événements qui ont conduit à l'accident ainsi que le contexte dans lequel les personnes liées à l'accident ont perçu ce qui s'est passé.
- 4) Les simulations par ordinateur à partir des données des enregistreurs de bord, des enregistrements du contrôle de la circulation aérienne et d'autres indices tangibles peuvent servir à reconstituer les faits.
- 5) Une séance dans un simulateur de vol ou la reconstitution du vol à bord d'un aéronef similaire peuvent souvent fournir des indices utiles sur les circonstances qui ont conduit à l'accident. La participation des personnes impliquées dans l'accident à une séance de simulation peut les aider à se rappeler des informations importantes qui se seraient perdues autrement.
- 6) Les bases de données sur la sécurité aéronautique contenant des données d'accidents/incidents ou les systèmes de comptes rendus confidentiels et les bases de données de certains avionneurs sont des sources utiles d'informations directement liées à l'environnement d'exploitation. Exemples: ADREP (OACI), STEADS (IATA), CASRP (Canada), ASRS et ASIS (États-Unis), CAIRS (Australie), CHIRP (Royaume-Uni).
- 7) Les enquêteurs devraient toutefois utiliser les bases de données avec circonspection ; ils doivent être sûrs d'en connaître la source, la population cible et les limites. Ils doivent connaître la terminologie employée dans chacune des bases consultées, car il n'y a pas d'ensemble de mots clés communs à toutes les bases de données. Les critères de codage et de saisie varient d'une base à l'autre, ce qui peut influencer sur le sens des données trouvées. L'Appendice 4 des Facteurs humains, Étude n° 7, *Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents* (Cir 240) donne plus de détails sur les bases de données et leur utilité dans l'enquête sur les facteurs humains.

- 8) L'examen de la documentation peut être une source importante d'informations. La consultation des documents de référence peut aider à :
 - i) déterminer comment un facteur humain donné peut influencer sur les performances ;
 - ii) relier les informations recueillies sur le terrain à ce qui est connu du comportement humain dans des circonstances semblables ;
 - iii) organiser logiquement les informations recueillies sur le terrain.
- 9) Les ouvrages de référence de base en psychologie et en sociologie peuvent être de bonnes sources d'information sur la performance humaine en général, mais il est rare qu'ils traitent du comportement humain dans des conditions comparables à l'environnement de l'exploitation aérienne. Ces dernières années, des professionnels du domaine des facteurs humains ont produit de bons documents de référence traitant des questions opérationnelles relatives à l'aviation. Certains organismes de recherche en aviation fournissent sur demande des services de documentation sur des sujets sélectionnés. D'autres références figurent dans la Circulaire sur les facteurs humains, Étude n° 7 (Cir 240).
- 10) À tout moment au cours d'une enquête, les enquêteurs doivent être prêts à consulter des professionnels dans d'autres spécialités. Ces spécialistes pourraient être notamment :
 - i) des médecins, pour analyser les incidences de tout facteur médical découvert chez les membres de l'équipage de conduite ou chez d'autres intervenants ;
 - ii) des psychologues, pour aider à analyser les incidences de facteurs environnementaux, opérationnels et situationnels sur la motivation et le comportement ;
 - iii) des sociologues, pour aider à évaluer les facteurs sociologiques qui influent sur les interactions et les performances ;
 - iv) des chercheurs et spécialistes dans le domaine du sommeil, pour évaluer la qualité des périodes de repos et l'incidence qu'un cycle travail-repos particulier ou que des facteurs circadiens ont sur l'efficacité ;
 - v) des ergonomes, pour évaluer l'effet du design et de l'agencement des lieux de travail sur les utilisateurs.

Directives pour la collecte des données

16.3.4 Les directives suivantes pour la collecte des données sur les performances humaines sont basées sur les cadres SHELL et LUC. Elles ont pour objectif d'indiquer :

- a) comment les performances peuvent être modifiées par ces facteurs ;
- b) les domaines à examiner pour trouver des sources de renseignements.

16.3.5 La description des éléments et des interfaces SHELL présentée ci-après aidera les enquêteurs à recueillir les données nécessaires pour réaliser une enquête approfondie sur les facteurs humains.

- a) *L'être humain — l'individu.* L'élément humain — l'individu — est au centre du modèle SHEL. Les données à recueillir sur cet élément central peuvent être divisées en quatre catégories de facteurs : physiques, physiologiques, psychologiques et psychosociaux.

- 1) Les *facteurs physiques* se rapportent aux limites de la personne.

- Déterminer si la personne était physiquement apte à exécuter les actions et les mouvements qu'elle devait accomplir ;

Les limites physiques ont une incidence sur la capacité de voir, d'agir, de se déplacer, et d'atteindre et de saisir quelque chose. Examiner les facteurs suivants :

Âge	Sexe	Poids
Taille	Ossature	Force
Coordination	Hauteur assis	Portée fonctionnelle
Longueur des jambes	Largeur des épaules	

- Déterminer si les performances de la personne étaient perturbées par des limites visuelles, auditives ou autres limites sensorielles.

Les limites visuelles peuvent :

Causer des illusions et la désorientation ;
Limiter la capacité de voir le trafic ;
Influencer le jugement au décollage et à l'atterrissage ;
Perturber la lecture des instruments et des cartes ;
Empêcher de voir des objets à cause d'une mauvaise accommodation ou de la myopie du champ visuel vide.

Quelques limites visuelles :

Seuil visuel	Acuité visuelle
Perception des vitesses	Perception de la profondeur
Adaptation à la lumière	Vision périphérique
Lunettes, verres de contact	Myopie du champ visuel vide

Limites auditives et autres limites sensorielles :

Seuil auditif (ouïe)
Appareil vestibulaire (accélération et équilibre)
Tolérances aux forces d'accélération
Odorat, toucher
Sensations kinesthésiques (détection du mouvement par les muscles) ; peuvent causer de mauvaises interprétations et des illusions.

- 2) Les *facteurs physiologiques* portent sur la personne en tant qu'organisme complexe comprenant un ensemble de systèmes.
- Déterminer si la personne était physiologiquement apte à exécuter la tâche qui lui était confiée ;
 - Déterminer comment sa santé physique, ou sa mauvaise santé physique, a pu influencer sa performance et son jugement.
 - Déterminer comment son aptitude à surmonter la maladie, la fatigue ou le stress a pu influencer sur son jugement et ses comportements.
 - Déterminer si elle était affectée par un type quelconque de privation ou de besoin physiologique.

Facteurs nutritionnels

- Déterminer si les facteurs nutritionnels ont empêché la personne de :
 - réagir à une action ;
 - résister à la fatigue ;
 - se concentrer sur une tâche.
- Déterminer si la personne a récemment perdu du poids
- Déterminer si la personne suivait un régime. Tenir compte des facteurs suivants :
 - ingestion d'aliments au cours des 24 dernières heures ;
 - heures écoulées depuis le dernier repas ;
 - déshydratation.

Santé. Déterminer si la personne :

- souffrait d'une maladie, de douleurs ou de maux de dents ;
- était physiquement apte à exécuter la tâche requise ;
- était enceinte ;
- était obèse ;
- avait récemment fait don de sang.

Stress

- Déterminer comment l'aptitude de la personne à surmonter le stress a pu influencer sur ses actions et son comportement.

Les signes émotifs du stress à long terme comprennent notamment :

- apathie ou anxiété (nerveux, agité) ;
- irritabilité (susceptible, défensif, arrogant) ;
- surcompensation (déli, exagération, surmenage).

Les signes comportementaux comprennent notamment :

retrait (isolement social, réticence à accepter des responsabilités) ;
mauvaise conduite (abus d'alcool, jeu) ;
physiques (apparence négligée, en retard) ;
infractions (loi, au travail, dettes).

Fumer

Fumer peut :

réduire la dextérité ;
causer des troubles de la vision ;
fausser l'estimation du temps ;
causer de l'irritabilité et de la frustration si la personne en est privée.

Style de vie

- Déterminer comment la personne se comporte généralement avec les autres.
- Déterminer si la personne a récemment modifié son style de vie, ses activités, ses amitiés. Déterminer ce qui a déclenché le changement.
- Déterminer si c'était un moyen de surmonter le stress et la pression, et quelles étaient ces pressions.

Fatigue

La fatigue à court terme (aiguë) pourrait être influencée par les facteurs suivants :

quantité de sommeil (repos et durée des siestes de l'équipage) ;
ingestion d'aliments ;
nature des activités (niveau d'activité) ;
nature des tâches (fatigue due à la nature des habiletés requises) ;
niveau de stress au cours des 72 dernières heures ;
durée du vol.

La fatigue à long terme (chronique) peut dépendre des facteurs suivants :

horaires de travail, périodes de congé ;
perturbation du rythme circadien (décalage horaire) ;
aptitude à surmonter le stress ;
périodes de sommeil, manque de sommeil, perturbation du sommeil ;
nature des activités ;
facteurs stress (famille et travail).

La fatigue peut avoir des incidences sur les éléments suivants :

mémoire à court terme (oubli) ;
vigilance et concentration ;
capacité de prendre des décisions (limite les choix) ;
performances (standards plus faibles, tendance à prendre des raccourcis, prise de risques excessifs) ;

capacité de surmonter le stress ;
capacité de percevoir et de visualiser le trafic ;
capacité d'entendre les communications ;
motivation au travail.

Alcool/drogues

Tenir compte des points suivants :

médicaments en vente libre ;
médicaments prescrits ;
drogues illicites ;
cigarettes, café, autres ;
dépendance, gueule de bois, facultés affaiblies.

L'alcool et les drogues peuvent :

causer la somnolence ou des étourdissements ;
perturber la coordination et la vision ;
affaiblir les fonctions mentales et réduire les perceptions sensorielles.

Incapacités

L'incapacité partielle peut être difficile à déceler. Elle peut être causée par les facteurs suivants :

empoisonnement au monoxyde de carbone ou intoxication alimentaire ;
troubles médicaux ;
décompression, plongée, crampes abdominales ;
émanations nauséabondes ou toxiques ;
mal des transports.

L'incapacité partielle peut présenter une vaste gamme de symptômes :

hyperventilation, hypoxie, anoxie ;
vertiges, perte de conscience ;
manque de concentration ;
fixation ;
affaiblissement des fonctions mentales et réduction des perceptions sensorielles.

Illusions

L'environnement peut provoquer plusieurs types d'illusions :

Illusions visuelles :

trou noir ;
vertige stroboscopique ;
autokinésie ;
vection circulaire ou linéaire ;
perspective linéaire ;
illusions à l'atterrissage.

Illusions vestibulaires :

somatogyre (inclinaison) ;
somatogravique — coriolis ;
ascenseur — « main géante ».

Noter les conditions environnementales au moment de l'accident :

particularités géographiques du lieu ;
phase du vol et forces exercées (enregistrements FDR ou ATC) ;
surveillance des instruments et mesures prises.

- 3) Les *facteurs psychologiques* déterminent ce que les individus amènent à leur situation de travail comme résultat de leur connaissance et de leur expérience de la tâche et de leurs capacités mentales. Cela fait intervenir la formation, l'expérience et l'aptitude à planifier; les perceptions, le traitement de l'information, la capacité d'attention et la perception de la charge de travail; la personnalité, l'état mental et émotionnel, les attitudes et l'humeur. Déterminer les éléments suivants :

Traitement de l'information

- Déterminer si l'information à traiter dépassait les limites humaines ou les limites personnelles (capacité mentale).
- Déterminer combien de « blocs » d'information ont été présentés à la personne (capacité de mémoire à court terme).
- Déterminer si l'information a causé des préjugés, un mauvais jugement ou la prise de mauvaises décisions.
- Déterminer si la nature du traitement de l'information a augmenté la charge de travail.

Les signes possibles comprennent notamment les suivants :

concentration sur peu de solutions ;
fixation, attention canalisée ;
oublis ;
manque de synchronisation et de coordination.

Perceptions

- Déterminer la perception ou la représentation mentale que la personne avait de la tâche à accomplir. Était-elle exacte ?
- Déterminer si la personne souffrait de troubles ou de retards de la perception, ou d'illusions causées par son système visuel ou vestibulaire ou par les circonstances entourant le vol.

Tenir compte de différents types de désorientation :

- géographique ;
- spatiale ;
- temporelle ;
- visuelle ;
- conscience de la situation.

Tenir compte des temps de réaction pour :

- détecter quelque chose ;
- prendre une décision appropriée ;
- prendre des mesures appropriées.

Attention

— Déterminer si le niveau d'attention nécessaire dépassait les limites de l'individu.

Tenir compte des points suivants :

- durée d'attention ;
- inattention (générale, sélective) ;
- distracted (interne, externe) ;
- attention canalisée ;
- vigilance, ennui, monotonie ;
- perturbation, substitution des habitudes ;
- distorsion de la notion du temps.

Rechercher les indices suivants :

- mauvaises mesures prises ou mauvais temps de réaction ;
- la personne n'a pas vu un événement ou n'y a pas réagi ;
- mauvaise priorisation des tâches à exécuter.

Charge de travail

Déterminer si, par leurs actions, les membres de l'équipage de conduite ont diminué ou augmenté la charge de travail perçue.

Une charge de travail élevée peut causer les problèmes suivants :

- désorganisation, fixation, stress/panique ;
- mauvaise priorisation des tâches ;
- saturation de tâches ;
- délestage de tâches ;
- mauvaise prise de décision ;
- perte de la conscience de la situation.

Une charge de travail trop faible peut causer les problèmes suivants :

ennui ;
inattention ;
relâchement de la vigilance ;
manque de surveillance.

Attitude

- Déterminer ce qu'indiquent les faits à propos des attitudes de la personne face à son travail, à sa mission, aux autres et à elle-même.
- Déterminer comment ces attitudes ont influencé sa motivation, la qualité de son travail, sa prise de décision et son jugement.

Déterminer comment les facteurs suivants ont pu influencer sur ses performances :

humeur ;
motivation ;
habituations ;
attitude ;
ennui ;
relâchement de vigilance ;
confiance excessive.

Tenir compte des attentes suivantes :

cadre mental ;
anticipations ;
hypothèses fausses ;
désir de rentrer chez soi ;
détermination de continuer ;
prise de risques.

État mental et émotif

- Déterminer si la personne était psychologiquement apte à exécuter la tâche dont elle était chargée.
- Déterminer si l'état mental et émotif de la personne a eu une incidence sur sa manière d'aborder la situation.

Tenir compte de facteurs limitant les performances tels que : appréhension, niveau d'activation et pression mentale et stress auto-induits.

Rechercher des signes de panique, de stress, d'anxiété, notamment les suivants :

fixation, regard fixe ;
ton de la voix ;
réactions précipitées ou très lentes.

Expérience/récence

- Déterminer si l'expérience, les connaissances et la formation de la personne étaient suffisantes, pertinentes et applicables à la situation.

Tenir compte de l'expérience générale et récente de la personne :

- à ce poste ;
- dans cet aéronef ;
- pour la mission ;
- des instruments ;
- des procédures ;
- dans l'environnement (nuit, aérodrome, routes).

Une expérience générale ou récente inadéquate peut :

- réduire la confiance en soi ;
- augmenter le niveau de stress ;
- avoir pour résultat des actions incomplètes ou inappropriées ;
- augmenter le niveau perçu de la charge de travail.

Connaissances

Déterminer quelles connaissances la personne avait de l'aéronef, des systèmes, des procédures et de l'environnement.

- Déterminer si ses habiletés et ses qualités d'aviateur ont eu une incidence sur l'accident.

Un manque de connaissances peut :

- diminuer la confiance ;
- provoquer la confusion ;
- avoir pour résultat l'application de mesures inappropriées ou incomplètes.

Formation

- Déterminer s'il y a un lien entre l'accident et le type de formation reçue.
- Déterminer s'il y a des indications de transfert négatif ou positif.
- Déterminer si des faiblesses semblables à celles qui ont entouré l'accident ont été observées durant la formation.
- Déterminer si la formation de la personne était suffisante, pertinente et applicable à la situation.

Tenir compte de différents types de formation :

- formation initiale au sol et sur simulateur ;
- entraînement type vol de ligne ;
- formation périodique au sol et sur simulateur.

Planification

Une planification limitée peut avoir donné des informations incomplètes ou inexactes qui ont pu influencer la prise de décision ou le jugement.

- Déterminer si la quantité de planification (prévol et en vol) est représentative de l'attitude de l'équipage de conduite ou de la direction vis-à-vis du vol.
- 4) Les *facteurs psychosociaux* concernent les pressions que le milieu social (en dehors du milieu de travail) exerce sur une personne : événements et facteurs de stress (p. ex. mortalité dans la famille ou problèmes financiers), relations avec autrui (amis, famille, collègues).
- Déterminer si des facteurs psychosociaux ont motivé ou influencé la façon d'aborder une situation ou la capacité de gérer le stress ou les événements imprévus.

Pour évaluer les niveaux de pression et de stress subis par la personne, comparer sa perception des événements par rapport à celle des autres.

Tenir compte des facteurs suivants :

- tension mentale ;
- conflits interpersonnels ;
- perte personnelle ;
- problèmes financiers ;
- changements importants dans le mode de vie ;
- pressions familiales ;
- différences culturelles.

- b) *Interface humain-humain*. Cette interface représente la relation qui existe entre la personne et toutes les autres personnes en milieu de travail, y compris les relations entre le personnel et la direction, le climat dans la compagnie et les pressions exercées sur l'exploitation pouvant influencer profondément la performance humaine. Il faut donc recueillir des données sur les interactions humaines, la communication (verbale et non verbale) et les signaux visuels.

Communications verbales

- Déterminer si les interactions avec d'autres personnes ou la communication en milieu de travail ont influencé la performance, les attitudes, le niveau de stress ou la perception des exigences de la tâche et de la charge de travail.

Tenir compte des éléments suivants :

- perturbations causées par le bruit ;
- erreur d'interprétation ;
- phraséologie (de l'exploitation) ;
- contenu, débit ;
- barrière linguistique ;
- collationnement/écoute du collationnement ;

- Déterminer si la communication verbale et non verbale a influencé de manière inappropriée ou irréversible l'ordre dans lequel des actions ont été exécutées.

Signaux visuels

- Déterminer si des signaux visuels ont remplacé, appuyé ou contredit l'information verbale.
- Déterminer si la personne a été influencée par les signes non verbaux (langage corporel) d'une autre personne. Le langage corporel peut diriger une action, provoquer la confusion, le stress et des erreurs d'interprétation, ou créer des émotions et des pressions négatives.

Interactions entre les membres d'équipage

Évaluer les interactions entre les membres d'équipage et leur compatibilité en ce qui concerne la personnalité, le niveau d'expérience et les habitudes de travail.

- Déterminer si les membres d'équipage travaillaient ensemble ou les uns contre les autres.
- Déterminer si l'équipage a bien utilisé les ressources qui étaient à leur disposition.

Tenir compte des éléments suivants dans l'évaluation des membres d'équipage :

- supervision ;
- briefings ;
- coordination ;
- compatibilité/jumelage ;
- gestion des ressources ;
- attribution des tâches ;
- âge, personnalité, expérience.

Relation entre employés et direction

Examiner les différents niveaux de gestion. Le niveau de gestion qui prend les décisions, dresse les plans, affecte les ressources et rédige les instructions, et le niveau de supervision qui surveille les actions et exécute les instructions.

Déterminer si les politiques de la direction sur les questions intéressant le personnel ont une incidence sur les performances humaines :

- en fournissant des niveaux inadéquats d'expérience et de connaissances ;
- en créant une charge de travail excessive ou en défavorisant une bonne attention ;
- en provoquant le ressentiment et en créant un environnement de travail malsain ;
- en créant des conditions de travail dangereuses.

Relations de travail

- Déterminer quelle est l'influence syndicale sur les travailleurs, la direction, les politiques et les habitudes de travail.
- Déterminer s'il y a eu une fusion d'entreprises récemment. Dans l'affirmative, déterminer si elle a eu une incidence sur l'ancienneté, les négociations de contrats ou les politiques.

Pressions

Les pressions mentales dues aux politiques opérationnelles peuvent être réelles ou perçues.

- Déterminer si la pression mentale est imposée par les collègues, la direction ou l'industrie, et quel était le degré de pression ressentie.
- Déterminer quelles étaient les options des employés.
- Déterminer quel était le moral de l'entreprise.
- Déterminer le taux de roulement du personnel.

Supervision

- Déterminer s'il existait des politiques et des contrôles de qualité et s'ils étaient disponibles, à jour et adéquats.
- Déterminer si les politiques, les normes et les contrôles de qualité bien mis en œuvre, acceptés, contrôlés et surveillés.
- Déterminer si le ratio superviseurs-employés était adéquat.
- Déterminer si les superviseurs exécutent d'autres tâches.

Exigences réglementaires

- Déterminer si la direction favorise un environnement opérationnel qui va à l'encontre des exigences opérationnelles.
- Déterminer l'incidence de l'environnement opérationnel sur le processus décisionnel des employés et sur la manière dont ils choisissent les actions.
- Déterminer si les employés étaient disposés à s'écarter des règles ou s'ils y étaient forcés.
- Déterminer si les normes sont appliquées et si les règles en place sont appropriées.

Examiner les différentes tâches des organismes de réglementation :

- mise en œuvre ;
- audit ;
- inspection ;
- suiwi ;
- surveillance.

- c) *Interface humain-matériel.* Cette interface représente la relation qui existe entre l'humain et la machine. Les renseignements nécessaires concernent notamment la configuration du poste de pilotage ou du poste de travail, la conception des écrans et des commandes, ainsi que la conception et la configuration des sièges.

Commutateurs, commandes, affichages

- Déterminer s'il y a des similitudes, des différences ou des particularités dans la conception ou la disposition qui auraient pu modifier la manière dont la personne a traité l'information.

Déterminer l'influence des éléments suivants :

- conception ;
- emplacement ;
- éclairage ;
- couleurs, marques.

Déterminer l'incidence des instruments, des affichages, des commandes, des commutateurs et des alarmes sur les éléments suivants :

- temps de réaction ;
- habitudes ;
- charge de travail ;
- ordre des actions ;
- traitement de l'information ;
- désorientation ;
- confusion.

Évaluer l'incidence des éléments suivants sur les performances :

- espace ;
- éclairage ;
- bruit ;
- conditions climatiques.

Examiner les éléments suivants :

- aménagement de l'espace de travail, normalisation ;
- matériel de communication ;
- position de référence visuelle, conception des sièges ;
- restriction des mouvements et de la visibilité ;
- affichage des informations ;
- équipement d'alerte et d'avertissement ;
- confort du matériel personnel ;
- liaison de données ;
- manipulation des instruments (problèmes de doigts).

- d) *Interface humain-information.* Cette interface représente la relation qui existe entre l'humain et les systèmes de soutien qu'il trouve en milieu de travail. L'enquêteur doit notamment recueillir des renseignements sur la réglementation, les manuels, les listes de vérifications, les publications, les procédures d'exploitation normalisées et la conception des logiciels.

Information écrite

- Déterminer si les manuels, listes de vérifications, cartes et autres documents écrits étaient exacts, facilement disponibles et utilisés.

Déterminer si la présentation, le contenu et la terminologie étaient :

uniformes dans les documents semblables ;
faciles à utiliser et à comprendre ;
logiques et appropriés.

- Déterminer si la documentation écrite a pu causer des erreurs, augmenter le temps de réaction ou être source de confusion.

Examiner aussi les documents suivants :

publications ;
règlements ;
cartes, NOTAM ;
SOP ;
directives ;
signalétique.

Ordinateurs

- Déterminer si les écrans et les claviers d'ordinateur étaient compatibles entre eux.
- Déterminer s'ils ont créé la confusion, augmenté le temps de réaction ou masqué des erreurs flagrantes.
- Déterminer si les ordinateurs ont augmenté ou diminué la charge de travail au moment de l'accident.

Automatisation

- Déterminer comment l'automatisation a pu influencer les actions et la charge de travail de la personne, ses conditions de travail, ses attitudes envers le travail et sa représentation mentale de la tâche.
- Déterminer l'incidence de l'automatisation sur l'enchaînement des événements.
- Déterminer si l'automatisation a augmenté ou diminué la charge de travail dans les moments cruciaux.
- Déterminer si l'automatisation a provoqué un relâchement de la surveillance ou l'ennui, amenant le personnel à rater des informations importantes.

Examiner les éléments suivants :

surveillance des tâches ;
saturation de tâches ;
conscience de la situation ;
maintien des habiletés.

Exigences réglementaires

- Déterminer si la personne était qualifiée ou certifiée pour exécuter la tâche.

Examiner les éléments suivants :

- certification ;
- qualification pour le poste et le type ;
- antécédents d'infractions ;
- licence/qualifications ;
- certificat médical.

e) *Interface humain-environnement.* Cette interface représente la relation qui existe entre l'humain et les environnements interne et externe. L'environnement interne est constitué par le lieu de travail: la température, l'éclairage ambiant, le bruit et la qualité de l'air. L'environnement externe comprend le milieu physique à l'extérieur du lieu de travail immédiat, ainsi que les nombreuses contraintes politiques et économiques qui s'exercent sur le système aéronautique. Il faut donc recueillir des renseignements sur les conditions météorologiques, le relief, les installations, l'infrastructure et la situation économique.

- Déterminer si des facteurs environnementaux ont pu inciter la personne à prendre des raccourcis, à fausser ses décisions ou à créer des illusions en affectant ses perceptions vestibulaires, visuelles ou auditives.
- Déterminer si la météo, le service de régulation des vols, le hangar, la porte d'embarquement ou l'infrastructure de l'aérodrome ont entraîné des retards, incitant à prendre des raccourcis et réduisant les marges de sécurité et le choix des actions possibles.
- Déterminer si des pressions économiques ou imposées par la réglementation ont faussé les décisions.

Examiner les installations de maintenance suivantes :

- matériel de soutien ;
- disponibilité des pièces ;
- normes, procédures et pratiques opérationnelles ;
- pratiques d'assurance qualité ;
- entretien et inspection ;
- formation ;
- documents requis.

Appendice 1 au Chapitre 16

Modes de défaillance

Performances basées sur les habiletés

La plupart des erreurs à ce niveau de performance peuvent se diviser en deux groupes :

- a) inattention : ne pas exercer le contrôle attentionnel nécessaire au déroulement d'un processus;
- b) attention excessive : ne pas exercer le contrôle attentionnel nécessaire au point approprié dans le déroulement d'une action.

Inattention

1. Erreur de saisie

Définition : Cette erreur se produit lors de l'exécution d'une séquence qui est très semblable à une autre séquence bien connue et que la séquence mieux connue prend le dessus. Le résultat est généralement une forte intrusion des habitudes.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur de saisie est l'interférence d'une forte habitude dans l'exécution de l'action prévue.

2. Erreur de description

Définition : Cette inadvertance se produit lorsque la description interne de l'action prévue n'est pas assez précise. Une erreur de description consiste généralement à exécuter la bonne action sur le mauvais objet. Plus les bons objets et les mauvais objets ont des caractéristiques communes (particulièrement s'ils sont physiquement rapprochés), plus les probabilités de commettre des erreurs sont élevées.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur de description est l'interférence d'une ambiguïté et/ou de distraction dans l'exécution de l'action prévue. Généralement la bonne action est exécutée sur le mauvais objet.

3. Omission par suite d'une interruption

Définition : Le contrôle attentionnel requis est interrompu par un événement externe ; l'action à exécuter se poursuit mais des parties sont omises à la suite de l'interruption. L'interruption peut même faire partie de la séquence originale.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une omission par suite d'une interruption sont les suivantes :

- a) une interruption perturbe le contrôle attentionnel ;
- b) le résultat d'une interruption est une omission dans la séquence normale de l'action.

4. Réduction d'intentionnalité

Définition : S'il y a un délai entre le moment où une action prévue est formulée et le moment où elle est exécutée et si l'action n'est pas soumise aux contrôles attentionnels appropriés, l'action prévue est recouverte par d'autres demandes.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur de réduction d'intentionnalité sont :

- a) un délai entre la planification et l'exécution de l'action ;
- b) les contrôles attentionnels requis ne sont pas effectués ;
- c) les actions requises par d'autres demandes remplacent l'action prévue.

5. Erreur de mode

Définition : Une erreur de mode se produit lorsqu'une situation est mal classée et que les actions exécutées ne sont pas appropriées, par exemple, lorsqu'un équipement est conçu pour accomplir plus de fonctions qu'il ne possède de commandes ou d'affichages, de sorte qu'une commande doit accomplir plus d'une fonction. Lorsque le mode de fonctionnement n'est pas visible sur l'équipement (par ex., on/off), l'information fournie à l'opérateur est ambiguë et les erreurs de mode sont probables).

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur de mode sont les suivantes :

- a) l'équipement utilisé donne des informations ambiguës sur les fonctions de commande ;
- b) l'utilisateur n'est pas sûr du mode actif de l'équipement et exécute des actions incorrectes.

Attention excessive

1. Omission

Définition : Contrôler la séquence d'exécution d'une action au mauvais moment peut faire croire que le processus est plus avancé qu'il ne l'est réellement et, en conséquence, une étape importante de la séquence risque d'être omise.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur d'omission sont les suivantes :

- a) le contrôle de la séquence d'exécution d'une action est effectué au mauvais moment ;
- b) il est estimé que la séquence d'exécution est plus avancée qu'elle ne l'est en réalité ;
- c) une étape de la séquence est omise.

2. Répétition

Définition : Contrôler la séquence d'exécution d'une action au mauvais moment peut faire croire que le processus n'est pas arrivé au point où il est en réalité et une action déjà exécutée est répétée.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur de répétition sont les suivantes :

- a) le contrôle de la séquence d'exécution d'une action est effectué au mauvais moment ;
- b) il est estimé que la séquence d'exécution est moins avancée qu'elle ne l'est en réalité ;
- c) une étape de la séquence est répétée.

3. Inversions

Définition : Contrôler la séquence d'exécution d'une action au mauvais moment peut causer l'inversion de la séquence.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur d'inversion sont les suivantes :

- a) le contrôle d'une séquence d'exécution d'une action bidirectionnelle est effectuée au mauvais moment ;
- b) la séquence est inversée.

Performances basées sur les règles

Mauvaise application de bonnes règles (éprouvées)

Plusieurs facteurs se conjuguent pour conduire à l'application de règles puissantes mais inappropriées :

1. Force d'une règle

Définition : La force d'une règle dépend du nombre de fois où la règle a permis d'obtenir le résultat voulu. Plus la règle réussit, plus elle devient puissante. Plus une règle a de force, plus elle a de probabilités d'être choisie, même lorsque la correspondance entre la situation et la règle est moins que parfaite.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur liée à la force d'une règle est l'application d'une mauvaise règle à une situation parce que cette règle a souvent été utilisée avec succès par le passé.

2. Règles générales

Définition : Les règles générales sont plus puissantes que les règles spécifiques simplement parce qu'elles sont plus fréquentes dans le monde.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur liée à une règle générale est l'application d'une mauvaise règle à une situation parce que cette règle est utilisée plus souvent.

3. Surabondance d'informations

Définition : Les informations auxquelles fait face le décideur sont si abondantes qu'elles dépassent la capacité du système cognitif de saisir et de traiter toutes les indications d'une situation locale. Sans informations spécifiques sur la vraie situation locale, il y a risque de mal appliquer les bonnes règles, par exemple une règle puissante ou une règle générale, même si elles sont inappropriées pour la situation locale.

Résumé : La caractéristique principale de la surabondance d'informations est le choix d'une mauvaise règle pour la situation en raison de la quantité écrasante d'informations à laquelle doit faire face le décideur.

4. Première exception

Définition : La première fois qu'une personne fait face à une exception importante à une règle générale, cette règle générale, particulièrement si elle s'est révélée très fiable par le passé, continuera à gouverner.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur liée à une première exception est que le décideur choisit une règle générale inappropriée pour la situation parce qu'il trouve difficile de choisir pour la première fois la règle appropriée.

5. Rigidité

Définition : Si une règle a été utilisée avec succès par le passé, il y a une tendance irrésistible (presque de l'obstination) à la réutiliser même lorsque les circonstances ne justifient plus son application. Ces règles ont une telle force que l'application de solutions connues mais encombrantes seront privilégiées même lorsque des solutions plus simples et plus élégantes sont aisément disponibles.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur de rigidité est le choix d'une mauvaise règle parce que le décideur croit en sa « justesse » malgré la présence d'autres options plus appropriées.

Application de mauvaises règles

1. Mauvaises règles

Définition : Ce type d'erreur découle d'un défaut ou d'une faiblesse dans la stratégie de la règle elle-même.

Résumé : La caractéristique principale d'une erreur liée à une mauvaise règle est que le choix de la règle est estimé incorrect parce que le plan ou la structure de la règle sont défectueux.

2. Règles inélégantes ou peu pratiques

Définition : Sans les instructions d'un expert ou parce que l'environnement opérationnel peut le tolérer, des solutions peu pratiques ou même bizarres peuvent être appliquées, mais elles fonctionnent et peuvent même s'incorporer aux procédures basées sur des règles.

Résumé : La caractéristique principale d'une règle inélégante ou peu pratique est de permettre à une règle inefficace de prospérer parce les contrôles à l'intérieur de l'environnement opérationnel n'existent pas ou n'ont pas fonctionné correctement.

3. Règles déconseillées

Définition : Même si le type de règle peut parfaitement permettre de réaliser un objectif immédiat la plupart du temps, son utilisation à long terme est déconseillée parce qu'elle peut conduire à des accidents évitables. En général les règles de ce type enfreignent les codes établis ou les procédures opérationnelles et, à long terme, peuvent conduire à un accident.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une règle déconseillée sont les suivantes :

- a) même si la règle fonctionne, son utilisation comporte un risque élevé de causer un accident ;
- b) la règle enfreint les procédures établies, les normes, etc.

Performances basées sur les connaissances

On utilise souvent, pour résoudre un problème, des heuristiques ou des règles mentales générales qui aident à diagnostiquer le problème sans avoir à y consacrer trop d'effort mental et, donc, trop de temps. Ces heuristiques sont souvent très utiles, mais il s'agit de raccourcis et on se prive par le fait même d'informations adéquates et précises ; plutôt que de traiter toutes les informations disponibles et de suivre un raisonnement jusqu'à la conclusion la plus probable et la plus logique, on utilise un raccourci qui peut en fait donner une mauvaise idée de la situation réelle.

1. Biais de prépondérance

Définition : Tendence à se concentrer sur les caractéristiques ou les indices matériels importants (par ex., bruyant, brillant, très visible, facile à interpréter) et à ne pas tenir compte d'indices cruciaux qui pourraient fournir des informations de diagnostic sur la nature du problème. Le biais de prépondérance vient du fait que les décideurs ne traitent pas nécessairement toutes les informations qui sont à leur disposition, particulièrement dans des moments de stress. Ce biais s'appelle aussi « sélectivité » en raison du traitement sélectif qu'un décideur applique aux informations.

Résumé : La caractéristique principale d'un biais de prépondérance est de fixer l'attention sur les mauvaises caractéristiques ou de ne pas la fixer sur les bonnes caractéristiques.

2. Biais de confirmation

Définition : Tendence à chercher les informations qui confirment ce que l'on estime déjà être vrai. Dans ces cas, l'information qui ne cadre pas avec l'hypothèse choisie n'est pas prise en compte ou est rejetée.

Résumé : La caractéristique principale d'un biais de confirmation est que l'attention n'est dirigée que vers les informations qui appuient une hypothèse préalablement choisie.

3. Heuristique représentative

Définition : Tendence à mettre en correspondance des indices tirés de la situation présente avec des indices d'une représentation mentale d'une situation particulière qui existe dans la mémoire à long terme. Autrement dit, une comparaison est établie entre les informations perçues et ce qui existe dans la mémoire.

S'il est décidé que les indices de la situation courante correspondent à ceux d'une situation particulière présente dans la mémoire, la conclusion tirée est que les situations sont semblables ou les mêmes. Le décideur peut donc en conclure que les mesures prises précédemment sont encore appropriées.

Cependant, si les indices perçus dans la situation présente ne sont pas complets ou sont ambigus, une mauvaise correspondance peut être établie. Si les indices conservés dans la mémoire ne représentent pas correctement la situation en cours, le jugement de la personne peut être erroné et les mauvaises décisions peuvent être prises. Une fois la correspondance établie, il y a une tendance à s'accrocher à cette interprétation et souvent même à ne pas la modifier même en présence de la preuve du contraire.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une heuristique représentative sont :

- a) la mise en correspondance incorrecte des informations perçues avec des modèles spécifiques conservés en mémoire ;
- b) la prise de mesures incorrectes parce qu'elles sont fondées sur de mauvaises interprétations de la situation en cours.

4. Heuristique de disponibilité

Définition : Tendence à diagnostiquer une situation en utilisant l'hypothèse la plus disponible en mémoire, c'est-à-dire accorder trop de poids aux faits qui viennent immédiatement à l'esprit. L'hypothèse la plus disponible peut ne pas être la plus probable, mais simplement celle qui a été observée le plus récemment ou qui est la moins compliquée.

Résumé : La caractéristique principale d'une heuristique de disponibilité est le choix d'une hypothèse inappropriée par simple commodité.

5. Heuristique « comme si »

Définition : Tendence à traiter toutes les informations « comme si » elles étaient également fiables, c'est-à-dire qu'on accorde à des informations tout au plus secondaires la même fiabilité qu'à des informations très fiables.

Résumé : La caractéristique principale d'une heuristique « comme si » est d'accorder incorrectement la même fiabilité à toutes les informations perçues.

6. Formulation

Définition : Dans une prise de décision qui comporte un risque, le problème est formulé comme un choix entre des gains et des pertes. En ce qui concerne les pertes, les gens vont de préférence choisir la perte risquée, qui est moins probable mais plus désastreuse, plutôt que la perte certaine.

Résumé : Les caractéristiques principales d'une erreur de formulation sont les suivantes :

- a) les options sont divisées en pertes ou en gains ;
- b) devant un choix entre une perte certaine et une probabilité incertaine de désastre, les gens vont de préférence choisir le risque.

7. Confiance excessive

Définition : Tendence à surestimer l'exactitude de la connaissance qu'on a d'une situation et de ses résultats. L'attention n'est alors fixée que sur les renseignements qui confirment le choix et il n'est pas tenu compte des indices démontrant le contraire.

Résumé : La caractéristique principale d'une confiance excessive est de fixer l'attention sur certaines informations parce que la personne surestime sa connaissance de la situation.

Appendice 2 au Chapitre 16

Processus intégré d'enquête sur les facteurs humains

Les cadres système-organisation et erreur humaine-comportement décrits au Chapitre 16 permettent aux enquêteurs d'axer les recherches sur les conditions dangereuses potentielles que les enquêtes sur les facteurs humains cherchent à mettre au jour. Le processus indiqué ci-après intègre ces cadres dans une méthode systématique par étapes à employer dans les enquêtes sur les facteurs humains.

Ce processus s'applique autant aux accidents qu'aux incidents (dans les paragraphes qui suivent, le terme accident comprend aussi les incidents). Le processus (Figure III-16-9) comprend sept étapes, les étapes 4 à 7 correspondant à chaque action/décision dangereuse.

- 1) collecte des données sur l'accident ;
- 2) détermination de la séquence de l'accident ;
- 3) identification des actions/décisions et conditions dangereuses ¹;
- 4) identification des erreurs et des violations ;
- 5) identification des modes de défaillance ;
- 6) identification des précurseurs de comportement ;
- 7) identification des problèmes de sécurité potentiels.

Les étapes 3 à 6 sont utiles à l'enquête parce qu'elles facilitent l'identification des conditions dangereuses latentes. L'étape 7, l'identification des problèmes de sécurité potentiels, est largement fondée sur les facteurs identifiés dans les précurseurs de comportement.

Les sept étapes du processus correspondent à plusieurs des tâches que les enquêteurs exécutent dans le cadre des activités fonctionnelles d'une enquête (la Figure III-16-10 montre les tâches pour chaque fonction d'enquête). Les paragraphes qui suivent expliquent chaque étape plus en détail.

Étape 1 — Collecte des données sur l'accident

La première étape du processus d'enquête sur les facteurs humains est la collecte de renseignements relatifs au travail, soient ceux qui concernent le personnel, les tâches, l'équipement et les conditions environnementales liés à l'accident. Il est essentiel d'adopter une approche systématique pour cette étape afin de pouvoir effectuer une analyse complète et de respecter les exigences logistiques de la collecte et de l'organisation des données et de la tenue à jour d'une base de données sur l'accident.

2. Une condition dangereuse est parfois le résultat d'un événement naturel. Une action ou une décision dangereuse est parfois le résultat d'une condition dangereuse, elle-même créée par une mauvaise décision. Dans le premier cas, l'enquêteur peut passer de l'étape 3 à l'étape 7 ; dans le deuxième cas, il doit effectuer toutes les étapes de 3 à 7.

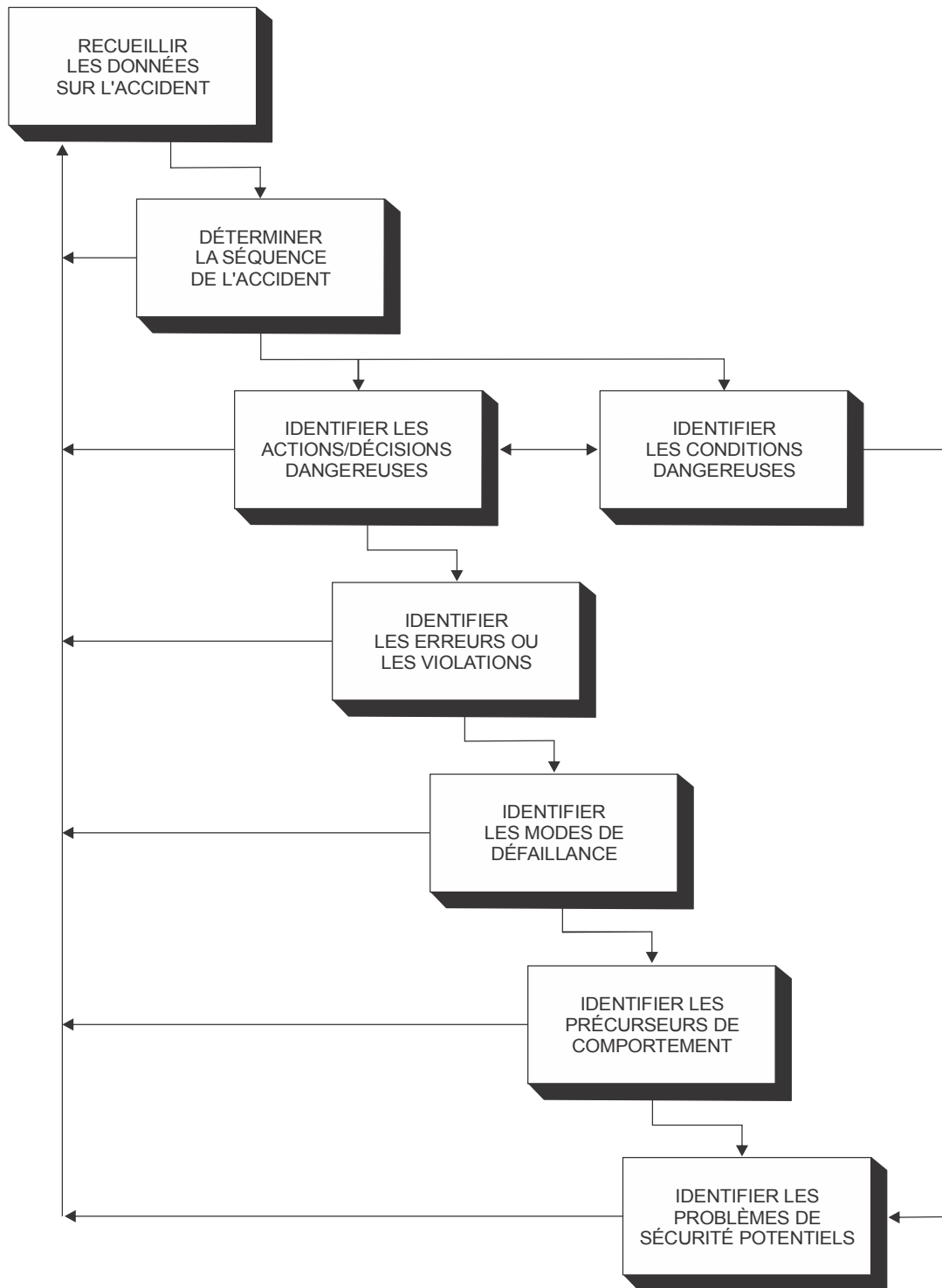


Figure III-16-9. Processus intégré d'enquête sur les accidents/incidents

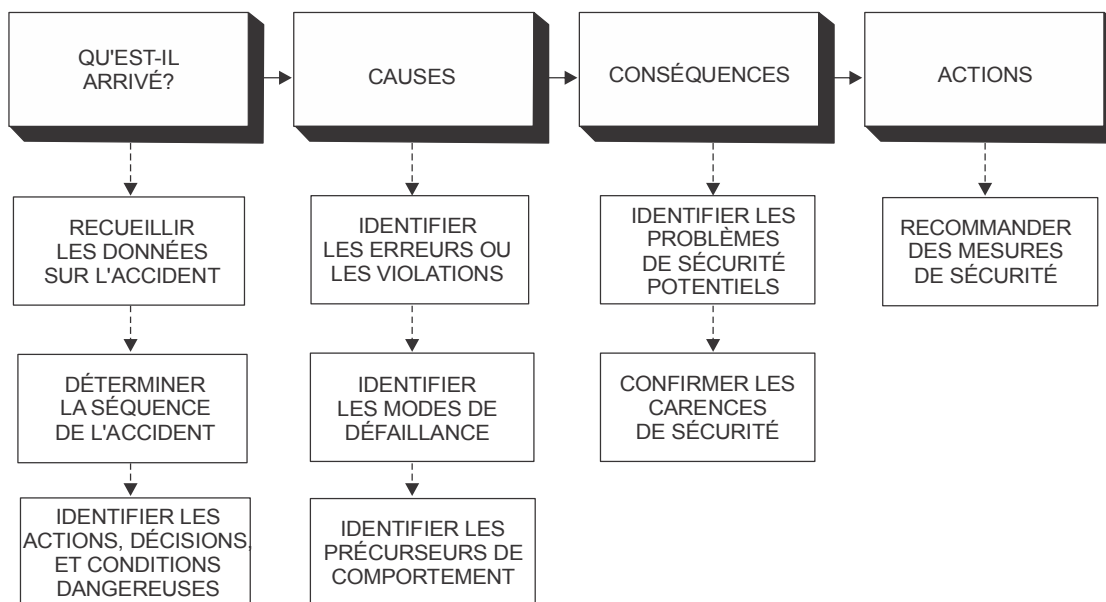


Figure III-16-10. Fonctions d'enquête et tâches correspondantes

Afin de recueillir les données systématiquement et efficacement, l'enquêteur doit, dès le début, tenir compte du fait que les lieux de travail liés au transport, tels que les aéronefs et les centres de contrôle de la circulation aérienne, font partie de « systèmes de travail » plus larges, chaque système étant constitué d'éléments divers et interreliés (humains, tâches, équipements et environnement) comme il est indiqué plus haut.

Dans les systèmes complexes, où il existe de nombreuses interactions entre les éléments constitutifs, il y a un danger constant de négliger ou de perdre des informations cruciales durant l'enquête. L'emploi du modèle SHEL par l'enquêteur comme outil organisationnel pour la collecte des données sur les lieux de travail permet d'éviter des problèmes en aval :

- a) parce qu'il tient compte de tous les éléments importants du système de travail ;
- b) parce qu'il favorise l'examen des relations entre les éléments du système de travail ;
- c) parce qu'il met en évidence les facteurs qui agissent sur les performances humaines en reliant tous les éléments périphériques à l'élément humain central.

La Figure III-16-11 est une adaptation de la manière d'appliquer ce modèle à un système complexe où il existe plusieurs éléments SHEL (humain, matériel, information et environnement).

À cette étape, le processus essaie d'abord de répondre aux questions les plus simples (quoi, qui, quand) puis passe à des questions plus compliquées (comment et pourquoi). Les données obtenues sont pour la plupart un ensemble d'événements et de circonstances constituées d'actions et de conditions ; certaines d'entre elles seront des actions et des conditions dangereuses.

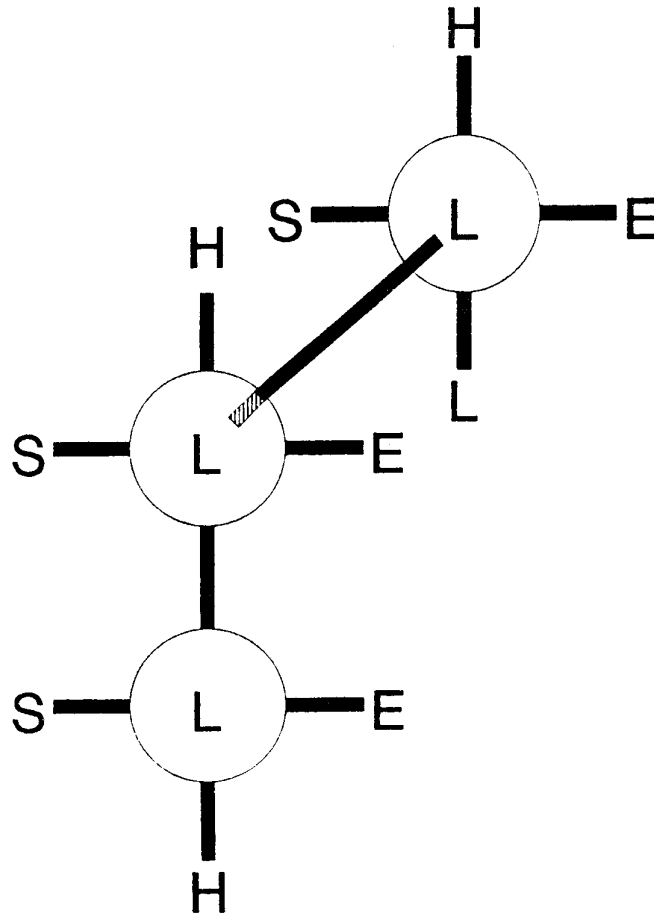


Figure III-16-11. Modèle SHELL modifié

Étape 2 — Détermination de la séquence de l'accident

Lorsque l'enquêteur passe aux questions « comment et pourquoi », il est nécessaire de relier les données obtenues à la première étape du processus. L'enquêteur peut utiliser le modèle des causes d'accidents de Reason (1990), qui emploie un cadre de production, pour déterminer l'enchaînement des événements qui ont mené à l'accident. Le modèle de Reason facilite aussi l'organisation des données sur le système de travail recueillies à l'aide du modèle SHELL et permet de mieux comprendre leur incidence sur les performances humaines. La séquence de l'accident est établie en organisant les informations relatives aux événements de l'accident et aux circonstances qui entourent un des cinq éléments de production : décideurs, encadrement hiérarchique, conditions préalables, activités productives et défenses.

Les éléments de production eux-mêmes suivent une structure temporelle. Cet aspect temporel est un facteur important dans l'organisation des informations puisque les événements et les circonstances qui peuvent conduire à un accident (et qui sont donc des facteurs causaux) ne sont pas nécessairement proches du lieu de l'accident, ni dans le temps ni dans l'espace. L'organisation séquentielle des données causales introduit le concept des facteurs actifs et des facteurs latents de Reason (1990).

Les facteurs actifs sont les événements ou circonstances finals qui conduisent à l'accident. Leurs effets sont souvent immédiats parce qu'ils se produisent directement dans les défenses du système (par ex., système d'avertissement désactivé) ou sur les lieux des activités productives (c'est-à-dire les activités intégrées des éléments humain, information et matériel du système de travail), qui conduisent indirectement à déjouer les défenses du système (par ex., utilisation de la mauvaise procédure).

Les conditions dangereuses sous-jacentes ou latentes peuvent exister tant au niveau personnel qu'au niveau de l'organisation (facteurs LUC) ; elles peuvent être présentes dans les conditions qui existent à l'intérieur d'un système de travail (l'élément « conditions préalables » du modèle). Une réglementation inadéquate, des procédures inadéquates, une formation insuffisante, une charge de travail élevée et des contraintes temporelles excessives sont des exemples de conditions dangereuses.

En pratique, les étapes 1 et 2 ne s'excluent pas mutuellement. Lorsque l'enquêteur entreprend l'étape de la collecte des données, il peut naturellement essayer de replacer l'information recueillie, même si elle est souvent fragmentaire dans les premières étapes de l'enquête, dans le contexte d'une séquence d'accident. Pour faciliter cette activité simultanée, les modèles SHEL et de Reason peuvent être combinés, comme le montre la Figure III-16-12.

Étapes 3–5 — Aperçu

Les étapes 3 à 5 sont basées sur le cadre de comportement et d'erreur indiqué plus haut. Ce cadre ouvre des « voies » qui conduisent à identifier une action ou une décision dangereuse (étape 3), à identifier ce qui était erroné dans l'action ou la décision (étape 4) et finalement à l'intégrer dans un contexte comportemental, c'est-à-dire un mode de défaillance dans un niveau de performance (étape 5). Le cadre de comportement et d'erreur de la Figure III-16-13 est particulièrement utile pour explorer les reconstitutions hypothétiques des faits de l'accident.

Étape 3 — Identification des actions/décisions et conditions dangereuses

À l'étape 3 du processus, l'enquête et/ou l'analyse se simplifie ; les informations recueillies et organisées à l'aide du modèle SHEL, du modèle de Reason et des cadres LUC sont utilisées pour commencer à identifier les facteurs qui ont causé l'accident, c'est-à-dire les actions, décisions et conditions dangereuses. Plusieurs actions, décisions et/ou conditions peuvent être des éléments potentiellement dangereux et il est donc nécessaire de répéter les évaluations des faits de l'accident. Le modèle hybride SHEL-Reason (Figure III-16-12) peut être une base utile pour effectuer ces évaluations itératives.

Les données recueillies pendant l'enquête (c'est-à-dire les événements et les circonstances) peuvent être organisées, à l'aide de plusieurs éléments du modèle SHEL modifié, en un cadre de travail entourant un modèle d'événement (dans le cas présent, le scénario de l'accident) basé sur le modèle de Reason. Chaque accident peut ainsi être décrit par un seul cadre d'événements et de circonstances ; l'enquêteur peut alors identifier ceux qui constituent les actions, décisions et conditions dangereuses liées à l'accident.

Une fois qu'une action, décision ou condition dangereuse a été détectée, il faut en déterminer l'origine. Une enquête plus poussée et/ou une analyse plus approfondie peuvent révéler d'autres actions, décisions ou conditions dangereuses qui ont précédé le facteur causal d'abord identifié.

Comme il est indiqué plus haut, plusieurs actions et décisions dangereuses peuvent être détectées au cours des deux premières étapes du processus. La dernière action dangereuse qui précipite l'accident constitue souvent un point de départ commode pour reconstituer l'accident. Cette dernière action ou décision est différente des autres parce qu'elle peut être considérée comme l'action ou la décision finale qui a conduit à l'accident, c'est-à-dire la dernière action ou décision qui a rendu l'accident inévitable. Même s'il s'agit habituellement d'une défaillance active, la dernière action ou décision dangereuse peut faire partie intégrante d'une condition dangereuse latente telle qu'une mauvaise décision de conception qui a conduit à la défaillance du système.

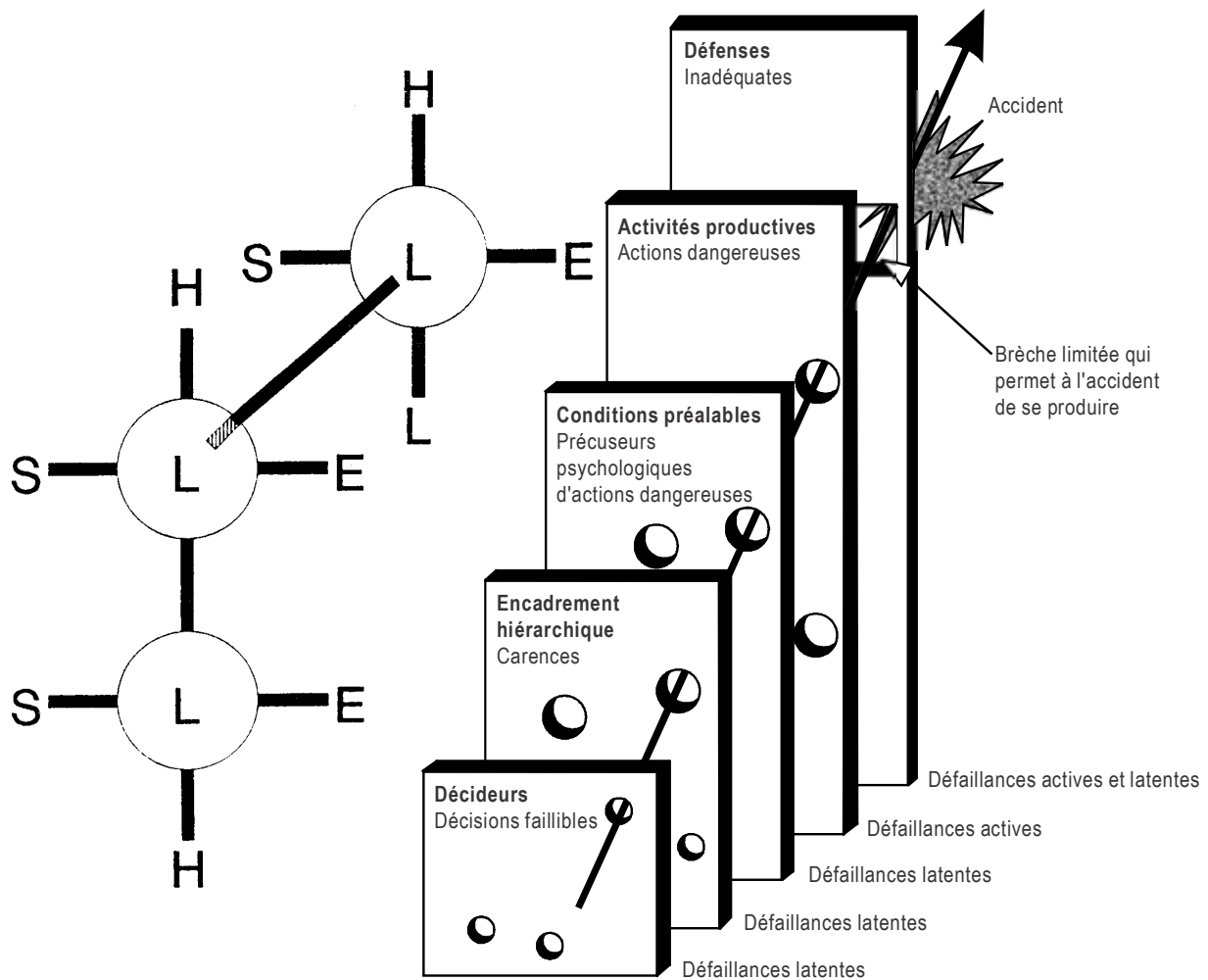


Figure III-16-12. Modèle hybride SHEL-Reason

Étape 4 — Identification des erreurs et des violations

Cette partie du processus, l'étape 4, est exécutée pour chaque action ou décision dangereuse et commence par une question simple : « Quelle est l'erreur qui a fini par rendre cette action ou cette décision dangereuse ? » L'identification du type d'erreur ou de violation comprend deux sous-étapes (Figure III-16-13).

- 1) *Action non intentionnelle ou intentionnelle.* Déterminer d'abord si l'erreur ou la violation était non intentionnelle ou intentionnelle. La personne avait-elle l'intention d'exécuter l'action ? Si la réponse à cette question est non, l'action n'est pas intentionnelle ; si la réponse est oui, l'action est intentionnelle.
- 2) *Erreur ou violation.* Déterminer l'erreur ou la violation qui décrit le mieux la défaillance, sans oublier la décision prise au sujet de l'intentionnalité. Il y a quatre catégories possibles: inadvertance, oubli, faute et violation.

- Une inadvertance est une action non intentionnelle dont l'erreur d'exécution est liée à l'attention.
- Un oubli est une action non intentionnelle liée à une défaillance de la mémoire.
- Une faute est une action intentionnelle, mais elle n'est pas une décision délibérée d'enfreindre une règle ou un plan.
- Une violation est une défaillance de la planification dans laquelle intervient une décision délibérée d'enfreindre une règle ou un plan.

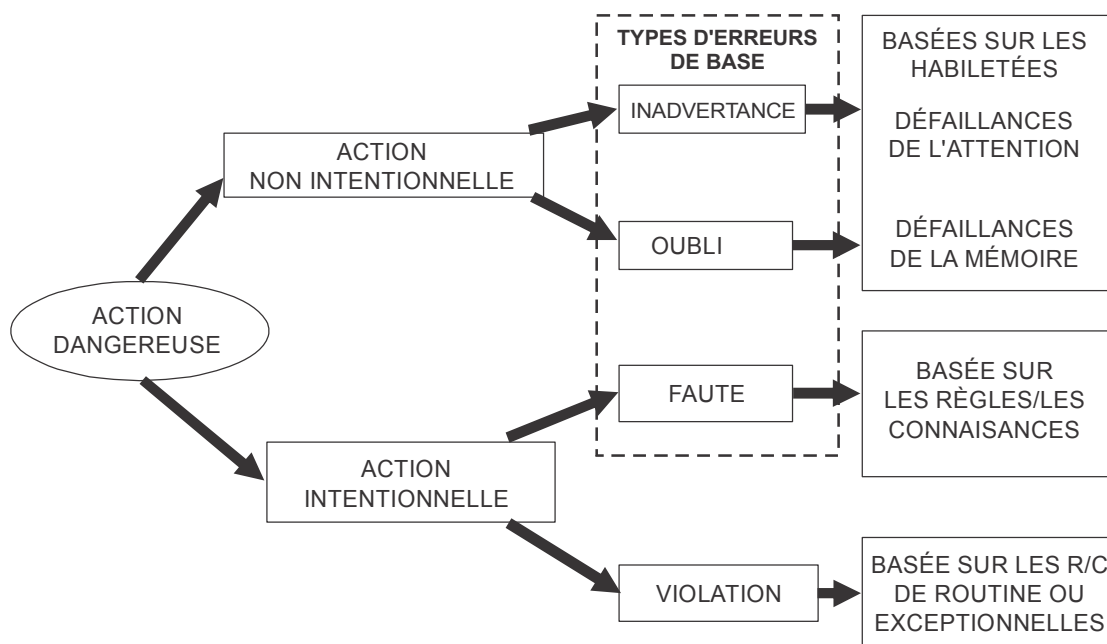


Figure III-16-13. Cadre GEMS (adapté de Reason, 1990)

Étape 5 — Identification des modes de défaillance

La séparation des activités que supposent les étapes 4 et 5 est quelque peu arbitraire par rapport à ce qui se produit réellement lorsque l'enquêteur essaie de découvrir la relation qui existe entre les erreurs ou violations liées à l'accident et les comportements qui y ont conduit. Défini simplement, un comportement se compose d'une décision et d'une action ou d'un mouvement. L'action ou la décision (c'est-à-dire une action ou une décision dangereuse) est identifiée à l'étape 3, et ce qui est erroné dans cette action ou cette décision est établi à l'étape 4. L'étape 5 consiste à identifier la décision qui a finalement conduit à l'action ou à la décision erronée établie à l'étape 3, en plaçant les erreurs (inadvertances, oublis et fautes) et les violations dans le contexte des performances (comportements) ; autrement dit, quelles étaient les performances de la personne au moment de la défaillance.

Le cadre GEMS facilite l'établissement de liens entre une erreur ou une violation et le niveau de performance d'une personne au moment où s'est produite la défaillance. En passant à l'étape suivante (Figure III-16-14), on commence à comprendre comment les erreurs et les violations sont liées à des défaillances de comportement courants (modes de défaillance) et ne sont pas nécessairement le résultat d'un comportement irrationnel.

Comme il est indiqué aux § 16.2.16 à 16.2.20, les erreurs et les violations sont mises en correspondance avec trois catégories de comportement. Ci-après une brève description et mise en correspondance des types d'erreurs et des violations pour chacun des trois niveaux de performance :

- 1) les inadvertances et les oublis se produisent dans le cadre des performances basées sur les habiletés ; les actions tendent à être accomplies sur la base de routines intégrées et il n'y a que peu ou pas de prise de décision consciente ;
- 2) les fautes se produisent dans le cadre des performances basées sur les règles ; les décisions sont fondées sur des procédures apprises ;
- 3) les fautes et les violations se produisent dans le cadre des performances basées sur les connaissances et l'expérience (pas de procédures établies), ce qui exige des évaluations.

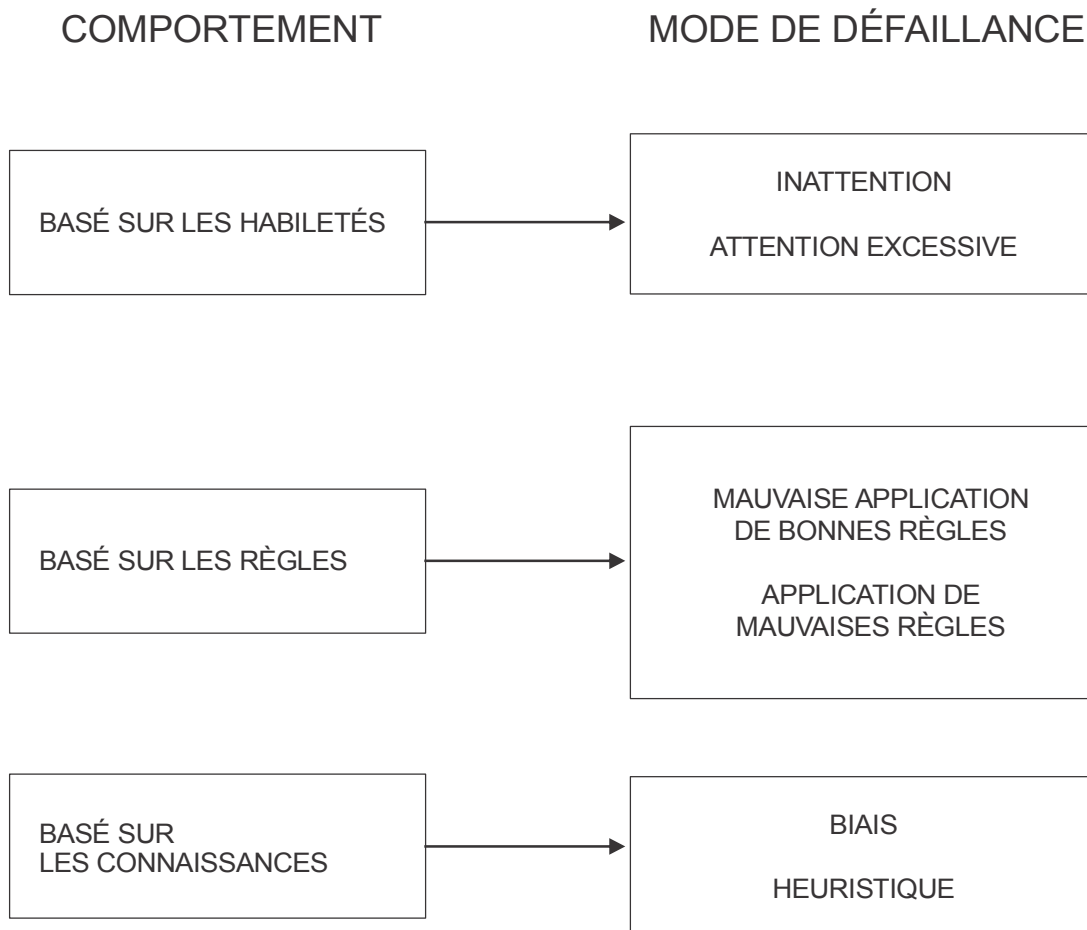


Figure III-16-14. Division du comportement en modes de défaillance

Il existe plusieurs modes de défaillance dans chaque niveau de performance (catégorie de comportement) ; (la Figure III-16-14 donne une description générale des modes de défaillance). Les erreurs et les violations identifiées à l'étape 4 peuvent être reliées à ces modes de défaillance à l'aide du cheminement illustré par les Figures III-16-13 et III-16-14. La liste des modes de défaillance spécifiques (ou groupes de comportements) est tirée de plusieurs sources (Norman, 1981; Norman, 1988; Weiner et Nagel, 1988; Reason, 1990) ; leur description figure à l'Appendice 1 au Chapitre 16.

Étape 6 — Identification des précurseurs de comportement

L'étape 5 portait sur l'identification des modes de défaillance, qui décrivent les mauvaises prises de décision ou les actions dangereuses. Pour déterminer les causes sous-jacentes et les facteurs contributifs d'une décision, d'une personne ou d'un groupe, il est important de déterminer s'il existe des facteurs dans le système de travail qui ont pu faciliter l'expression du mode de défaillance (et donc de l'erreur ou de la violation et de l'action dangereuse). Ces facteurs s'appellent des précurseurs de comportement.

Les trois niveaux de performance ou de comportement peuvent être divisés en défaillances de comportements courants, ou modes de défaillance. L'Appendice 1 au présent chapitre donne une description des modes de défaillance.

Les précurseurs de comportement peuvent être déterminés en examinant les informations sur le système de travail recueillies et organisées à l'aide des cadres SHEL, Reason ou LUC dans les étapes 1 et 2. Le réexamen de ces données montre encore une fois la nature itérative du processus d'enquête ; il peut même être estimé nécessaire d'approfondir l'enquête.

Étape 7 — Identification des problèmes de sécurité potentiels

L'identification des problèmes de sécurité potentiels est largement fondée sur les facteurs identifiés comme précurseurs de comportement, ce qui, une fois encore, souligne l'importance de procéder de manière systématique aux étapes 1 et 2 du processus, car elles sont la base des étapes suivantes de l'analyse. S'il y a lieu, les problèmes de sécurité potentiels peuvent être analysés plus avant pour déterminer les carences en matière de sécurité et les mesures de sécurité qui pourraient être recommandées.

Appendice 3 au Chapitre 16

Références

- Cox, S.J. et Tait, N.R.S. (1991), *Safety, reliability and risk management: An integrated approach*, Butterworth-Heinemann Ltd, Londres (Angleterre).
- Edwards, E. (1972), *Man and machine: Systems for safety*, Actes du symposium technique BALPA, Londres (Angleterre).
- Hawkins, F.H. (1987), *Human factors in flight*, Gower Technical Press Ltd., Hants (Angleterre).
- Hudson, P.T.W. (1991), *Prevention of accidents involving hazardous substances: The role of the human factor in plant operation*, Révision du document de discussion rédigé pour l'atelier de l'OCDE, Tokyo, 22-26 avril 1991, pp 17-56.
- Kennedy, R. (1994), *Can human reliability assessment (HRA) predict real accidents? A case study analysis of HRA, Proceedings of the Risk Assessment and Risk Reduction Conference*, Université Aston, 22 mars 1994.
- McCullough, E. et Hill, M. (1993), *Human Factors training for the investigator — A systems approach to transportation accident investigations*, Actes de la 26^e conférence annuelle de l'Association canadienne d'ergonomie, Fredericton (Nouveau-Brunswick), 8-11 août 1993, pp. 115-120.
- Norman, D.A. (1981), « Categorization of Action Slips », *Psychological Review*, Vol 88, N^o 1, janvier, pp. 1-15.
- Norman, D.A. (1988), *The psychology of everyday things*, Basic Books Inc, New York (NY), États-Unis.
- OACI. (1993), *Enquête sur les facteurs humains dans les accidents et incidents, Facteurs humains. Étude n^o 7*, (Cir 240).
- O'Hare, D., Wiggins, M., Batt, R. et Morrison, O. (1994), « Cognitive failure analysis for aircraft accident investigation, *Ergonomics* », Vol 37, N^o 11, pp. 1855-1869.
- Rasmussen, J. (1987), *The definition of human error and a taxonomy for technical system design*, édité par Rasmussen, J., Duncan, K. & Leplat, J., John Wiley & Sons, Toronto (Canada).
- Reason, J. (1990), *Human error*, Cambridge University Press, New York (NY), États-Unis.
- Reason, J. (1991), *Too little and too late: A commentary on accident and incident reporting systems, Near miss reporting as a safety tool*, éditions Van der Schaaf, T., Lucas, O. et Hale, A., Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford (Angleterre), pp. 9-26.
- Weiner, E.L. and Nagel, D.C. (1988), *Human factors in aviation*, Academic Press Inc, San Diego (CA), États-Unis.

Chapitre 17

SURVIE, ÉVACUATION, RECHERCHES, SAUVETAGE ET LUTTE CONTRE L'INCENDIE

17.1 INTRODUCTION

17.1.1 En général, le Groupe des facteurs de survie est chargé de recueillir des informations et de documenter les domaines suivants de l'enquête :

- a) impact et dynamique des occupants ;
- b) évacuation et survie ;
- c) recherches et sauvetage ;
- d) bien-être des survivants après l'évacuation ;
- e) configuration intérieure de l'aéronef ;
- f) dossiers de formation des membres d'équipage ;
- g) aspects relatifs aux lésions et à la surviabilité.

Il est également important pour le Groupe des facteurs de survie de travailler en étroite collaboration avec les autres groupes de l'enquête vu qu'un grand nombre de ces domaines de responsabilité se chevauchent.

17.1.2 De nombreux progrès ont été réalisés au cours des dernières décennies pour réduire le taux mondial d'accidents d'aviation. Les aviateurs, les transporteurs aériens, les associations professionnelles, les organismes de réglementation et les enquêteurs ont tous conjugué leurs efforts pour travailler à atteindre un taux d'accidents de zéro. La survie des occupants des aéronefs s'est aussi améliorée grâce aux perfectionnements suivants :

- a) sièges 16g ;
- b) blocage des sièges (protection contre l'incendie) ;
- c) niveaux de toxicité des matériaux utilisés dans la cabine ;
- d) formation des membres d'équipage de cabine ;
- e) procédures de lutte contre l'incendie en vol ;
- f) gestion des ressources en équipe (CRM) ;
- g) lumières de plancher.

Ces améliorations de la sécurité des cabines des aéronefs sont le résultat du travail constant des enquêteurs sur les accidents et de leurs homologues de l'industrie aéronautique.

17.1.3 La survie des occupants après un accident d'aviation est une question importante pour l'équipe d'enquête. Les informations recueillies dans le cadre d'une enquête exhaustive sur les facteurs de survie peuvent être utilisées dans les domaines de la formation, de la recherche, de la promotion de la sécurité et la prévention des accidents et des blessures, et peuvent grandement contribuer à améliorer la sécurité des vols dans le monde entier.

17.1.4 Ces objectifs ne peuvent être réalisés que lorsque le groupe peut disposer des bonnes compétences, notamment d'une personne spécialisée dans la sécurité des cabines. De nombreux rapports d'accidents où la survie était en jeu ne contiennent pas de renseignements sur la survie des occupants ; il est donc possible que des améliorations sur la sécurité aient pu être négligées.

17.1.5 De nombreux organismes d'enquête ont réglé ce problème en créant un poste d'enquêteur ayant des compétences spécialisées dans le domaine de la sécurité des cabines. Même si cette solution est la solution idéale, il n'est pas toujours possible de la mettre en pratique. Dans ce cas, une personne du transporteur aérien et/ou d'une association professionnelle devrait être détachée auprès du Groupe des facteurs de survie. Après l'enquête, les informations doivent être analysées et, s'il y a lieu, envoyées aux organismes de réglementation, constructeurs et experts de l'industrie dans le cadre d'une recommandation de sécurité, ce qui conduira à améliorer l'équipement, les procédures et la formation.

17.2 DÉTAILS DE L'ENQUÊTE

17.2.1 Les informations recueillies durant une enquête dépendent de l'ampleur et de la portée de l'enquête. Dans les accidents où les aspects relatifs à la survie jouent un rôle majeur des quantités considérables d'informations seront recueillies. Elles peuvent être réparties dans les catégories suivantes :

- a) informations générales sur le vol ;
- b) configuration de l'aéronef ;
- c) informations sur l'équipage de conduite ;
- d) informations sur l'équipage de cabine ;
- e) informations sur les passagers ;
- f) dommages subis par l'aéronef et description des lieux de l'accident ;
- g) constatations médicales et pathologiques ;
- h) réponse des équipes de lutte contre l'incendie après impact ;
- i) aspects relatifs à la survie ;
- j) entrevues.

Informations générales sur le vol

17.2.2 Les informations suivantes doivent être recueillies dès qu'elles sont disponibles :

- a) nom de l'exploitant ;
- b) lieu, date et heure de l'accident ;
- c) conditions météorologiques et altitude et manœuvres de l'aéronef ;
- d) liste des membres de l'équipage de conduite ;
- e) liste des membres de l'équipage de cabine ;
- f) manifeste des passagers, y compris leurs noms, l'affectation des places et les enfants en bas âge assis sur les genoux d'un adulte ;
- g) transcriptions ou résumés des transcriptions des enregistrements CVR et ATC, des données DFDR et des données de poursuite radar durant l'accident.

Configuration de l'aéronef

17.2.3 Avant de commencer l'enquête sur le terrain, il peut être utile :

- a) de déterminer le type et l'immatriculation de l'aéronef ;
- b) d'obtenir des dessins techniques du poste de pilotage ;
- c) d'obtenir des dessins techniques de la cabine qui montrent la configuration de la cabine et la disposition des sièges, le pas des sièges, les offices, les toilettes, l'emplacement des cloisons et les sorties d'urgence ;
- d) d'obtenir des copies des carnets de vol de l'aéronef et des carnets de bord de cabine ;
- e) d'obtenir les SOP du transporteur, les listes de vérifications et les procédures de formation pour le type d'urgence en cause ;
- f) d'examiner la phase de vol de l'aéronef, sa configuration estimée ou réelle et les manœuvres effectuées en vol.

Informations sur l'équipage de conduite

- 17.2.4
- a) Noms et titres ;
 - b) Dossier de la formation sur les opérations d'urgence.

Informations sur l'équipage de cabine

- 17.2.5
- a) Noms et titres ;
 - b) Dossier de la formation sur les opérations d'urgence.

Informations sur les passagers

- 17.2.6
- Liste et nombre de passagers à bord dans les catégories suivantes :
- a) hommes ;
 - b) femmes ;
 - c) enfants (de 25 mois à 16 ans) ;
 - d) enfants en bas âge (jusqu'à 24 mois) ;
 - e) personnes souffrant d'un handicap physique ou mental.

Dommages subis par l'aéronef et description des lieux de l'accident

17.2.7 Il est essentiel de recueillir des informations complètes sur l'aéronef et sur le voisinage du lieu de l'accident afin de déterminer comment se sont produits les blessures et les décès et pourquoi. La plus grande partie des informations obtenues durant cette partie de l'enquête sur les lieux de l'accident sera utilisée pour formuler des recommandations en vue d'améliorer la conception et le fonctionnement de l'équipement de sécurité et de l'intérieur des aéronefs. Si une recommandation de sécurité porte sur la surviabilité, ces informations devront pour la plupart être envoyées aux constructeurs d'équipement pour qu'ils effectuent une analyse plus complète et apportent des modifications au besoin.

17.2.8 Si les dommages sont le résultat d'une intervention illicite et d'une décompression explosive causée par des bombes ou des armes, il peut y avoir une enquête criminelle en plus de l'enquête de sécurité.

17.2.9 Procéder à une inspection générale des lieux avant de passer à un examen d'une partie spécifique du site de l'accident.

- a) *Poste de pilotage.* Faire une description de l'aménagement du poste de pilotage en utilisant les dessins techniques fournis par l'exploitant et le constructeur, des photos et des croquis, en portant une attention spéciale aux éléments suivants :
 - 1) état du tableau de bord, du socle des commandes et du tableau supérieur, notamment tout indice d'impact, les dommages causés par la chaleur et la direction et l'étendue des déformations ;
 - 2) état du volant et des pédales de palonnier, notamment les ruptures, les indices d'impact et la direction et l'étendue des déformations ;
 - 3) état des pare-brises, des fenêtres et des trappes d'évacuation, notamment les indices d'impact, les dommages causés par la chaleur ainsi que la direction et l'étendue des déformations. Inclure également l'état du mécanisme de verrouillage des trappes d'évacuation et des cordes/glissières d'évacuation ;

- 4) état des systèmes et de l'équipement de survie de l'équipage de conduite (masques antifumée, lunettes, masques à oxygène) ;
 - 5) état des sièges de l'équipage de conduite, notamment les indices d'impact, les dommages causés par la chaleur, la direction et l'étendue des déformations, l'intégrité des fixations de retenue et des rails des sièges, et la direction de rupture des éléments des sièges et des fixations ;
 - 6) prendre note du fabricant des sièges, de la date de fabrication, des numéros de modèle, du TSO applicable et de la charge nominale ;
 - 7) état des ceintures de sécurité de l'équipage de conduite, des harnais de sécurité, des mécanismes de déblocage et des enrouleurs à inertie ;
 - 8) prendre note du fabricant des dispositifs de retenue, de la date de fabrication, des numéros de modèles, du TSO applicable et des charges nominales ;
 - 9) noter la position des sièges de l'équipage de conduite d'après les dispositifs de réglage, les rails de fixation, etc. ;
 - 10) obtenir des photos de la visibilité dans le poste de pilotage au besoin ;
 - 11) état de la porte du poste de pilotage, notamment les indices de dommages causés par la chaleur, les blocages, la direction d'ouverture de la porte, l'état des serrures, l'état des panneaux d'évacuation et l'étendue des déformations ;
 - 12) état de l'équipement de sécurité du poste de pilotage : trousse de premiers soins, utilisation et support de l'extincteur, utilisation et support de la hache de secours ;
 - 13) position et état des bagages personnels, des sacs de vol et des documents ;
 - 14) effectuer les tests nécessaires sur l'équipement endommagé pour vérifier si les critères de conception étaient respectés durant l'accident.
- b) *Cabine des passagers.* Faire une description de la cabine en utilisant les dessins techniques fournis par l'exploitant et le constructeur, des photos et des croquis, en portant une attention spéciale aux éléments suivants :
- 1) dans le cas d'une décompression explosive et/ou d'une descente d'urgence, déterminer quelles étaient les zones de rupture et les résultats de ces ruptures. Déterminer si l'oxygène d'urgence a été utilisé et, dans l'affirmative, s'il y a eu des difficultés ;
 - 2) état général de la cabine, notamment les déformations, dommages causés par la chaleur, les ruptures de panneaux de plafond, des porte-bagages, des cloisons, du plancher, etc. Il est important de se rappeler que l'emplacement des éléments de la cabine peut être dû aux activités de sauvetage durant l'incendie après impact et non aux forces d'impact ;
 - 3) certains aéronefs sont équipés de surveillance et d'enregistrements vidéo pour des fins de sécurité. Lorsqu'il est présent, cet équipement est essentiel à l'enquête.

- c) *Issues*. Documenter les points suivants :
- 1) emplacement et état de toutes les issues. Étaient-elles ouvertes ou fermées ?
 - 2) emplacement de tous les hublots et issues de secours ;
 - 3) déploiement des cordes, des sangles ou des enrouleurs à inertie ;
 - 4) dommages causés aux issues et à la partie adjacente du fuselage ;
 - 5) position du levier de verrouillage/déverrouillage ;
 - 6) position de la barre de retenue ;
 - 7) position de la poignée de l'issue de secours ;
 - 8) état du dispositif d'assistance (noter la pression s'il y a lieu) ;
 - 9) espace d'assistance disponible à l'issue ;
 - 10) hauteur du seuil de porte au-dessus du sol, s'il y a lieu.
- d) *Dispositifs d'évacuation*. Documenter les éléments suivants :
- 1) position du dispositif : déployé, rangé, gonflé, dégonflé, retiré de l'aéronef ;
 - 2) nom du fabricant, date de fabrication, numéro du modèle, numéro de série, TSO applicable et date de la dernière révision ;
 - 3) dommages causés au toboggan ou au toboggan-radeau.
- e) *Équipement de secours*. À l'aide du manuel des membres de l'équipage de cabine, noter l'emplacement et l'état de l'équipement de secours dans la cabine. Noter le nom du fabricant, le numéro de modèle, le numéro de série, le TSO applicable, la date de la dernière révision et/ou la date d'expiration, s'il y a lieu, pour chaque pièce d'équipement de secours. Effectuer des tests fonctionnels sur chaque pièce d'équipement de secours si c'est possible. Documenter les éléments suivants :
- 1) lampes de poche ;
 - 2) mégaphones ;
 - 3) extincteurs ;
 - 4) inhalateur protecteur (PBE) ;
 - 5) hache de secours ;
 - 6) levier ;
 - 7) gants/vêtements de protection contre l'incendie ;
 - 8) rideaux antifumée ;

- 9) détecteurs de fumée ;
 - 10) extincteurs automatiques des boîtes à déchets des toilettes ;
 - 11) trousse de premiers soins ;
 - 12) trousses médicales ;
 - 13) défibrillateur ;
 - 14) émetteur de localisation d'urgence (ELT) ;
 - 15) bouteilles d'oxygène ;
 - 16) éclairage d'urgence (intérieur et extérieur, poste de pilotage et cabine).
- f) Documenter aussi l'état des supports et/ou des systèmes de fixation de tous les éléments indiqués ci-dessus.
- g) Si l'accident s'est produit sur un plan d'eau, l'état et l'emplacement des éléments suivants doit s'ajouter aux informations indiquées ci-dessus :
- 1) radeaux de sauvetage ou toboggans-radeaux ;
 - 2) dispositifs individuels de flottaison (vestes ou coussins) ;
 - 3) trousses de survie ;
 - 4) état de l'eau au moment de l'impact : hauteur des vagues, hauteur de la houle et température de l'eau.
- h) *Sièges des membres d'équipage de cabine et des passagers.* Documenter les points suivants :
- 1) état des sièges des membres d'équipage de cabine et des sièges des passagers, notamment les indices d'impact, les dommages causés par la chaleur, la direction et l'étendue des déformations, l'intégrité des fixations et des rails et la direction de la rupture des éléments des sièges et des fixations ;
 - 2) prendre note du fabricant des sièges, de la date de fabrication, des numéros de modèles, du TSO applicable et de la charge nominale ;
 - 3) état des systèmes de retenue des membres d'équipage de cabine et des passagers : ceintures de sécurité, harnais, mécanismes de déverrouillage et enrouleurs à inertie ;
 - 4) noter le nom du fabricant des dispositifs de retenue, la date de fabrication, les numéros de modèle, le numéro de série, le TSO applicable et les charges nominales.
- i) *Compartiments de rangement.* Documenter les éléments suivants :
- 1) état des porte-bagages, y compris les affichettes de limite de poids.
 - 2) état du mécanisme de verrouillage ;

- 3) poids et taille du contenu, s'ils sont disponibles ;
 - 4) état de toutes les armoires et compartiments, y compris les affichettes de limite de poids ;
 - 5) état des dispositifs de retenue ;
 - 6) poids et taille du contenu, s'ils sont disponibles.
- j) *Bagages à main*. Documenter les éléments suivants :
- 1) état et emplacement de tous les bagages à main trouvés dans la cabine (porte-bagages, rangement sous le siège, armoires, empilés près des issues) ;
 - 2) état et emplacement de tous les bagages occupant un fauteuil dans la cabine ;
 - 3) état des dispositifs de retenue utilisés ;
 - 4) noter le nom du fabricant du dispositif de retenue, la date de fabrication, le numéro de modèle, le numéro de série, le TSO applicable et les charges nominales ;
 - 5) état et emplacement des autres effets personnels trouvés dans la cabine, y compris les bagages des membres d'équipage de cabine.
- k) *Fret*.
- 1) Déterminer si la cabine est configurée pour l'exploitation combinée passagers/fret. Dans l'affirmative, déterminer si cette configuration a eu une incidence sur l'accident.
 - 2) Déterminer si le fret ou les bagages arrimés étaient un facteur dans l'accident. Dans l'affirmative, déterminer si les détecteurs et/ou les systèmes d'extinction d'incendie des compartiments ont été activés.
- l) *Systèmes de communication*. Noter le nom du fabricant, le numéro de modèle, le numéro de série, le TSO applicable, la date de la dernière révision et/ou la date d'expiration, selon le cas, pour chaque système de communication. Effectuer un test fonctionnel sur chaque système de communication, si possible. Décrire :
- 1) l'état du système d'annonces passagers ;
 - 2) état du système d'interphone ;
 - 3) état de l'alarme d'évacuation d'urgence, notamment la position des commutateurs.
- m) *Consignes de sécurité*. Documenter les éléments suivants :
- 1) teneur et méthode de présentation prévol des consignes de sécurité aux passagers (membre d'équipage de conduite à membre d'équipage de conduite, équipage de conduite à membre d'équipage de cabine, membre d'équipage de cabine aux passagers).
 - 2) teneur et méthode de présentation pour la rangée de sièges située près des sorties ;

- 3) teneur des cartes de consignes de sécurité : déterminer si elles étaient à bord de l'aéronef, si elles correspondaient à l'aéronef, si elles étaient accessibles, si elles étaient faciles à comprendre et s'il y en avait une pour chaque siège passager ;
 - 4) teneur de la vidéo sur la sécurité présentée aux passagers.
- n) *Offices*. Documenter les éléments suivants :
- 1) état et emplacement de tous les chariots, modules de rangement, espaces de rangement et dispositifs de verrouillage.
 - 2) état et emplacement de tous les rideaux, tringles et mécanismes d'arrimage ;
 - 3) état et emplacement des articles de service non fixés trouvés dans la cabine ;
 - 4) noter le nom du fabricant de l'office et le numéro de modèle de chaque pièce d'équipement de l'office ;
 - 5) obtenir une copie des plans d'arrimage de l'office afin de déterminer les restrictions de poids ;
 - 6) noter les antécédents de maintenance et les dossiers de défaillances.

17.2.10 Les informations recueillies durant la phase d'inspection des lieux de l'accident doivent être mises à la disposition des membres du Groupe des facteurs de survie qui interrogent les membres de l'équipage de cabine et les passagers afin d'obtenir des informations supplémentaires ou des éclaircissements.

17.3 CONSTATATIONS MÉDICALES ET PATHOLOGIQUES

Le Groupe des facteurs de survie doit travailler en étroite collaboration avec le groupe chargé des questions médicales et pathologiques de l'enquête afin de déterminer les causes des blessures/décès des membres d'équipage et des passagers. Les types de blessures subies par les membres de l'équipage de conduite et de l'équipage de cabine peuvent indiquer des ruptures d'équipement et orienter la poursuite de l'enquête. Voir le Chapitre 18 pour plus de détails sur l'examen pathologique.

17.4 ÉQUIPES D'INTERVENTION

17.4.1 Cet aspect de l'enquête relève normalement du Groupe des facteurs de survie. Consulter d'autres groupes au besoin car de nombreux points sur la survie des occupants sont liés aux recherches d'autres groupes tels que le Groupe des structures.

Opérations de recherche et de sauvetage

17.4.2 Documenter les opérations de recherche et de sauvetage, particulièrement si l'accident s'est produit dans une région isolée.

- a) Noter les problèmes rencontrés durant les opérations de sauvetage.
- b) Noter la méthode utilisée pour notifier les équipes de sauvetage, à quel moment elles ont été appelées et par qui.
- c) Noter le nombre d'intervenants et conduire des entrevues s'il y a lieu.
- d) Noter le type et le nombre d'équipes de sauvetage.
- e) Noter les délais d'intervention.
- f) Noter où ont été trouvés les occupants et où ils ont été conduits.
- g) Noter combien d'occupants ont été trouvés vivants et combien de victimes ont été retirées de l'épave.
- h) Noter le temps requis pour exécuter les opérations de sauvetage.
- i) Obtenir des rapports de tous les organismes d'intervention participants.
- j) Déterminer la date du dernier exercice aéroportuaire de secours en cas d'accident exécuté par le personnel de sauvetage et obtenir une copie du rapport.

Note.—Un autre avantage de cette documentation est qu'elle peut être utilisée pour répondre à certains besoins de formation des équipes de secours.

Intervention de la police

- 17.4.3
- a) Noter l'intervention du service de police local.
 - b) Obtenir les photos prises sur les lieux de l'accident.
 - c) Noter le nombre d'unités qui sont intervenues, les délais de réponse et le nombre d'intervenants.
 - d) Décrire le périmètre de sécurité et tout problème qui s'y rattache.
 - e) Noter les problèmes de contrôle de la circulation.
 - f) Déterminer la date du dernier exercice aéroportuaire faisant intervenir le personnel de lutte contre l'incendie et obtenir une copie du rapport.
 - g) Interroger les intervenants au besoin.
 - h) Obtenir les rapports de police sur l'accident.

Intervention des services médicaux

- 17.4.4
- a) Documenter la méthode utilisée pour notifier les hôpitaux locaux, à quel moment ils ont été appelés et par qui.
 - b) Déterminer si le personnel médical est venu sur les lieux de l'accident et, dans l'affirmative, à quel moment.
 - c) Déterminer si un centre de tri a été mis sur pied sur les lieux de l'accident.
 - d) Noter les services assurés par les hôpitaux locaux.
 - e) Documenter les difficultés rencontrées par les intervenants médicaux.
 - f) Interroger le personnel médical au besoin.
 - g) Obtenir des copies des plans hospitaliers en cas de catastrophe.
 - h) Déterminer la date du dernier exercice aéroportuaire en cas de catastrophe faisant intervenir les hôpitaux et obtenir une copie du rapport.
 - i) Obtenir les rapports des hôpitaux sur l'accident.
 - j) Décrire la répartition et la disposition des blessés.
 - k) Déterminer si une assistance après stress traumatique a été offerte aux membres d'équipage et aux passagers.

Intervention de la communauté/de l'aéroport en cas de catastrophe

- 17.4.5
- a) Décrire les plans de la communauté/de l'aéroport en cas de catastrophe, qui leur a permis d'intervenir après l'accident ; indiquer l'absence de plans.
 - b) Déterminer la date des exercices de secours en cas de catastrophe.
 - c) Obtenir une copie des rapports.
 - d) Documenter les difficultés rencontrées durant l'intervention après l'accident.
 - e) Obtenir des copies de tous les plans d'intervention en cas de catastrophe, des rapports d'intervention et des observations des services de planification locaux applicables à l'accident.
 - f) Interroger le personnel d'intervention au besoin.
 - g) Décrire le poste de commande, l'équipement et les communications et documenter les difficultés rencontrées.

Intervention des services d'incendie

- 17.4.6
- a) Documenter les opérations de lutte contre l'incendie, à l'aéroport ou à l'extérieur de l'aéroport, à partir du moment de la notification jusqu'au départ de l'équipement des lieux de l'accident.
 - b) Documenter les problèmes rencontrés durant les opérations de lutte contre l'incendie.
 - c) Documenter la méthode utilisée pour notifier les services d'incendie, à quel moment ils ont été appelés et par qui.
 - d) Noter le nom du commandant des opérations d'intervention sur les lieux de l'accident.
 - e) Décrire le poste de commandement au besoin.
 - f) Décrire la méthode de communication utilisée par les pompiers.
 - g) Documenter les difficultés rencontrés pour accéder au site.
 - h) Décrire les conditions sur les lieux de l'accident à l'arrivée des pompiers.
 - i) Obtenir un croquis ou une carte des lieux montrant les routes d'accès, les pistes, l'emplacement des véhicules, la direction du vent, etc.
 - j) Décrire l'origine et la propagation de l'incendie.
 - k) Noter la quantité et le type de carburant à bord de l'aéronef.
 - l) Noter le nombre d'intervenants et les interroger au besoin.
 - m) Déterminer le nombre, les dimensions, le type et le débit des lances à main utilisées.
 - n) Documenter les difficultés rencontrées par les pompiers lorsqu'ils ont essayé de pénétrer dans l'aéronef.
 - o) Déterminer si les pompiers connaissaient le type d'aéronef.
 - p) Déterminer si les pompiers connaissaient les fonctions d'évacuation d'urgence dont étaient chargés les membres de l'équipage de cabine/de conduite.
 - q) Déterminer le temps entre l'arrivée du premier véhicule d'intervention incendie et le moment où se sont terminées les opérations de lutte contre l'incendie.
 - r) Déterminer la date du dernier exercice aéroportuaire du personnel de lutte contre l'incendie et obtenir une copie du rapport.
 - s) Obtenir des rapports de tous les organismes participant à la lutte contre l'incendie.
 - t) Noter le nombre et le type des véhicules d'intervention, décrire le personnel à bord des véhicules et noter le temps de déplacement, la distance au site de l'accident, la capacité en agent extincteur et les quantités utilisées.
 - u) Documenter toute carence en matériel et tout manque de ressources.

Bien-être des survivants après l'évacuation

- 17.4.7
- a) Documenter les problèmes rencontrés après l'évacuation.
 - b) Déterminer les méthodes utilisées pour conduire les passagers et l'équipage jusqu'à un endroit sûr.
 - c) Déterminer qui est responsable de cette tâche.
 - d) Déterminer quels services de premiers soins étaient offerts dans l'aire de réception des passagers.
 - e) Déterminer qui est responsable de la sécurité des passagers après l'accident.
 - f) Déterminer quel organisme est responsable de l'ensemble des opérations.
 - g) Déterminer s'il existe un plan d'aide aux familles à la compagnie aérienne et/ou à l'aéroport.
 - h) Déterminer quelle formation est donnée au personnel des services d'assistance en escale dans une situation de partage de codes.
 - i) Déterminer si le personnel qui ne fait pas partie des services d'intervention est formé pour intervenir en cas d'accident.
 - j) Déterminer si un personnel religieux est disponible pour les survivants et les familles.
 - k) Déterminer s'il y a un endroit loin de la presse où les familles et les survivants peuvent se retrouver.
 - l) Déterminer s'il existe des contrôles des membres de la presse.
 - m) Déterminer comment est effectué le retour des effets personnels des passagers.
 - n) Déterminer qui est chargé de mettre en place une morgue.
 - o) Déterminer qui est chargé de notifier les familles et si cette tâche a été effectuée correctement.
 - p) Déterminer qui est responsable d'appliquer les restrictions dans l'espace aérien au-dessus du site de l'accident.

17.5 ENTREVUES

17.5.1 Il convient de tenir des entrevues pour établir les causes de l'accident. L'objectif de ces entrevues est de prévenir les accidents et non la détermination des fautes ou des responsabilités. La législation locale peut cependant ne pas prévoir de protection contre le mauvais usage des déclarations des témoins. Les enquêteurs doivent connaître les obligations législatives locales.

Membres d'équipage

Équipage de conduite

17.5.2 Le Groupe de l'exploitation et le Groupe des facteurs humains sont les groupes principalement chargés d'interroger les membres de l'équipage de conduite. Le Groupe des facteurs de survie doit être préparé à participer aux entrevues ou à fournir des questions aux autres groupes. Il faut traiter les points suivants :

- a) Avant de commencer une entrevue, déterminer si les membres de l'équipage de conduite ont vu un médecin.
- b) Documenter les dysfonctionnements d'équipements et les avertissements qui se sont déclenchés avant ou durant la situation d'urgence.
- c) Documenter la formation des membres de l'équipage de conduite aux interventions d'urgence et aux procédures d'évacuation.
- d) Noter quand et comment l'urgence a été notifiée à l'équipage de conduite.
- e) Noter toute autre interaction avec les membres de l'équipage de conduite.
- f) Documenter les problèmes de communication rencontrés par suite du verrouillage de la porte du poste de pilotage.
- g) Documenter les fonctions et les responsabilités des membres de l'équipage de conduite durant l'évacuation.
- h) Noter si les membres de l'équipage de conduite ont pu exécuter leurs tâches en ce qui concerne l'évacuation.
- i) Documenter les efforts déployés par les membres de l'équipage de conduite pour aider les passagers durant l'évacuation.
- j) Noter de quelle manière et à quel moment les membres de l'équipage de conduite ont évacué l'aéronef.
- k) Noter toute observation faite par les membres de l'équipage de conduite sur l'intervention après l'accident ou l'incendie ou sur le comportement des passagers.
- l) Déterminer si le pilote sait si le transporteur aérien a assuré une formation CRM pour l'équipage de conduite et l'équipage de cabine.
- m) Résoudre toute question soulevée par les transcriptions des enregistrements du CVR, DFDR et ATC.

Équipage de cabine

17.5.3 Avant de commencer l'entrevue, déterminer si les membres de l'équipage de cabine ont vu un médecin. Le Groupe des facteurs de survie est le groupe principalement chargé d'interroger les membres de l'équipage de cabine ; il est possible que d'autres groupes veuillent participer aux entrevues ou lui soumettre des questions. Il faut donner à chaque membre de l'équipage de cabine l'occasion de décrire ce qui lui est arrivé, sans être interrompu. Obtenir des éclaircissements au besoin ainsi que les renseignements suivants :

a) Renseignements personnels :

- 1) Nom, adresse professionnelle, numéro de téléphone et adresse courriel.
- 2) Sexe, âge, taille et poids.
- 3) Heures ou années d'expérience sur le type d'aéronef accidenté.
- 4) Formation des membres de l'équipage de cabine aux interventions d'urgence et aux évacuations.
- 5) Poste occupé (membre de l'équipage de cabine, commissaire de bord, chef d'équipe, etc.).
- 6) Autres types d'aéronefs pour lesquels le membre de l'équipage de cabine est actuellement qualifié.
- 7) Nombres d'années d'expérience à titre de membre d'équipage de cabine avec le transporteur actuel et le transporteur précédent.
- 8) Horaire de vol et de service pendant les 72 heures qui ont précédé l'accident.
- 9) Aliments et boissons consommés au cours des 24 heures qui ont précédé l'accident
- 10) Cycle sommeil/veille au cours des 7 jours qui ont précédé l'accident.
- 11) Antécédents médicaux et état de santé actuel.
- 12) Médicaments pris au moment de l'accident.
- 13) Médicaments pris au moment de l'entrevue.
- 14) Temps de déplacement pour se rendre à l'aéroport.
- 15) Noter si le membre d'équipage de cabine a subi des blessures et quand et comment elles se sont produites.

b) Activités prévol et en vol. Demander au membre de l'équipage de conduite de décrire :

- 1) Le briefing prévol. Quelles informations ont été données, qui y a pris part, qui a présenté l'exposé.
- 2) Le briefing prévol avec les pilotes.
- 3) Les vérifications de sécurité prévol.
- 4) Les systèmes de cabine qui étaient hors fonctionnement au début du vol ou pendant le vol.
- 5) Les interactions avec le personnel de maintenance, le personnel de service au sol, le personnel du service à la clientèle et/ou les pilotes, qui pourraient être utiles pour l'enquête.
- 6) Quelle place occupaient dans la cabine les passagers ayant des besoins particuliers ou les enfants voyageant seuls.
- 7) La procédure d'information des passagers nécessitant une attention particulière.

- 8) L'exposé sur les issues de secours fait aux passagers.
 - 9) Si les exposés ont été faits avant le repoussage de l'aéronef.
 - 10) L'exposé sur les consignes de sécurité présenté aux passagers.
 - 11) Si les passagers étaient attentifs.
 - 12) La quantité de bagages de cabine et leur rangement.
 - 13) Les activités dans la cabine avant le départ de l'avion et tout problème rencontré.
 - 14) Les procédures d'armement des portes.
 - 15) Le siège de service qu'il a utilisé au décollage/à l'atterrissage ?
 - 16) Comment il était assis durant le décollage et l'atterrissage.
 - 17) Le système de retenue et comment il a été utilisé.
 - 18) Les procédures prédécollage et préatterrissage de préparation aux urgences.
 - 19) La quantité d'alcool servi avant et durant le vol.
- c) Informations sur l'accident. Demander au membre de l'équipage de conduite de décrire :
- 1) Comment, quand et par qui il a été notifié du problème.
 - 2) Les renseignements qui lui ont été fournis
 - 3) Tout problème posé par le verrouillage de la porte du poste de pilotage.
 - 4) La place qu'il occupait dans la cabine au moment où il a été informé.
 - 5) Comment, quand et par qui les passagers ont été informés.
 - 6) Les réactions des passagers.
 - 7) La préparation de la cabine pour faire face à l'accident.
 - 8) S'il a été capable de fournir des informations supplémentaires aux passagers ayant des besoins particuliers et aux enfants voyageant seuls.
 - 9) L'accident.
 - 10) L'impact.
 - 11) Les ordres d'évacuation.
 - 12) Les positions de protection des passagers et de l'équipage de cabine.
 - 13) Sa position de protection.
 - 14) La sécurité des éléments de la cabine dans sa zone.
 - 15) Tout problème posé par son siège ou son dispositif de retenue.

- 16) L'équipement de sécurité utilisé durant la préparation de la cabine, comment et pourquoi il a été utilisé et s'il a été efficace.
 - 17) Sa vue de la cabine et si elle était obstruée, d'expliquer pourquoi.
- d) Évacuation. Demander au membre de l'équipage de conduite de décrire :
- 1) Comment il a été décidé de procéder à l'évacuation :
 - i) ordres du commandant de bord ;
 - ii) décision personnelle ;
 - iii) alarme d'évacuation ;
 - iv) annonce aux passagers ; ou
 - v) ordres des pompiers.
 - 2) L'évacuation.
 - 3) S'il a ouvert une porte et si c'était celle qui lui avait été assignée.
 - 4) S'il n'a pas ouvert de porte, d'expliquer pourquoi.
 - 5) S'il avait une vue directe sur la sortie principale/secondaire depuis son siège de service.
 - 6) S'il a évalué les conditions extérieures avant d'ouvrir la porte.
 - 7) Tout problème rencontré dans l'évaluation des conditions extérieures, l'ouverture de la porte ou le déploiement/gonflage du toboggan d'évacuation.
 - 8) S'il a vu un éclairage d'urgence à l'intérieur ou à l'extérieur.
 - 9) L'éclairage intérieur et extérieur.
 - 10) Le comportement et les réactions des passagers durant l'évacuation.
 - 11) Si les passagers ont essayé d'emporter leur bagage de cabine avec eux.
 - 12) Toute assistance des passagers durant l'évacuation.
 - 13) Les problèmes posés par les passagers durant l'évacuation, y compris les passagers ayant des besoins particuliers et les enfants voyageant seuls.
 - 14) Quelle a été la durée de l'évacuation.
 - 15) Sur quoi se base son estimation.

Note.— Les estimations de temps ne sont pas fiables à moins qu'elles puissent être vérifiées par des données empiriques.
 - 16) S'il a vu d'autres membres d'équipage évacuer l'aéronef et s'il a vu quelles issues ils avaient empruntées.

- 17) Tout équipement de secours qu'il a utilisé, comment il l'a utilisé et s'il a été utile.
- 18) Les activités des membres de l'équipage de conduite à l'extérieur de l'aéronef.
- 19) Les activités des pompiers.
- 20) S'il a été transporté à un hôpital ou à un centre médical et comment il y a été transporté.
- 21) La durée des opérations de sauvetage.
- 22) Son uniforme et s'il était adapté à l'évacuation.

17.5.4 *Turbulence, fumée, feu, émanations ou contact avec l'eau.* Si une de ces conditions était présente, ajouter les questions suivantes à celles qui sont indiquées ci-dessus. Demander au membre de l'équipage de conduite de décrire :

- a) Turbulence.
 - 1) Ses procédures de communication établies en prévision de la turbulence prévue.
 - 2) Les procédures de communication utilisées durant cet événement.
 - 3) S'il a reçu un avertissement avant de ressentir la turbulence.
 - 4) Comment, quand et par qui l'alarme a été donnée.
 - 5) Si la consigne lumineuse de ceinture de sécurité était allumée et, si oui, pendant combien de temps.
 - 6) S'il a été annoncé aux passagers de demeurer assis.
 - 7) Si les passagers ont obéi aux consignes.
 - 8) S'il était assis et portait sa ceinture de sécurité et, si non, pourquoi.
 - 9) Où il se trouvait pendant la turbulence.
 - 10) Quels problèmes a posé l'équipement de rangement avant, pendant et après la turbulence.
 - 11) S'il a été blessé et les blessures qu'il a subies.
 - 12) S'il a été capable d'aider d'autres personnes après la turbulence.
 - 13) Les blessures subies par d'autres membres d'équipage et les passagers.
 - 14) Les communications avec le poste de pilotage après la turbulence.
- b) Fumée, incendie ou émanations durant le vol.
 - 1) Quand, où et comment il s'est rendu compte de la présence de fumée, de feu ou d'émanations dans la cabine.
 - 2) Quand, où et comment il s'est rendu compte de la présence d'émanations dans la cabine.
 - 3) Ce qu'il a vu, senti ou entendu (couleur, densité, odeur).

- 4) Si les conditions ont augmenté, diminué ou changé durant l'événement.
 - 5) S'il a éprouvé des difficultés à respirer et s'il a utilisé un PBE ou tout autre type de protection respiratoire.
 - 6) L'utilisation d'extincteurs, le cas échéant.
- c) Amerrissage forcé/accidentel :
- 1) Quand et comment il s'est rendu compte que l'aéronef était dans l'eau.
 - 2) Les problèmes rencontrés dans le déploiement et le gonflage des toboggans-radeaux ou des radeaux de sauvetage et dans l'embarquement.
 - 3) Quel type de vêtement de flottaison individuel il a utilisé et où il se l'est procuré.
 - 4) S'il a éprouvé des difficultés à obtenir ou à enfiler le vêtement de flottaison.
 - 5) Quel vêtement de flottaison individuel ont utilisé les passagers.
 - 6) Si les passagers ont eu des problèmes à trouver ou à enfiler leurs vêtements de flottaison.
 - 7) Quand les passagers ont gonflé leurs gilets de sauvetage.
 - 8) S'il a emporté un équipement de secours dans le radeau.
 - 9) S'il a retiré et déployé l'ELT.
 - 10) Qui a pris le commandement à bord du toboggan-radeau ou du radeau de sauvetage où il se trouvait.
 - 11) Si les autres membres d'équipage étaient à bord du même radeau.
 - 12) Les procédures de survie en mer utilisées.
 - 13) Les opérations de sauvetage.

Formation

17.5.5 Demander au membre de l'équipage de cabine de décrire :

- a) Sa formation initiale et périodique aux interventions en cas d'urgence.
- b) Si la formation initiale comprenait des éléments de base en aérodynamique et en performances des aéronefs.
- c) Quand a eu lieu sa dernière formation périodique.
- d) Quand a eu lieu son dernier exercice d'évacuation, en quoi il consistait et quelle en est la fréquence.
- e) Sa formation à la lutte contre l'incendie.
- f) Sa formation initiale et périodique à l'amerrissage forcé.

- g) S'il a déjà participé à un exercice d'amerrissage forcé sur un plan d'eau et, dans l'affirmative, en quoi consistait l'exercice.
- h) Toute formation pratique qu'il a eue à l'utilisation de l'équipement de secours.
- i) S'il a participé à la CRM avec les pilotes ou d'autres personnes de la même compagnie.
- j) En quoi consistait la formation.
- k) S'il estime que la formation l'a préparé à l'accident.

Autres observations

17.5.6 S'il y a lieu, demander aux membres de l'équipage de conduite interrogés d'indiquer :

- a) Si une assistance après stress traumatique leur a été offerte ; dans l'affirmative, s'ils y ont participé et si elle leur a été utile. Dans la négative, pourquoi ils n'y ont pas participé et s'ils ont cherché à obtenir une autre aide.

Note.— Cette assistance comprend normalement une séance initiale et des séances de suivi trois et six mois plus tard.

- b) Si, après leur expérience, ils pouvaient proposer des améliorations à apporter à la formation, aux procédures ou à l'équipement.
- c) S'ils ont d'autres observations qui pourraient aider l'enquête sur cet accident.

Passagers

17.5.7 a) Obtenir les renseignements personnels suivants de chaque passager interrogé :

- 1) Nom, sexe, âge, taille et poids.
- 2) Adresse.
- 3) Numéros de téléphone et adresse courriel.
- 4) Occupation.
- 5) Expérience en aviation.
- 6) Numéro et emplacement du siège.
- 7) Handicap l'empêchant de sortir de l'aéronef.
- 8) Langues parlées.
- 9) Description des blessures et comment il a été blessé.

- b) Préparations prévol. Demander au passager de décrire :
- 1) Le poids, les dimensions et l'emplacement de rangement de ses bagages de cabine.
 - 2) L'exposé sur les consignes de sécurité avant le départ.
 - 3) Qui a présenté l'exposé et s'il a compris les informations données.
 - 4) Si son siège était au-dessus de l'aile, s'il a reçu les consignes de sécurité pour la rangée de sièges située près des sorties.
 - 5) Les informations reçues.
 - 6) S'il a compris les informations.
 - 7) S'il a lu la carte de consignes de sécurité.
 - 8) S'il a compris les informations données par la carte.
 - 9) S'il a pris note d'une ou de plusieurs sorties situées près de son siège.
 - 10) S'il a utilisé une méthode pour trouver la sortie dans l'obscurité, par ex. s'il a compté le nombre de rangées de sièges pour atteindre la sortie.
 - 11) Toute observation sur la maintenance, le personnel de service au sol, le personnel du service passagers ou l'équipage de conduite qui pourrait aider l'enquête.
 - 12) Les vêtements et les chaussures qu'il portait au moment de l'accident.
- c) Renseignements sur l'accident. Demander au passager de décrire :
- 1) Quand et comment il a appris qu'il y avait un problème.
 - 2) Où il se trouvait lorsqu'il a appris qu'il y avait un problème.
 - 3) Comment l'équipage a préparé la cabine pour faire face à l'urgence.
 - 4) Si des instructions lui ont été données par le système d'annonce passagers ou par un membre d'équipage.
 - 5) Si les instructions ont été données en criant.
 - 6) Sa position pour faire face à l'impact.
 - 7) S'il a entendu des ordres donnés en criant.
 - 8) Ce qu'il a entendu.
 - 9) Si l'information était utile.
 - 10) S'il voyageait avec des enfants en bas âge ou enfants plus vieux.
 - 11) Son système de retenue.
 - 12) S'il portait un dispositif de retenue pour enfant en bas âge.

- 13) S'il a eu des problèmes avec la ceinture de sécurité et lesquels.
 - 14) Jusqu'à quel point il avait serré sa ceinture de sécurité.
 - 15) S'il a eu des problèmes à détacher sa ceinture de sécurité.
 - 16) S'il a enlevé ses chaussures ou s'il les portait durant l'impact et l'évacuation.
 - 17) L'impact et ce qui lui est arrivé.
 - 18) Si quelque chose est arrivée à son siège durant l'impact.
 - 19) S'il est resté en position de protection durant l'impact et, si non, pourquoi.
 - 20) S'il est resté assis jusqu'à l'arrêt de l'aéronef et, si non, pourquoi.
 - 21) S'il a remarqué les actions d'autres passagers durant l'impact.
- d) Évacuation. Demander au passager de décrire :
- 1) Quelle sortie il a pris et pourquoi.
 - 2) S'il a eu des problèmes pour atteindre la sortie et lesquels.
 - 3) S'il a essayé d'emporter quelque chose avec lui lorsqu'il est sorti de l'aéronef et, dans l'affirmative, ce qu'il a pris.
 - 4) Si on lui a demandé d'aider à effectuer l'évacuation.
 - 5) S'il a aidé quelqu'un sans qu'on le lui demande.
 - 6) S'il a ouvert une issue. Dans l'affirmative, laquelle et s'il a eu des problèmes à l'ouvrir et à l'utiliser.
 - 7) S'il a remarqué les actions d'autres passagers.
 - 8) S'il a vu un éclairage dans la cabine. Dans l'affirmative où étaient situées les lumières et si elles lui ont facilité l'évacuation.
 - 9) Combien de temps il a mis pour sortir de l'aéronef.
 - 10) Sur quoi il base son estimation.
 - 11) Ce qu'il a vu, senti ou entendu durant l'évacuation.
 - 12) Ce qu'il a vu en sortant de l'aéronef.
 - 13) Combien de temps ont mis les secouristes pour arriver sur les lieux de l'accident.
 - 14) Les opérations de sauvetage.
 - 15) S'il a été blessé et comment il a été blessé.
 - 16) Si quelqu'un l'a aidé (membre de l'équipage de cabine, secouriste, d'autres passagers).
 - 17) Comment on l'a aidé et s'il a eu besoin d'aide additionnelle.

e) Turbulence, fumée, feu, émanations ou contact avec l'eau. Si une quelconque de ces situations s'est produite, obtenir les informations supplémentaires suivantes.

1) Turbulence. Demander au passager de décrire :

- i) Où il se trouvait quand la turbulence s'est produite.
- ii) Si sa ceinture de sécurité était attachée et, si non, pourquoi.
- iii) Si la consigne de ceinture de sécurité était allumée.
- iv) S'il a entendu une annonce concernant les ceintures de sécurité et, dans l'affirmative, ce qu'il a entendu.
- v) S'il sait qui a fait l'annonce (membre de l'équipage de cabine ou membre de l'équipage de conduite).
- vi) S'il a été blessé et les blessures qu'il a subies.
- vii) S'il a reçu les premiers soins et qui les lui a donnés.
- viii) S'il voyageait avec un enfant en bas âge.
- ix) Si l'enfant portait un dispositif de retenue.
- x) Si l'enfant a été blessé et les blessures qu'il a subies.
- xi) S'il y a eu une annonce au début du vol concernant l'utilisation des ceintures de sécurité durant le vol et, dans l'affirmative, ce qu'il a entendu.

2) Fumée, feu, émanations. Demander au passager de décrire :

- i) Quand il s'est rendu compte qu'il y avait un problème.
- ii) Où il se trouvait lorsqu'il s'est rendu compte qu'il y avait un problème.
- iii) Où il se trouvait lorsqu'il a vu la fumée ou le feu.
- iv) Ce qu'il a vu, senti ou entendu (couleur, densité, odeur, bruit).
- v) Si les conditions ont changé durant l'accident.
- vi) S'il a eu des difficultés à respirer et ce qu'il a fait pour se protéger.
- vii) S'il a vu une procédure de lutte contre l'incendie en vol et, si oui, ce qu'il a vu et entendu.
- viii) S'il a vu les procédures de lutte contre l'incendie au sol et, si oui, ce qu'il a vu.

3) Amerrissage forcé/accidentel. Demander au passager de décrire :

- i) Quand il s'est rendu compte que l'évacuation allait se faire dans l'eau.
- ii) Quels types de dispositifs de flottaison étaient disponibles.
- iii) S'il a pu trouver et enfiler un gilet de sauvetage.

- iv) Où il était situé.
 - v) S'il a eu des problèmes à le retirer de son rangement.
 - vi) S'il a été capable de l'enfiler.
 - vii) Quand il a gonflé son gilet de sauvetage.
 - viii) Si son gilet a fonctionné correctement.
 - ix) S'il voyageait avec un enfant en bas âge ou un autre enfant, si on lui a fourni un gilet de sauvetage pour l'enfant.
 - x) S'il a utilisé le coussin du siège pour flotter.
 - xi) Comment il a utilisé le coussin et s'il était efficace.
 - xii) S'il est monté à bord d'un radeau de sauvetage ou d'un toboggan-radeau.
 - xiii) S'il a eu des difficultés.
 - xiv) Le type de radeau ou de toboggan-radeau dans lequel il est monté.
 - xv) Si le radeau était muni d'équipement de survie et s'il a été utilisé.
 - xvi) Combien de personnes se trouvaient à bord du radeau/toboggan-radeau.
 - xvii) S'il y avait des membres d'équipage à bord du radeau.
 - xviii) Les conditions de l'eau.
 - xix) Les conditions météorologiques.
 - xx) Les opérations de sauvetage.
- 4) Autres observations. Demander au passager d'indiquer :
- i) Si une assistance après stress traumatique lui a été offerte ; dans l'affirmative, s'il y a participé et si elle lui a été utile. Dans la négative, pourquoi il n'y a pas participé.
 - ii) Si, après son expérience, il pouvait proposer des améliorations à apporter aux procédures ou à l'équipement.
 - iii) S'il a d'autres observations qui pourraient aider l'enquête sur cet accident

17.5.8 On ne peut jamais trop insister sur l'importance de la survie des occupants après un accident. Les informations recueillies durant l'enquête sur les facteurs de survie peuvent être utilisées pour améliorer la sécurité des vols et augmenter la surviabilité lors d'autres accidents. Dans un accident où les facteurs de survie jouent un rôle prépondérant, beaucoup d'informations seront recueillies. L'ampleur de l'enquête sur les facteurs de survie dépend de l'accident. Dans certains accidents, la surviabilité est un problème majeur. Les facteurs de survie ne doivent jamais être négligés.

Chapitre 18

ENQUÊTE PATHOLOGIQUE

18.1 GÉNÉRALITÉS

18.1.1 Le présent chapitre a pour objet de servir de guide général aux enquêteurs chargés d'enquêter sur les accidents afin de dégager le rôle que les spécialistes en médecine, en pathologie et en ergonomie peuvent jouer dans les enquêtes sur les accidents et de définir la nature des travaux qu'implique cette contribution. Les médecins spécialisés trouveront des éléments plus détaillés dans le *Manuel de médecine aéronautique civile* (Doc 8984), et dans d'autres publications, qui, pour technique que soit leur contenu, peuvent être utiles aux enquêteurs des accidents d'aviation qui s'intéressent à ce domaine particulier.

18.1.2 Le Groupe des facteurs humains a pour principal objectif de recueillir des témoignages relatifs à la cause, au déroulement et aux effets de l'accident en examinant l'équipage de conduite, les membres de l'équipage de cabine et les passagers. Parallèlement à cette enquête, des indices permettant d'identifier les victimes émergeront automatiquement, surtout si chaque examen bénéficie des efforts coordonnés du pathologiste, des policiers, des odontologistes, des radiologistes, etc., du Groupe des facteurs humains.

18.1.3 L'identification des victimes ne doit pas être considérée comme une fin en soi. Elle constitue une partie essentielle de l'ensemble de l'enquête sur l'accident et il est commode d'associer l'identification des corps à l'examen des cadavres et à l'autopsie. C'est la raison pour laquelle le présent chapitre traite de façon relativement détaillée de la question de l'identification.

18.1.4 L'importance des enquêtes sur les facteurs humains n'a pas été appréciée à sa juste valeur jusqu'à présent ; les indices recueillis auprès des êtres humains impliqués dans un accident d'aviation, qu'il s'agisse de l'équipage ou des passagers, des survivants ou des morts, font partie intégrante des enquêtes dans leur ensemble. La présente introduction et la section 18.2 ont pour objet de préciser, dans ses grandes lignes, la valeur des enquêtes médicales pour les enquêteurs sur les accidents d'aviation et les administrations de l'aviation civile. Elles seront aussi d'une grande utilité pour la formation aux situations préaccident et d'urgence afin que l'équipe d'intervention préserve mieux les indices cruciaux de l'accident.

18.1.5 Il est évident que les méthodes à suivre et les compétences varient considérablement selon les lois, les règlements et les usages locaux ou nationaux et que, dans certains États, c'est aux autorités judiciaires compétentes qu'incombe la charge des enquêtes dans tous les cas de mort subite. Toutefois, du point de vue des enquêtes sur les accidents d'aviation, les enquêtes médicales devraient avoir pour objet :

- a) d'apporter à l'enquêteur désigné des témoignages médicaux d'une valeur technique pour la reconstitution de l'accident ;
- b) d'apporter des témoignages médicaux d'une valeur technique relatifs à l'ergonomie, à la survie, etc.

18.1.6 En général, l'enquêteur désigné nommera un spécialiste (de préférence un spécialiste en médecine aéronautique ayant de l'expérience dans les enquêtes sur les accidents d'aviation) pour faire partie de l'enquête, plus probablement dans le Groupe des facteurs humains. Lorsqu'il y a des décès, l'enquêteur désigné nommera aussi un pathologiste ; l'idéal serait que celui-ci ait une expérience de la pathologie aéronautique ou, tout au moins, de la pathologie légale afin qu'il puisse faire ou observer l'autopsie des victimes. Les enquêtes sont en général plus difficiles

dans les cas d'accidents mortels que dans celui des accidents non mortels et c'est la raison pour laquelle le présent chapitre insiste sur le rôle du pathologiste. Si aucun pathologiste aéronautique n'est disponible dans l'État qui fait une enquête sur un très grave accident mortel, l'enquêteur désigné devrait envisager de demander à d'autres États de lui fournir le ou les spécialistes nécessaires. Il faut aussi penser à apporter une aide aux victimes d'accidents d'aviation et à leurs familles. La Circulaire 285, *Éléments d'orientation sur l'assistance aux victimes d'accidents d'aviation et à leurs familles*, donne des renseignements plus détaillés à ce sujet.

18.1.7 Selon qu'il s'agit de gros ou de petits avions, c'est l'importance accordée aux indices relatifs aux facteurs humains qui varie plutôt que leur nature. Dans les deux cas, ces indices ne prennent toute leur valeur que si les dispositions ont été prévues à l'avance par les autorités aéronautiques et d'autres autorités locales ou nationales. Ces dispositions devront être prises en fonction de la plus grande catastrophe possible ; s'il ne s'agit que d'un accident peu grave, il suffira d'utiliser une partie seulement des ressources disponibles. Les questions dont il convient de se préoccuper sont précisées dans leur détail dans les prochaines sections, mais elles peuvent se résumer comme suit :

- a) accident grave, mais non mortel : il convient de prévoir les moyens de sauvetage et les installations hospitalières nécessaires ainsi que l'interrogatoire et l'examen de l'équipage, pour déterminer les facteurs médicaux et psychologiques éventuels, et de l'équipage et des passagers pour déterminer les blessures et leurs causes ainsi que la manière dont ils ont pu s'échapper et survivre ;
- b) accident catastrophique : l'organisation à prévoir en cas de catastrophe de ce genre comprendra une formation sur la manière de localiser et de retrouver les corps, une morgue et des installations frigorifiques ainsi que la mise sur pied d'une équipe médicale d'enquêteurs travaillant en liaison avec un secrétariat ou une commission d'identification.

18.1.8 Il s'agit d'un programme considérable, mais les avantages qu'on peut tirer d'une enquête sur les facteurs humains sont au moins égaux aux avantages inhérents à tous les autres aspects des enquêtes sur les accidents d'aviation.

18.2 CONTRIBUTION DE L'ENQUÊTE PATHOLOGIQUE

Reconstitution des circonstances de l'accident

18.2.1 Les membres d'équipage ou les passagers survivants peuvent fournir certains indices médicaux pour la reconstitution des circonstances de l'accident. Toutefois, pour l'essentiel, les indices médicaux pour la reconstitution des circonstances de l'accident sont associés aux accidents mortels.

18.2.2 Dans les accidents mortels impliquant des aéronefs légers, c'est l'examen du pilote qui a des chances d'être le plus utile ; dans ce cas, les enquêtes médicales devraient avoir pour but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une maladie et sa contribution possible à l'accident ainsi que de déterminer si l'absorption d'alcool, de médicaments ou de substances toxiques aurait pu causer l'accident. Cependant, il ne faut pas négliger l'examen des passagers même dans le cas des aéronefs légers ; dans les avions à double commande, rien ne permet d'affirmer qu'un « passager » ne pilotait pas l'aéronef et, de plus, l'examen toxicologique des tissus d'un passager peut confirmer des indices révélés par l'examen du corps du pilote, tels qu'un taux anormalement élevé de monoxyde de carbone.

18.2.3 Du fait de la présence de deux pilotes au moins dans le poste de pilotage des gros aéronefs, il y a moins de risques qu'une incapacité du pilote résultant d'une maladie ou de l'absorption de médicaments entraîne un accident très grave. Bien que cela ne soit pas tout à fait vrai lorsque l'accident s'est produit au cours d'une phase critique du vol telle que le décollage ou l'atterrissage, il n'en reste pas moins que, dans un accident grave, le pathologiste pourra souvent juger bon de rechercher plus spécialement des indices de circonstances susceptibles d'affecter l'équipage tout entier, notamment la présence de monoxyde de carbone ou d'autres émanations nocives dans le poste de pilotage. Il

est important de noter que l'intoxication par le monoxyde de carbone est très rare dans les aéronefs à turbines à gaz, mais beaucoup plus probable dans les aéronefs à moteurs alternatifs, en raison de la quantité de gaz dans les tuyères d'échappement des différents types de moteurs. Le pathologiste devra aussi chercher à infirmer ou à confirmer la possibilité d'un acte criminel tel qu'une intervention illicite dans l'utilisation de l'aéronef. Un examen complet peut donner des indices précieux sur la personne qui était aux commandes de l'avion au moment de l'accident et, à cet égard, l'identification présente un intérêt technique direct pour l'enquêteur, en dehors de l'intérêt judiciaire.

18.2.4 Toutefois, dans un très grave accident mortel, il est possible d'obtenir des indices du personnel de cabine et des passagers ; le présent chapitre a notamment pour but d'illustrer les raisons pour lesquelles il ne faut pas laisser passer cette occasion. Un examen complet, surtout lorsqu'il peut se fonder sur l'expérience, peut révéler des indices sur le déroulement des événements, la phase du vol et le degré d'urgence prévu ; la nature des lésions peut donner des indications précises sur le genre d'accident : incendie en vol, rupture en vol, décélération brusque ou progressive à l'impact, etc. ; l'examen des passagers peut être le meilleur moyen de prouver qu'un sabotage est la cause de l'accident.

Ergonomie et survie

18.2.5 Les enquêtes relatives aux facteurs humains peuvent apporter des indices médicaux très précieux en ce qui concerne l'ergonomie ou la survie. Ces indices présenteront autant d'intérêt dans le cas des accidents mortels que dans celui des accidents non mortels mais, là encore, leur importance variera selon qu'il s'agit d'un gros ou d'un petit aéronef.

18.2.6 Dans le cas d'un petit aéronef, l'examen portera généralement sur le cas du ou des pilotes. Toutefois, que l'aéronef soit gros ou petit, il faut tenir compte de facteurs tels que les avantages et les inconvénients du type de harnais utilisé, l'existence ou l'absence d'autres équipements de sécurité et les blessures que pourraient causer les commandes, les instruments et la structure du poste de pilotage.

18.2.7 Dans le cas d'un accident survenu à un aéronef de transport, les enquêtes porteront inévitablement sur les passagers et le Groupe des facteurs de survie recherchera des indices de lésions causées par la structure des sièges, dotés ou non de ceintures de sécurité suffisantes, et par l'effet balistique des objets qui se trouvent dans la cabine. On recueillera également des indices médicaux et pathologiques qui révéleront si les allées, les issues et le matériel de survie sont suffisants.

Identification

18.2.8 Il est évident que, pour être utile, l'interprétation des conclusions relatives aux facteurs humains est subordonnée à une identification exacte des victimes. L'identification est donc, au premier chef, un instrument d'investigation, mais elle a également une importance majeure dans le domaine médico-légal et judiciaire. Le chef du Groupe des facteurs humains doit penser à l'utilisation éventuelle à des fins médico-légales des indices qui pourraient être relevés par les membres de son groupe en leur qualité d'enquêteurs, particulièrement par le pathologiste. Le Groupe des facteurs humains devra donc travailler tout spécialement en coordination avec les autorités locales ou nationales notamment en ce qui concerne l'identification des victimes. Il faut tenir compte de ces besoins au moment de la planification des travaux et au cours des enquêtes. Toutefois, il n'y a pas conflit d'intérêts : l'enquête et l'identification sont interdépendantes, comme le reconnaît l'Annexe 13, et dans les sections suivantes du présent chapitre, elles sont étudiées dans le cadre des mêmes rubriques, notamment dans le cas :

- a) des opérations à effectuer sur les lieux de l'accident ;
- b) des opérations à effectuer à la morgue ;
- c) des indices à tirer de l'examen pathologique.

18.3 MISE AU COURANT DU PATHOLOGISTE

18.3.1 Dans l'idéal, le pathologiste désigné devrait être en possession d'un dossier complet avant de commencer son examen : il devrait prendre connaissance du détail des circonstances de l'accident, des antécédents médicaux et des dossiers personnels de l'équipage de conduite, se familiariser avec la disposition intérieure du poste de pilotage et de la cabine des passagers du type d'aéronef considéré et procéder à un examen complet des lieux de l'accident avant d'examiner les corps, mais cela n'est presque jamais possible. Dans la plupart des cas d'accident d'aviation mortel, les impératifs sont tels que l'examen et l'enlèvement des corps doivent être effectués le plus rapidement possible en évitant tout délai inutile. Il faut faire vite pour bien des raisons, l'exemple extrême étant celui d'un climat tropical lorsqu'on ne dispose pas d'installations frigorifiques. La culture et la religion des victimes peuvent aussi jouer un rôle.

18.3.2 Une méthode qui a été jugée pratique consiste, pour l'enquêteur désigné, à faire au pathologiste dès le début de l'enquête un bref exposé sur les caractéristiques les plus marquantes de l'accident et à l'informer des présomptions que l'on peut avoir quant à la nature de l'accident. Cet exposé n'a pas besoin d'être long ou détaillé ; il a simplement pour objet d'inciter le pathologiste à s'attacher plus spécialement, au cours de l'examen complet auquel il procédera normalement, à la recherche d'indices qui pourraient confirmer ou infirmer d'autres indices dont l'enquêteur désigné pourrait déjà disposer. Au cours de l'enquête, il convient que le pathologiste confère fréquemment avec le chef du Groupe des facteurs humains ou l'enquêteur désigné, selon le cas. Le pathologiste peut ainsi se tenir au courant de la situation et tirer profit des renseignements qui peuvent avoir une incidence sur son travail ; réciproquement, il peut rendre compte du résultat de ses recherches pour orienter éventuellement les membres des autres groupes. Tel est le principe du système des groupes, qui ne saurait fonctionner que si l'équipe des facteurs humains joue pleinement le rôle qui lui est dévolu.

18.4 OPÉRATIONS À EFFECTUER SUR LES LIEUX DE L'ACCIDENT

Installations et équipement

18.4.1 L'équipement nécessaire à la localisation et à l'enlèvement des corps dépend de la nature de l'accident. Il faudra se procurer sur place une grande partie de cet équipement et la rapidité avec laquelle on se le procurera permettra d'apprécier la valeur des préparatifs. De nombreux accidents se produisent au voisinage des aéroports et c'est dans ces zones qu'il est particulièrement important que les autorités aéronautiques et locales prévoient en commun un plan d'intervention en cas de catastrophe. Elles devraient constituer des stocks de certains éléments, recenser les autres éléments disponibles et tenir constamment à jour la liste de ces éléments.

18.4.2 En cas de collision avec des maisons, des usines, etc., on peut avoir besoin d'un matériel lourd tel que des grues, des bulldozers, etc., pour frayer un passage et enlever les débris de façon à pouvoir dégager les victimes. Dès le premier indice de la présence d'un corps, le travail doit se poursuivre lentement et à la main. Si l'aéronef s'est abattu dans un territoire isolé (région montagneuse, désertique ou marécageuse), un équipement spécial peut être nécessaire ; si des victimes ont été précipitées à l'eau, on peut avoir besoin d'embarcations et d'équipements de plongée.

18.4.3 L'équipement de base dont doivent être munis les enquêteurs est indiqué dans la première partie du présent manuel. Les articles ci-après sont plus spécialement recommandés pour l'enlèvement des victimes de l'accident, leur examen et leur identification, et leurs quantités doivent être en proportion du nombre de victimes :

- a) des trousse de premiers soins, des couvertures et des moyens de transport pour les survivants ;
- b) des sacs de plastique ou de toile, des linceuls ou des cercueils pour le transport des corps ;
- c) des sacs de papier fort ou autres réceptacles, à raison d'un par victime, pour préserver les effets personnels ;

- d) des piquets, avec des numéros et des étiquettes ;
- e) des étiquettes d'identification pour les corps, les bagages, les restes ou les articles d'équipement, ou les piquets sur les lieux de l'accident ;
- f) des cordes et de la ficelle ;
- g) du ruban adhésif ;
- h) de l'encre indélébile, des crayons gras (bleus, rouges) ;
- i) des gants de caoutchouc, des vêtements protecteurs (tabliers, bottes de caoutchouc, etc.) selon les besoins. Voir la Circulaire 315, *Dangers des lieux d'accidents d'aviation*, pour des renseignements plus détaillés sur l'équipement de protection ;
- j) un équipement photographique, y compris des flashes, pour le Groupe des facteurs humains ;
- k) une loupe ou un microscope de poche, des lames de microscope, des seringues et des aiguilles hypodermiques, des mètres à ruban, de la cire pour empreintes dentaires, des réactifs, des solutions antiseptiques, etc. ;
- l) des réceptacles (sacs de plastique) et des tubes à essais (avec bouchons) destinés aux échantillons de sang et de tissus organiques, ou à des prélèvements de matières diverses destinés aux analyses ainsi que des agents de conservation appropriés

18.4.4 Certains des éléments ci-dessus, comme les deux derniers, ne seront normalement utilisés que dans les locaux spécialisés où les corps des victimes seront déposés pour examen détaillé et dont il est question dans la section 18.5.

Mesures à prendre sur les lieux de l'accident

18.4.5 Après un accident d'aviation, il faut avant tout se préoccuper de porter immédiatement secours aux blessés par tous les moyens disponibles. S'il s'agit d'un accident où il est impossible de sauver des vies, il faut alors se préoccuper de sauver des vies dans les futurs accidents et de préserver des vies en s'efforçant de prévenir les accidents. C'est sur ce principe que se fondent toutes les enquêtes sur les accidents et la nécessité d'une étroite coordination entre les autorités locales ou nationales d'une part, et l'enquêteur désigné et ses enquêteurs dont, notamment le pathologiste désigné, d'autre part.

Recommandations de l'Organisation internationale de police criminelle

18.4.6 Les indications ci-après procèdent des recommandations de l'Organisation internationale de police criminelle (INTERPOL). Les recommandations de l'INTERPOL se fondent essentiellement sur des catastrophes autres que des accidents d'aviation et où les victimes sont très nombreuses. En conséquence, dans les alinéas ci-après, elles ont été modifiées pour tenir compte des besoins spéciaux d'une enquête médico-pathologique complète sur une catastrophe aérienne. Il est suggéré :

- a) d'apposer une étiquette sur chaque corps et de le photographier tel qu'il a été trouvé sur les lieux de l'accident. Les photographies ont pour but de fixer l'état et l'emplacement des corps des victimes sur les lieux de l'accident, la position des cadavres et leurs rapports avec les objets voisins, notamment les autres cadavres et des portions importantes de l'épave. Outre les photographies, la position des corps par rapport à d'autres corps et à des portions de l'épave de l'aéronef doit être reportée sur un croquis et, si le terrain s'y prête, la place de chaque corps sera marquée par des piquets. En cas de nécessité, la police peut commencer à procéder à cette opération à condition qu'il soit strictement tenu compte de la nécessité de préserver et de noter tous les indices qui pourraient avoir une importance pour les enquêteurs chargés d'étudier les aspects médicaux et techniques de l'accident. La solution idéale consisterait à faire procéder à ce relevé en coopération avec l'enquêteur désigné et ses enquêteurs, notamment avec le pathologiste chargé de conduire les enquêtes médico-pathologiques si sa présence ne se fait pas attendre trop longtemps.
- b) de placer les corps des victimes dans des cercueils provisoires ou dans tout autre réceptacle disponible. La plupart des types de sacs de plastique et de toile ou de lindeuls disponibles sont propres à cet usage à condition que leur contenu ne puisse pas s'échapper pendant le transport. Les enveloppes de polyéthylène présentent l'inconvénient d'exiger que l'emballage soit très soigné si l'on veut éviter des pertes en cours de transport, mais elles peuvent être utilisées en prenant les précautions nécessaires. Les objets isolés et les fragments de cadavres doivent être étiquetés, portés sur une liste et leur emplacement par rapport aux corps numérotés doit être indiqué ;
- c) de n'examiner les corps sur les lieux de l'accident que dans la mesure exposée à l'alinéa a) ci-dessus, mais de ne déplacer les cadavres que lorsque toute la procédure recommandée aura été exécutée. Chaque corps, les vêtements dont il est revêtu et les objets personnels contenus dans les vêtements doivent être recueillis au complet dans un récipient, puis transportés dans la zone réservée à la morgue ;
- d) de numéroter au crayon ou à l'encre indélébile l'étiquette attachée à chaque corps et de fixer cette étiquette directement sur le corps et non à la civière ou à la couverture dont on l'aura enveloppé. Toutefois, il est commode d'apposer une étiquette supplémentaire portant le même numéro sur le réceptacle dans lequel le corps est placé en vue de son transport. Certains sacs mortuaires ont une poche extérieure destinée à contenir cette étiquette ;
- e) de ne pas dépouiller le corps de ses effets personnels sur les lieux de l'accident, comme il est dit à l'alinéa c) ci-dessus. Si des effets personnels viennent à tomber d'un corps placé dans un réceptacle, il ne faut jamais les remettre en place, mais bien les placer dans un récipient distinct et étiqueté de façon à indiquer qu'ils appartiennent probablement, ou presque certainement (si c'est vrai), à un corps déjà numéroté. Les sauveteurs doivent prendre les plus grandes précautions lorsqu'ils déplacent les corps et rassemblent tous les effets et biens personnels du défunt ; ils devront les laisser avec les restes auxquels ils appartiennent indubitablement pendant le transport des corps à la morgue, mais les placer dans des emballages distincts et étiqueter soigneusement les articles dont le propriétaire n'est pas identifié en toute certitude. Si un objet faisait l'objet d'une attribution erronée, il pourrait en résulter un grand surcroît de travail pour l'équipe d'identification et des erreurs d'identification. L'emplacement de tous les effets et biens épars devra être noté sur l'étiquette attachée à chaque article ainsi que leur position par rapport aux restes auprès desquels ils auront été trouvés ;
- f) de ne pas disperser les corps des victimes, mais de les rassembler par les voies les plus rapides dans un local spécialisé ou, en l'absence d'un tel local, à l'endroit le plus approprié pour leur conservation. C'est là qu'il convient de les garder sous réfrigération si c'est nécessaire et possible, en vue des examens détaillés et spéciaux qui devront être entrepris pour mener à terme la procédure d'identification et, parallèlement, pour découvrir les indices nécessaires aux enquêtes sur l'accident.

18.4.7 Le succès des enquêtes médico-pathologiques en général et de l'identification des victimes en particulier dépend surtout de la rigueur que les sauveteurs apporteront à s'acquitter de leur tâche, car ce sont les travaux que ceux-ci effectuent sur les lieux qui peuvent faciliter les enquêtes ultérieures ou les compromettre. Il faut que les sauveteurs soient parfaitement au courant de leur tâche et de son importance, mais on ne saurait trop insister sur la nécessité de faire surveiller les travaux sur les lieux de l'accident par l'enquêteur désigné et ses enquêteurs, notamment par le pathologiste désigné ou, en son absence, par un pathologiste expérimenté et/ou par un policier.

18.4.8 Au cas où les corps auraient été enlevés et transportés à la morgue avant l'arrivée de l'enquêteur désigné, l'enquête ne s'en trouverait pas compromise à condition que la procédure définie ci-dessus ait été respectée. Toutefois, il est si important de préserver les indices pour les enquêtes (qu'elles soient techniques ou judiciaires) que, une fois les corps mis à l'abri, il faut attendre l'arrivée du pathologiste pour procéder à un examen détaillé, quel qu'il soit.

18.4.9 L'enquêteur désigné ne devra pas hésiter à user de son influence auprès des autorités locales ou nationales pour les persuader de l'importance de toutes ces questions, notamment si la liaison établie au stade des préparatifs en cas d'accident n'a pas abouti à des arrangements permanents.

18.5 OPÉRATIONS À EFFECTUER À LA MORGUE

Installations

18.5.1 On peut trouver à proximité d'un grand nombre d'aéroports une morgue dotée des moyens nécessaires ou un institut médico-légal. À défaut, il conviendrait de recenser les locaux, tels que les sous-sols d'aérogares, par exemple, susceptibles d'être utilisés comme morgue en cas d'accident et d'y installer le matériel nécessaire de façon qu'il soit prêt à servir en cas d'urgence. Les autorités locales qui ne se trouvent pas au voisinage des aéroports, mais qui établissent des plans à mettre en œuvre en cas de catastrophe aérienne, pourraient envisager de faire usage de bâtiments tels que des salles de réunion publiques, des gymnases ou des grands entrepôts commerciaux qui, s'ils ne sont pas vides, pourraient être vidés dans un délai très court. L'essentiel est de disposer par ordre d'importance, d'espace, de locaux isolés du public, d'électricité et d'eau courante. Outre l'espace nécessaire pour l'examen des corps, il faudra disposer des salles isolées où les familles et les proches pourront, au besoin, venir reconnaître les corps. Des locaux distincts devront également être prévus pour recueillir les dépositions des familles et des témoins ; il est aussi très important de disposer d'une pièce voisine de la morgue qui puisse servir de centre de communication.

18.5.2 Il faudra prévoir, s'il y a lieu, des installations de réfrigération en rapport avec les conditions climatiques. Sauf dans les climats les plus froids, il faudra pouvoir conserver dans un local réfrigéré les corps destinés à être examinés, surtout s'ils sont très nombreux et que leur examen est appelé à demander plusieurs jours. Il est rare de trouver des installations mortuaires permanentes réfrigérées à proximité du lieu d'une grande catastrophe aérienne. À défaut, la meilleure solution pourra consister à louer des camions réfrigérés qui pourront stationner à proximité de la morgue centrale. S'il est impossible de se procurer des camions de ce genre, on pourra utiliser des blocs de glace, mais ce moyen de conserver les corps au frais n'est pas très efficace et il peut être difficile de se procurer de la glace en quantité suffisante. À l'occasion, on pourra trouver des locaux spacieux et réfrigérés dans une usine ou dans un autre bâtiment commercial situé à une distance raisonnable de la morgue centrale et y conserver provisoirement les corps.

18.5.3 Au cas où l'on ne disposerait pas, sous un climat tropical, des moyens nécessaires pour conserver les corps sous réfrigération, il faudrait les enterrer provisoirement jusqu'à ce qu'il soit possible de les transporter en un lieu propice à des investigations détaillées. Il importe alors de recueillir et de noter avec soin tous les éléments d'information propres à faciliter l'identification qui peuvent être relevés sur les lieux de l'accident, notamment par un examen des restes des victimes. Dans une région isolée où l'on manque de moyens, il peut être préférable, après consultation et coordination avec les autorités locales ou nationales compétentes, de ramener les restes de toutes les victimes au point d'origine du vol (ou à tout autre endroit convenu d'un commun accord) pour procéder à leur examen et à leur identification et pour prendre les dispositions voulues en vue des obsèques. Il convient de noter que le transport des

corps est soumis à certaines conditions et à certains règlements. Dans le cas d'accidents d'aviation, les États contractants devront prendre les dispositions nécessaires pour apporter leur coopération aux enquêteurs, conformément aux dispositions de l'Annexe 12.

18.5.4 Le pathologiste du Groupe des facteurs humains devra pouvoir apprécier dans quelle mesure il faudra recourir au concours de l'institut médico-légal ou de l'institut de pathologie pour procéder à des analyses médicales, biologiques ou chimiques de nature à faciliter l'identification des victimes ou tous autres aspects de ses enquêtes et il devra prélever des échantillons en conséquence. Là encore, il y a lieu de souligner l'importance d'une coordination avec les autorités locales ou nationales.

18.5.5 Un institut médical ou un entrepreneur de pompes funèbres pourra être en mesure de fournir les moyens nécessaires à l'embaumement des corps ; certaines compagnies aériennes s'assurent les services d'une entreprise de pompes funèbres et elles organisent le rapatriement et les obsèques des victimes. Il est suggéré que les autorités aéronautiques et les autorités locales se renseignent sur les endroits les plus proches où on pourra trouver des instituts médico-légaux et des compagnies aériennes en mesure de fournir les services nécessaires, ainsi que sur l'ampleur de l'aide que ceux-ci pourraient apporter en cas de besoin.

Identification des morts

Principes

18.5.6 Pour des raisons sociales et juridiques, l'identification des morts présente une grande importance pour les familles des défunts. Elle permet de délivrer les actes de décès nécessaires pour éviter aux ayants droit des disparus les problèmes graves et complexes qui se posent dans certains États. En effet, il y a des États où le pathologiste n'est autorisé à examiner le corps au cours des enquêtes relatives à l'accident que lorsque l'autorité judiciaire a terminé son examen aux fins d'identification du fait que ces États considèrent souvent que la responsabilité d'identifier les victimes d'une grande catastrophe est distincte des enquêtes techniques concernant cette catastrophe. Cette solution peut être satisfaisante dans le cas de certains types d'accidents ou de cataclysmes naturels, mais dans le cas des enquêtes sur un accident d'aviation, il est hautement souhaitable que la tâche d'identifier les victimes soit étroitement coordonnée avec l'examen pathologique de ces victimes, car cette coordination est essentielle à l'interprétation des conclusions du pathologiste et des conclusions techniques relatives à l'accident.

18.5.7 C'est ainsi que dans le cas d'enquêtes techniques, il est toujours important d'identifier et d'établir l'endroit où se trouvait l'équipage au moment de l'accident, de savoir si une autre personne se trouvait à un endroit de nature à affecter le vol et, dans l'affirmative, de déterminer l'identité de cette personne : que le corps soit celui d'un membre d'équipage ou celui d'un passager, il n'est pas toujours possible dans la pratique de faire la distinction entre les indices médicaux recueillis à l'intention de l'identité judiciaire et ceux qui sont destinés à être étudiés par le Groupe des facteurs humains.

18.5.8 Les dommages subis par les corps sous l'effet des forces de l'accident et de l'incendie sont souvent tels que, seule une expertise pratiquée par des spécialistes (pathologistes, dentistes, radiologistes et autres experts) permettra d'identifier les victimes. S'il n'y a pas de coordination entre les autorités locales ou nationales et le Groupe des facteurs humains, les résultats obtenus ne seront pas satisfaisants pour deux raisons : d'une part, il se peut que des indices indispensables à la détermination des causes de l'accident soient involontairement détruits et, d'autre part, si l'on ne demande son concours au Groupe des facteurs humains que lorsqu'on se heurte à des difficultés, le travail s'en trouve souvent compliqué d'autant.

18.5.9 Bien que la procédure suivie varie selon la législation, la réglementation et les pratiques locales ou nationales, si les usages locaux s'écartent par trop des principes définis dans le présent chapitre, il conviendrait, lorsqu'il s'agit d'un accident d'aviation, d'inviter les autorités nationales et locales à modifier leurs pratiques dans toute la mesure du possible en vue de promouvoir la sécurité aérienne dans le monde.

18.5.10 Il est vivement recommandé que les autorités locales ou nationales recherchent en toutes circonstances la coopération du pathologiste choisi par l'enquêteur désigné. Si ce pathologiste a l'expérience de la pathologie aéronautique, c'est-à-dire des enquêtes relatives aux accidents d'aviation mortels, il sera également expert en matière d'identification. S'il n'est pas possible de s'assurer le concours d'un tel spécialiste, on pourra demander l'assistance d'un médecin légiste. Bien que son expérience des accidents d'aviation puisse être limitée, il pourra bénéficier de celle des autres membres du Groupe des facteurs humains et il aura été formé tant aux méthodes d'identification qu'à l'examen des corps de personnes mortes de mort violente et non de mort naturelle en vue de contribuer à expliquer les circonstances qui ont provoqué la mort. Un service d'identité comme celui de la police judiciaire pourrait être capable de contribuer à résoudre les problèmes d'identification en tant que tels, mais il n'aura pas compétence pour poursuivre des recherches complètes d'une plus grande envergure en vue de recueillir des indices médicaux relatifs aux enquêtes techniques de l'accident, dont l'importance est si grande.

18.5.11 Comme c'est l'usage dans certains États, on pourrait utilement instituer une commission d'identification qui comprendrait un pathologiste, un policier ou un fonctionnaire de l'autorité judiciaire ayant de l'expérience de l'identification ainsi que d'autres spécialistes (odontologistes, anthropologues, radiologues, etc.), selon ce que les circonstances permettent ou exigent. Si possible, le pathologiste devrait présider cette commission car, s'il en était autrement, on risquerait de voir une distinction s'établir entre les deux aspects des enquêtes médico-pathologiques et la recherche de l'identification se poursuivre uniquement comme une fin en soi, à l'exclusion des enquêtes sur l'accident. Le président de la commission pourrait être chargé de décider, avec le concours des autres membres, des cas dans lesquels les indices recueillis pour l'identification sont concluants, ou il pourrait lui être demandé de porter à la connaissance de l'autorité judiciaire locale ou de toute autre instance compétente les indices qui ont été recueillis, de façon qu'un fonctionnaire autorisé puisse signer des certificats d'identification ; ces détails relèvent de la procédure et des usages locaux.

Procédure d'identification

18.5.12 Un grand nombre d'éléments militent en faveur de la méthode selon laquelle des pathologistes (dont le ou les pathologistes du Groupe des facteurs humains) et des policiers ou d'autres représentants compétents de l'autorité judiciaire et leurs assistants procèdent en commun à un seul examen complet de chaque corps. Des indications sur la façon de procéder à cet examen figurent ci-après ; on trouvera des explications plus détaillées dans le *Manuel de médecine aéronautique civile* (Doc 8984).

18.5.13 Les vêtements des victimes et leur contenu présentent un grand intérêt pour l'autorité judiciaire comme pour le pathologiste. Les indices qu'ils permettent de recueillir peuvent faciliter l'identification (marques de blanchisserie, caractéristiques distinctives, etc.) ; ils peuvent contribuer à expliquer l'accident (médicaments ou ordonnances médicales retrouvés dans la poche d'un membre d'équipage ou lettre retrouvées dans la poche d'un passager et dénotant des troubles psychiques, peut-être même une propension au suicide). Des taches provoquées par des vomissements ou de la nourriture peuvent donner des indications sur l'évolution des événements ; des déchirures dans les vêtements peuvent indiquer la cause de la mort et il est indispensable qu'il n'y ait pas confusion entre ces déchirures et celles qui auraient pu être faites au cours de l'examen. Lorsque les vêtements et les bijoux ont été enlevés, ont fait l'objet d'une description complète et ont été répertoriés, l'autorité judiciaire et le pathologiste peuvent tous deux examiner les indices externes qui se trouvent sur le corps ; là encore, ces indices peuvent permettre l'identification (cicatrices chirurgicales, tatouages, etc.) ou donner des indications en ce qui concerne l'accident lui-même (par exemple, blessures causées par les éclats d'un engin explosif). À ce stade, si l'on dispose des installations nécessaires, il convient d'effectuer des radiographies ; le nombre de clichés et les régions du corps choisies dépendront de la nécessité éventuelle de rechercher des indices de sabotage et de la nécessité d'obtenir une preuve radiographique d'identité lorsque les autres indices sont insuffisants.

18.5.14 Le pathologiste devra procéder ensuite à l'examen interne complet du corps et à des prélèvements de tissus en vue d'examens de laboratoire spéciaux et d'appariement des empreintes génétiques. Ces examens spéciaux peuvent être histologiques, afin de rechercher des maladies décelables au microscope ou de déterminer l'heure de la mort, toxicologiques pour rechercher la présence d'alcool, de médicaments ou de produits toxiques tels que le

monoxyde de carbone et peut-être sérologiques pour déterminer les groupes sanguins qui pourraient contribuer à l'identification. La comparaison des profils d'ADN est utile pour identifier les victimes étant donné que chaque être humain hérite la moitié de son ADN de chaque parent et, par conséquent, une correspondance avec le parent d'une personne disparue peut révéler le lien avec un corps non identifié. La comparaison d'ADN a révolutionné la résolution des crimes en criminalistique. Pour identifier les victimes, les prélèvements sur les corps des victimes peuvent être comparés à un échantillon de cheveux, par exemple, ou à des échantillons dans les bases de données d'ADN. Une correspondance entre les échantillons prouvera l'identité de la victime. Cependant, cette méthode a fait l'objet de beaucoup de critiques, notamment lorsqu'elle est utilisée comme preuve devant un tribunal.

18.5.15 Il est vivement souhaitable de verser au dossier des photographies du corps vêtu et dévêtu ainsi que des photographies de toutes anomalies intéressantes qui pourraient être constatées au moment de l'examen externe ou interne des corps. Le numéro du corps en question devra apparaître clairement sur toutes les photographies.

18.5.16 Lorsque l'autorité judiciaire et le ou les pathologistes auront terminé l'examen approfondi et complet, constitué un dossier comportant tous les renseignements nécessaires, étiqueté et conservé soigneusement tous les indices matériels qui pourraient être utiles par la suite pour servir à des examens et à des analyses de laboratoire, les corps pourront être placés dans des cercueils et, si c'est indispensable, embaumés. Toutefois, il est souhaitable de ne pas procéder aux obsèques avant que le travail d'identification et d'enquête du pathologiste ne soit terminé en ce qui concerne l'ensemble de l'accident ; d'autre part, au cas où il serait nécessaire d'examiner de nouveau les corps, il faudra que les cercueils puissent, au besoin, être réouverts.

18.5.17 Dans une grande catastrophe où les victimes sont nombreuses, les enquêtes peuvent prendre du temps. Dans ces conditions, il est indispensable d'exercer un contrôle sur la quantité de travail effectué à la morgue ; il faut réduire au minimum la fatigue tout en veillant à ce que les principaux observateurs soient les mêmes jusqu'à la fin. Le pathologiste et l'autorité judiciaire sont donc, d'ordinaire, en mesure de consacrer un certain temps à l'aspect administratif de l'identification après les autopsies de la journée. L'identification dépend fondamentalement d'un rapprochement entre les renseignements qu'on possède sur une certaine personne et les indices découverts en examinant un corps (voir le § 18.5.2.4) ; il faut donc mettre en place une organisation chargée de recueillir des renseignements sur les occupants.

Collecte des renseignements sur les disparus

18.5.18 Après un accident d'aviation, l'identification de la plus grande partie des corps dépend souvent des renseignements dont on dispose sur les occupants de l'aéronef. On peut obtenir certains renseignements auprès de la compagnie aérienne intéressée qui devrait fournir dès que possible la liste des passagers ainsi que, le cas échéant, des détails complémentaires comme la classe du billet, le siège occupé, les points d'origine et de destination, les adresses professionnelles ou personnelles, les numéros des billets et les bagages.

18.5.19 D'une façon générale, la meilleure source de renseignements sera la famille ou les amis intimes du défunt et il conviendrait de mettre en place tout de suite après un accident d'aviation un service de renseignements. Pour ce faire, les compagnies aériennes pourraient par exemple prévoir dans leur organisation en cas de catastrophe la création d'un service d'information dès qu'elles apprennent qu'un de leurs avions a été victime d'un accident. Dans un État au moins, les compagnies aériennes confient cette mission à une entreprise de pompes funèbres principalement chargée de prendre les dispositions voulues pour conduire les corps à leur dernière demeure. Si la compagnie aérienne intéressée n'a rien prévu à ce sujet, il conviendra de prendre les dispositions nécessaires par l'intermédiaire de la police, de la Croix-Rouge ou d'organisations analogues. Les dispositions préalables en cas d'accident doivent prévoir cette éventualité. Les personnes chargées de ce travail devront, bien entendu, faire preuve d'un maximum de tact, de sympathie et de compréhension à l'égard des familles des victimes.

18.5.20 Il est essentiel que les familles ou les amis des victimes soient contactés dès que possible, généralement par téléphone, en utilisant la liste des passagers et les adresses fournies par la compagnie aérienne. Il faudra demander des renseignements aussi complets que possible sur les caractéristiques physiques du passager ou du membre

d'équipage, sur son âge, sur ses vêtements et sur les objets personnels dont il pourrait être porteur. Si on peut se procurer les noms de son médecin et de son dentiste, il conviendra d'en prendre note et de se mettre en rapport avec ces spécialistes pour obtenir les renseignements complémentaires sur les caractéristiques physiques de chaque défunt et notamment sur les opérations que celui-ci pourrait avoir subies, sur son état de santé actuel, sur son groupe sanguin, etc. On veillera surtout à se procurer des renseignements aussi complets que possible sur les soins dentaires que la victime pourrait avoir reçus. Le dentiste sera invité à compléter tous les renseignements qu'il pourra donner par téléphone en envoyant les fiches odontologiques et les radiographies dentaires au centre de collecte des renseignements, à charge pour celui-ci de transmettre d'urgence ces éléments au spécialiste qui examine les corps des victimes de la catastrophe à la morgue. Une bonne photographie du défunt pourra parfois être très utile et, selon le pays d'origine du défunt, les services d'identité pourraient fournir des empreintes digitales et d'autres renseignements caractéristiques

18.5.21 La diversité des éléments d'information relatifs à une personne qui pourraient contribuer à identifier son corps est infinie. Le genre de renseignements énumérés ci-dessus devrait suffire à permettre l'identification dans la majorité des cas. Au cas où il ne serait pas possible d'identifier un ou plusieurs corps, on pourrait à nouveau solliciter le concours de parents ou d'amis particulièrement bien placés en leur demandant des renseignements complémentaires sur des points particuliers décelés par l'examen des corps non encore identifiés ou en demandant aux familles si elles sont en mesure de reconnaître des lambeaux de vêtements ou des objets personnels. Il convient de se souvenir que l'identification à vue d'un corps traumatisé ou calciné, d'un vêtement ou de tout autre article peut être erronée. Des parents égarés par la douleur se sont souvent trompés, dans un sens négatif ou positif, lorsqu'ils ont été appelés à procéder à des identifications visuelles. Lorsqu'un corps est très mutilé, il faut considérer l'identification visuelle comme une simple indication de l'identité du défunt et il convient de rechercher des indices de nature à la corroborer. La dépouille mortelle doit être présentée à la famille de façon à marquer le respect dû au défunt et à ses proches. On tiendra compte, dans toute la mesure du possible, de la religion du défunt et on observera les rites funéraires qu'elle prescrit.

Corrélation des informations

18.5.22 La corrélation des résultats de l'examen des corps et des renseignements fournis sur les personnes qui étaient présumées se trouver à bord de l'aéronef est simple, mais elle peut demander beaucoup de temps. Ce travail peut être fait par des assistants pendant que les spécialistes continuent à examiner les corps, mais les résultats de cette corrélation doivent être vérifiés par ceux qui sont chargés de déterminer la valeur des indices dans chaque cas. L'identification des corps étant indispensable pour des raisons sociales et juridiques et présentant une importance (parfois fondamentale) pour l'enquête du Groupe des facteurs humains, le pathologiste lui-même doit être étroitement associé aux décisions définitives ; comme il est indiqué plus haut, il est souhaitable qu'il préside le groupe ou la commission chargé de l'identification.

18.5.23 Un État a constaté par expérience que si les formulaires utilisés pour noter les résultats de l'examen et les renseignements sur les victimes présumées sont de couleurs différentes ou se distinguent clairement de toute autre façon, la corrélation s'en trouve facilitée.

18.5.24 Il est commode de commencer par les corps sur lesquels on possède des indices directs permettant de les identifier, tels qu'un nom figurant sur les vêtements ou sur des documents. On passera ensuite à ceux qui ne portent pas d'indices aussi précis de leur identité. C'est ainsi qu'un cadavre du sexe masculin peut avoir conservé des lambeaux d'un uniforme de membre d'équipage, mais sans indication de grade. En examinant les corps un par un, il sera possible, en procédant par élimination, de déterminer qu'il ne s'agit pas de tel ou tel membre d'équipage jusqu'à ce que l'enquête décèle des points de comparaison positifs suffisants pour permettre d'identifier de façon positive le corps sans risque d'erreur.

18.5.25 Au fur et à mesure du déroulement du processus, il convient de s'intéresser aux éléments qui ne constituent pas un indice direct et précis de l'identité du sujet, mais qui présentent une caractéristique inhabituelle pouvant servir de point de départ aux recherches ; il peut s'agir de tatouages distinctifs, d'une amputation ancienne, d'une prothèse dentaire inusitée, voire de caractéristiques dentaires spéciales ou distinctives. On peut éliminer assez rapidement un certain nombre de possibilités mais parfois on découvrira des éléments qui amèneront à procéder à une comparaison plus minutieuse d'autres caractéristiques avant d'éliminer une possibilité. À un certain moment, on arrivera à une concordance entre les renseignements figurant dans le dossier et la description de la caractéristique en question et on s'apercevra que la comparaison entre d'autres détails relevés sur le corps et les renseignements que l'on possède sur une certaine personne confirme l'identité du défunt.

18.5.26 On commencera par procéder aux identifications les plus faciles et on remettra à plus tard celles qui peuvent présenter de plus grandes difficultés du fait que l'examen des corps a décelé moins d'indices évidents de nature à permettre d'établir l'identité des corps. Lorsqu'on en arrive à ces dernières, le volume des informations devrait avoir diminué et il faudra alors comparer laborieusement les résultats de l'examen d'un corps avec les renseignements qu'on possède sur chaque personne de même sexe, en évitant si possible de tenir compte de l'identité, en prenant des notes et en s'efforçant de trouver la solution de chaque problème d'identification. Au cours de cette phase des travaux, il est fréquent qu'une évaluation des renseignements disponibles laisse en doute entre deux ou plusieurs personnes et le seul processus d'élimination possible consistera à se procurer des renseignements complémentaires auprès de la famille des personnes en cause.

Histologie (analyse microscopique)

18.5.27 La réalisation d'examens histologiques sur les tissus des victimes d'accident d'aviation se justifie pour de nombreuses raisons, notamment la détection d'une pathologie:

- a) indiquant la présence, chez des membres d'équipage, d'une maladie à l'origine ou ayant contribué à la survenue de l'accident;
- b) ayant une relation avec la survie ou le décès ;
- c) donnant une indication éventuelle de l'usage de médicaments par l'intermédiaire des réactions des tissus fixés ;
- d) corroborant des indices de transformation structurelle profonde comme la putréfaction ou la fermentation avec croissance bactérienne produisant de l'éthanol ou le faisant disparaître ;
- e) donnant une indication quant à la prévalence d'une maladie aux fins de recherches futures.

18.5.28 Il faut veiller à obtenir des échantillons bien étiquetés des principaux organes, ainsi que des prélèvements bien documentés concernant des lésions spécifiques ou des parties du corps où il y a eu changement de structure. Il est extrêmement important que les descriptions soient précises. Tous les prélèvements doivent immédiatement être placés dans une solution isotonique de formol tamponnée à 10% en vue de la conservation.

18.5.29 Une description exhaustive du domaine général de l'histologie sortirait du cadre de la présente section, mais il faut cependant souligner la nécessité de prélever des échantillons sur des parties ou organes spécifiques du corps. Les artères du cœur et le muscle cardiaque lui-même doivent être examinés. Il convient d'effectuer des coupes sériées des principaux vaisseaux cardiaques pour détecter la présence d'une maladie obstructive. De même, la détection d'une cardiomyopathie exige des coupes cardiaques multiples. L'examen histologique du foie peut révéler une variété d'états allant de la stéatose hépatique à la cirrhose. Les modifications microscopiques de cet organe peuvent également constituer la seule indication d'un abus d'éthanol ou de l'usage de médicaments. L'embolisation pulmonaire peut donner des renseignements vitaux sur la capacité de survie et le moment de la mort. La présence de suie dans les voies aériennes et dans les alvéoles indiquera une survie dans les cas d'incendie après écrasement.

18.5.30 Des prélèvements doivent être effectués sur tous les principaux organes, mais aussi, automatiquement, si l'on soupçonne une anomalie quelconque, y compris une tumeur.

Toxicologie (étude des poisons)

18.5.31 Un examen toxicologique adéquat des échantillons de tissus et de liquides prélevés sur les victimes d'accidents d'aviation exige une recherche minutieuse visant à établir la présence de médicaments prescrits, en vente libre ou illicites, de substances d'usage social et d'abus de telles substances, de polluants et de toxines, et aussi à détecter et mettre en évidence des changements structurels, comme la production d'éthanol par fermentation après l'écrasement. L'idéal est que les analyses soient de portée générale et que leur sensibilité soit au niveau thérapeutique et sous-thérapeutique. Comme les traumatismes physiques sont souvent très importants, l'examen toxicologique fournira peut-être la seule preuve de l'existence d'états pathologiques pouvant produire une incapacité lente ou soudaine (hypertension, épilepsie, etc.)

18.5.32 Les examens doivent, si possible, être réalisés par un laboratoire central de référence qui aura établi des méthodes spécifiques pour les accidents d'aviation, par opposition aux examens médico-légaux généraux.

18.5.33 Pour que les examens soient utiles, une variété de tissus et de liquides sont nécessaires. Les forces d'impact étant élevées, les liquides ne sont souvent pas disponibles, mais des quantités suffisantes de sang provenant de trois sources différentes, de l'urine stérile d'une vessie non percée, de la bile (de la vésicule biliaire) et de l'humeur vitrée (de l'œil), sont toutes très utiles au toxicologue. Les analyses communément effectuées sur les liquides normalement disponibles sont les suivantes :

Sang

18.5.34 Analyses qualitatives et quantitatives :

- a) détection d'éthanol ;
- b) détection d'autres alcools, solvants, carburants, liquides hydrauliques, etc. ;
- c) détection de monoxyde de carbone ;
- d) détection d'acide cyanhydrique ;
- e) détection de delta-9-THC et de ses métabolites (c.-à-d. de marijuana) ;
- f) chromatographie en phase gazeuse (CPG) - spectrométrie de masse (SM) pour la détection et la quantification de médicaments et drogues ainsi que de leurs métabolites ;
- g) CPG - SM pour la détection et la quantification de pesticides et herbicides ;
- h) recherche chromatographique en phase liquide à haute performance (HPLC) et quantification de médicaments et de drogues ;
- i) dosage radio-immunologique (RIA), le cas échéant ;
- j) immunodosage par enzymes multipliées (EMIT) de médicaments.

Urine

18.5.35 Analyses qualitatives et quantitatives :

- a) détection d'éthanol ;
- b) détection d'autres alcools et solvants ;
- c) CPG - SM pour la détection de médicaments, de drogues et de leurs métabolites ;
- d) CPG - SM pour la détection de pesticides, d'herbicides, etc. ;
- e) HPLC pour la détection de médicaments et de drogues ;
- f) RIA pour la détection de digoxine, de divers antibiotiques, de métabolites de THC, d'amphétamines, de barbituriques, de morphines et de cocaïne ;
- g) EMIT pour la détection de drogues illicites.

18.5.36 Les échantillons doivent être, si possible, non contaminés et être conservés comme indiqué. La prévention de la croissance bactérienne et fongique est particulièrement importante dans les analyses visant à déterminer la présence d'éthanol. La raison d'être des analyses toxicologiques ne demande guère à être expliquée. On soulignera toutefois quelques points pertinents.

18.5.37 La détection de certaines classes de médicaments, comme les tranquillisants et les composés illicites, peut indiquer la nécessité d'enquêter sur l'état psychologique de la victime. Une baisse des activités psychomotrices, de la perception ou du jugement peut résulter de l'ingestion de médicaments ou de l'exposition accidentelle à une grande variété de toxines provenant de l'environnement. Des échantillons devraient être prélevés sur toutes les victimes d'accidents, si possible. Ceux qui sont prélevés sur les passagers peuvent servir de groupe de contrôle pour les échantillons prélevés sur les équipages de conduite, et ils peuvent fournir des indices précieux, par exemple, sur la présence d'une fermentation produisant de l'éthanol.

18.5.38 On peut obtenir des indices sur un incendie en étudiant la répartition des niveaux d'acide cyanhydrique ou de monoxyde de carbone chez le personnel de cabine et chez les passagers. La présence de monoxyde de carbone chez les membres d'équipage de conduite peut signaler l'origine d'une contamination pouvant s'expliquer par un mauvais fonctionnement des échangeurs de chaleur.

18.5.39 Les victimes d'accidents survenus au cours d'opérations de pulvérisation des cultures doivent faire l'objet d'un examen visant à établir la présence de pesticides ou d'herbicides et l'inhibition de la cholinestérase. Les enquêteurs doivent être mis en garde contre les dangers de contamination que posent les enquêtes sur les accidents de ce type et ils doivent être pourvus de vêtements et d'équipements de protection adéquats. Ils doivent également être soumis à des examens s'ils ressentent des symptômes.

18.6 INDICES POUVANT ÊTRE DÉCELÉS PAR L'EXAMEN PATHOLOGIQUE

Recherche de maladies ou d'autres causes ayant pu compromettre l'efficacité de membres de l'équipage de conduite

18.6.1 À mesure que l'examen conjoint d'un corps progresse, l'identité de ce corps peut devenir rapidement évidente et on peut déterminer à coup sûr, ou presque, s'il s'agit d'un membre de l'équipage de conduite. Dans ce cas, l'examen du pathologiste devrait être spécialement détaillé du point de vue de la recherche de maladies ou d'autres

causes de nature à compromettre l'efficacité du sujet. Si l'équipage de conduite n'a pas encore été identifié et qu'on ne peut pas exclure la possibilité qu'un corps non identifié soit celui d'un membre d'équipage, l'examen de ce corps doit être aussi complet que si l'on avait la certitude qu'il s'agit de celui d'un pilote.

18.6.2 Dans ce cas, il appartient au pathologiste de rechercher avec un soin tout particulier les indices d'une maladie préexistante qui pourrait avoir causé un collapsus brutal ou une mort subite ou qui aurait pu, d'une manière générale, nuire à l'efficacité de la victime, et aussi de rechercher des indices d'altération des fonctions due à l'alcool, à des médicaments ou à des agents de contamination de l'environnement comme le monoxyde de carbone.

18.6.3 À cette fin, l'autopsie doit comporter un prélèvement de tous les principaux organes aux fins d'examen microscopique ainsi que des prélèvements de sang, d'urine et de tissus choisis aux fins d'examen chimique. Le pathologiste ne devrait pas avoir de difficultés à se procurer les quantités de solution fixatrice nécessaires à la conservation du tissu en vue de l'examen microscopique (formol à 10 %) ; toutefois, il pourrait être plus difficile de se procurer des récipients appropriés et l'entreposage des prélèvements destinés à des examens chimiques pourra poser des problèmes. Ces prélèvements, qui ne peuvent pas être conservés à l'aide de solution fixatrice, doivent être congelés ; or, tous les États ne disposent pas de laboratoires munis des installations voulues pour les analyses complexes qui peuvent être nécessaires. Il pourra donc être souhaitable, sous réserve de l'accord des autorités locales ou nationales et d'une coordination établie par l'intermédiaire de l'enquêteur désigné, d'envoyer ces prélèvements dans l'un des laboratoires spécialisés qui exécutent ce genre de travail dans certains États.

18.6.4 L'enquêteur doit savoir que, comme dans d'autres domaines d'enquête sur les accidents, la présence d'une anomalie médicale chez un pilote est loin de prouver que cette anomalie a eu un rapport direct avec l'accident. On peut montrer qu'un pilote était atteint d'une maladie qui pourrait avoir provoqué un collapsus ou une mort subite. Il est rare qu'il soit possible de découvrir des indices médicaux qui montrent sans équivoque possible que la maladie a provoqué le collapsus ou la mort ; on ne peut normalement aboutir à la conclusion qu'il en a probablement été ainsi qu'après corrélation de tous les indices recueillis par tous les groupes spécialisés d'enquête et pas seulement par le Groupe des facteurs humains.

Examen des passagers et du personnel de cabine

18.6.5 Le volume de travail qu'exige un accident qui a fait un grand nombre de morts exige que les autopsies et les prélèvements d'organes et de tissus sur des corps identifiés comme étant ceux de passagers soient moins poussés que dans le cas de l'équipage de conduite dans le poste de pilotage. Cependant, il y a des points à ne pas négliger dans l'examen des corps quels qu'ils soient.

18.6.6 Il faut que l'examen et les prélèvements soient suffisamment détaillés pour fournir, outre la cause précise du décès :

- a) une estimation des forces de décélération, fondée sur l'état du cœur, de l'aorte, du diaphragme, du foie et de la rate ainsi que sur la présence de fractures du sternum, de la colonne vertébrale et du bassin ;
- b) une évaluation des indices éventuels de lésions provoquées par la ceinture de sécurité ventrale et des dommages crânio-faciaux connexes ;
- c) des indices de survie en cas d'incendie attestés par l'élévation du niveau de la carboxyhémoglobine dans le sang ou les tissus ;
- d) des indices de la présence de modifications microscopiques des poumons consécutives à une blessure préalable à la mort, montrant que la victime était en vie pendant l'incendie et permettant peut-être de résoudre des problèmes médico-légaux, tels que celui du droit de survie, qui peuvent se poser par la suite ;

- e) pour des raisons médico-légales, il convient également de noter la présence de toute maladie préexistante de façon à pouvoir régler équitablement toutes demandes de dommages-intérêts ultérieures.

18.6.7 L'examen des corps des passagers permet de déterminer la répartition des blessures. Cette répartition peut être uniforme ou variable. Une répartition uniforme indique que tous les passagers ont sensiblement été soumis au même type et à la même intensité d'efforts. À cet égard, on peut citer en exemple la combinaison de lésions cranio-faciales, de blessures dues à la ceinture de sécurité ventrale et d'écrasement de la partie inférieure des jambes associées aux situations classiques d'écrasement au sol où les passagers sont retenus dans leur siège par les ceintures de sécurité. On peut tirer un grand nombre de renseignements complémentaires d'une comparaison entre la répartition des blessures des passagers et celle des blessures du personnel de cabine. On verra, par exemple, si les membres du personnel de cabine étaient prêts à faire face à une situation d'urgence ou s'ils étaient dans leurs conditions de travail normales.

18.6.8 Lorsque la répartition des blessures est variable, un groupe de passagers peut porter des blessures différentes de celles des autres passagers. En général, il faut y voir l'indication d'un incident inhabituel et l'interprétation des indices est subordonnée, dans une large mesure, à l'identification et à la localisation des occupants de l'aéronef conformément au plan de répartition des sièges. Il faut toujours envisager la possibilité qu'un seul corps dévie de la norme ; il se peut que ce soit l'unique moyen de déceler un acte de sabotage ou d'intervention illicite dans la conduite de l'aéronef.

Corrélation avec l'examen de l'épave de l'aéronef

Le poste de pilotage

18.6.9 Il est indispensable de procéder à une corrélation entre les dommages du poste de pilotage et les blessures du pilote. Des résultats anormaux peuvent donner des indices sur des causes d'accident telles qu'une panne du pilote automatique ou une tentative d'intervention dans la conduite normale de l'aéronef. Il faut établir la corrélation entre les blessures décelées et certains éléments de l'équipement du poste de pilotage. À cette fin, on recherchera les traces de sang et d'autres tissus sur les sièges, les instruments et les commandes. Dans certains cas, il pourra être nécessaire d'identifier ces indices comme appartenant à des membres donnés de l'équipage de conduite ou éventuellement, de montrer qu'il ne s'agit pas de tissus humains — par exemple, dans le cas d'indices révélant un impact d'oiseaux. Il convient de noter les dommages subis par les sièges et les sangles de sécurité des membres de l'équipage de conduite ainsi que, d'une façon générale, leur état en vue de la reconstitution des événements qui se sont produits dans le poste de pilotage au moment de l'accident et immédiatement après, et de déterminer les chances que certains occupants ont pu avoir de survivre à l'accident et de quitter l'aéronef.

La cabine de passagers

18.6.10 Il conviendra de procéder à un examen et à une description détaillés de tous les sièges, de leurs fixations, des ceintures de sécurité et autres éléments d'équipement de sécurité et structures avoisinantes. C'est l'une des conditions préalables d'une étude de surviabilité. Le déplacement des attaches et les indices relevés sur les ceintures elles-mêmes peuvent donner une indication des efforts exercés sur ces ceintures. Il faudra toujours mesurer la taille des ceintures bouclées mais arrachées. Il se peut qu'on parvienne, en partant de ces mesures, à déduire la taille de l'occupant du siège, bien qu'il faille tenir compte du fait que l'ajustement des ceintures de sécurité peut varier beaucoup. Il y a plus important : le serrage général des ceintures doit permettre à l'enquêteur de distinguer entre une cabine qui a été préparée pour un atterrissage d'urgence et une cabine où les passagers étaient assis avec leurs ceintures peu serrées comme c'est le cas en général. Il faut naturellement établir la corrélation entre ces indices et le plan de répartition des sièges lorsqu'on le connaît et avec le résultat des autopsies. Lorsqu'on ne dispose pas du plan de répartition des sièges et lorsque les autorités locales ou nationales ont fait enlever les corps sans noter leur emplacement, il est fréquent qu'on trouve des indices relatifs à la manière dont les passagers étaient assis ; c'est ainsi

qu'un livre ou un sac à main trouvé dans la cabine dans le compartiment du dossier d'un siège donnera une idée valable de l'emplacement de son propriétaire. Si l'on compare les fragments d'étoffe collés à la structure de l'aéronef et les vêtements qui revêtaient les corps, on peut en tirer des déductions sur l'emplacement des corps, ou du moins sur l'endroit où les corps se sont immobilisés si on ne peut pas déterminer quels étaient les sièges qu'ils occupaient.

La nature, la cause et la séquence des blessures

18.6.11 Il s'agit tout particulièrement d'une blessure unique ayant entraîné la mort de la victime ou de blessures entraînant une incapacité qui a empêché une personne consciente, et par ailleurs en possession de ses moyens, d'évacuer l'aéronef sans aide. Il faut établir la nature et la cause des blessures de façon à pouvoir évaluer les caractéristiques de sécurité à l'intérieur de l'aéronef en vue de les améliorer. On peut citer par exemple des blessures pénétrantes de la tête ou des écrasements de la partie inférieure des jambes qui peuvent tous deux indiquer que la conception du dossier des sièges n'est pas satisfaisante pour ceux qui sont placés directement derrière.

18.6.12 Il conviendra de procéder à un examen complet des causes des types de blessures inhabituelles. Dans plusieurs cas, les enquêteurs sont arrivés à la conclusion que le pilote était effectivement aux commandes de l'aéronef lorsque celui-ci s'est écrasé en se fondant sur la nature des blessures aux mains et aux poignets ou aux pieds et aux chevilles, qui a pu être déterminée tant à l'œil nu au moment de l'autopsie que par les radiographies.

18.6.13 Les actes de sabotage et les blessures qui peuvent être dues à une explosion ou à des éclats d'engins explosifs doivent être décelés. Le pathologiste devra conserver les tissus qui entourent des blessures suspectes de ce genre pour les soumettre à des examens de laboratoire en vue d'identifier les traces constituant des indices. Les vêtements des victimes porteront les marques des blessures provoquées par les causes ci-dessus ; on ne saurait donc trop insister sur les risques qu'on courrait en dépouillant prématurément les victimes de leurs vêtements à seule fin de les identifier.

18.6.14 Les radiographies prennent toute leur importance dans les cas où l'on soupçonne un acte de sabotage et, si l'on a la moindre raison de soupçonner des activités criminelles, un examen radiologique complet s'impose. C'est un bon exemple de l'importance que revêt l'emploi de techniques spéciales dans les divers aspects des enquêtes. Plus on pourra faire appel aux radiographies et moins il faudra passer de temps sur la table d'autopsie pour déterminer les blessures qui ont atteint le squelette, car les radiographies permettront d'en conserver une trace permanente. Les radiographies peuvent aussi révéler l'existence de corps étrangers ou d'anomalies du squelette qui ont leur valeur pour le processus d'identification.

La détermination de la cause de la mort de chacune des victimes

18.6.15 Dans une catastrophe aérienne, un grand nombre des corps seront extrêmement endommagés par les forces excessives exercées et par des brûlures. Pour qui n'est pas au courant de la valeur de la contribution que la pathologie apporte aux enquêtes techniques sur les accidents d'aviation, il est tentant d'imputer la mort aux brûlures ou à des blessures multiples en se fondant sur un examen extérieur superficiel pratiqué après la mort. Un incendie majeur produit tant d'effets qu'une telle analyse revient sensiblement à deviner ce qui s'est passé ; en outre, un examen superficiel ne permet pas de distinguer entre les blessures produites avant la mort et celles qui sont produites après la mort. Il importe, si cela est possible, de déterminer dans chaque cas, la cause précise de la mort en liaison avec les aspects techniques des enquêtes techniques sur les accidents et avec les problèmes médico-légaux qui se poseront par la suite. Les quelques exemples ci-après illustrent la nature fondamentale d'une autopsie complète :

- a) dans le cas où un pilote meurt d'une cardiopathie alors qu'il est aux commandes, la catastrophe qui en résulte peut provoquer des blessures multiples auxquelles on peut imputer la cause de la mort s'il n'est pas procédé à un examen interne. Il est manifeste que, dans ce cas, des indices importants pour les enquêtes techniques relatives à l'accident seraient négligés ;

- b) si un passager est atteint d'une blessure mortelle à la tête, on peut en tirer des conclusions importantes quant à la surviabilité de l'accident. Toutefois, si l'examen interne montrait qu'en fait la mort a été provoquée par des brûlures, la blessure à la tête pourrait être considérée comme une conséquence de la chaleur de l'incendie et elle serait interprétée de façon tout à fait différente ;
- c) un mari et une femme peuvent donner l'un et l'autre l'impression d'avoir subi des blessures multiples et d'avoir été carbonisés. Mais si l'un est, en fait, mort par asphyxie et l'autre d'une blessure, on pourrait arguer que le premier a survécu au second avec toutes les conséquences médico-légales d'une portée considérable qui en découlent. L'indice qui montrerait que quelqu'un pourrait avoir survécu à l'impact présenterait une grande importance pour les enquêtes techniques sur l'accident et, en conséquence, ces enquêtes porteraient alors sur les aspects ergonomiques et ceux qui intéressent la survie.

18.7 REMISE AUX AUTORITÉS COMPÉTENTES DES RESTES ET DES OBJETS PERSONNELS DES VICTIMES

18.7.1 Bien qu'il soit préférable de conserver tous les corps soit jusqu'à ce qu'ils aient tous été identifiés, soit jusqu'au moment où aucune autre identification n'est plus possible, il convient de remettre les corps aux autorités locales ou nationales le plus tôt possible, à condition :

- a) que tous les renseignements intéressant les enquêteurs techniques aient été tirés du cadavre ;
- b) qu'il n'y ait plus de doute possible sur l'identité d'un corps.

18.7.2 Après que tous les corps ont été identifiés et qu'il n'y a plus lieu de les conserver aux fins des enquêtes techniques sur l'accident, il appartient normalement aux autorités locales ou nationales de rendre ces corps à leurs familles avec une fiche d'identification appropriée et un acte de décès (lorsqu'il faut rapatrier le corps, il se peut qu'il faille se procurer des autorisations et des certificats supplémentaires permettant le transport des corps ou des restes dans d'autres localités, d'autres districts ou d'autres États).

18.8 LES SURVIVANTS DE L'ACCIDENT

18.8.1 En général, le problème se pose de façon plus simple que dans le cas d'un accident où tous les occupants d'un aéronef sont morts, car il s'agit pour une large part d'examiner des sujets vivants et vraisemblablement prêts à coopérer avec les enquêteurs. Le Groupe des facteurs humains recherchera fondamentalement le même type d'indices que ceux qui découlent de l'examen pathologique des morts (voir § 18.6.1 à 18.6.4).

18.8.2 Il convient de procéder à un examen médical des membres survivants de l'équipage de conduite, pratiqué de préférence par un spécialiste de la médecine aéronautique ou un médecin examinateur d'aviation qualifié, pour déterminer si des facteurs physiques, physiologiques ou psychologiques relevés chez l'équipage de conduite ont exercé une influence sur les conditions de l'accident. Il pourra être souhaitable de faire des prélèvements de sang et d'urine et de les analyser autant pour y rechercher la présence de substances thérapeutiques que pour contribuer à déterminer l'existence d'un état anormal comme l'hypoglycémie, par exemple. Toutefois, avant de faire ces prélèvements, l'enquêteur devra s'assurer que la législation locale ne s'y oppose pas ; il devra aussi obtenir le consentement du sujet et il aura intérêt à expliquer le but des analyses avant de les entreprendre.

18.8.3 Il convient d'interroger l'équipage, mais la coordination doit être assurée par l'intermédiaire de l'enquêteur désigné pour éviter des répétitions inutiles du fait des besoins des divers groupes.

18.8.4 Les blessures de tous les occupants, ainsi qu'une détermination de leur cause, doivent être notées en détail ; les résultats doivent être mis en corrélation avec les sièges occupés ou l'emplacement des victimes dans l'aéronef et leur environnement immédiat, de façon à envisager des mesures préventives telles que des modifications à apporter à la conception de l'aéronef.

18.8.5 Si l'aéronef a été évacué en raison d'un incendie ou d'un risque analogue (par exemple celui d'un naufrage, dans le cas d'un amerrissage forcé), le récit complet de la manière dont chacun des rescapés a évacué l'aéronef apporte une contribution précieuse à l'évaluation des facteurs qui peuvent faciliter ou entraver l'évacuation.

18.8.6 Les enquêtes techniques sur les accidents ayant pour but de prévenir de nouvelles catastrophes, il convient aussi de s'attacher aux effets psychologiques que l'accident a eus sur l'équipage de conduite avant d'autoriser ses membres à reprendre leur service en vol.

18.9 AUTRES ASPECTS DE L'ENQUÊTE PATHOLOGIQUE

Antécédents médicaux et personnels de l'équipage de conduite — État de santé physique et mental avant l'accident

18.9.1 Il convient d'étudier les antécédents médicaux des membres de l'équipage de conduite pour déterminer l'existence éventuelle d'un état de santé de nature à leur interdire de mener à bien la tâche qui leur était confiée dans les conditions de vol. Tout état qui pourrait avoir entraîné une incapacité en vol ou compromis l'aptitude et l'efficacité du sujet doit retenir plus spécialement l'attention. Théoriquement, toute la gamme des maladies de l'être humain est une cause possible d'incapacité ou de diminution de l'efficacité dans l'accomplissement des tâches requises, mais les équipages sont soumis à un contrôle médical qui doit permettre de dépister les anomalies graves.

18.9.2 Il faut établir la corrélation entre les antécédents médicaux et les conclusions du pathologiste. Toutefois, de nombreuses anomalies fonctionnelles ne sont pas décelables à l'autopsie : l'épilepsie, pour ne citer que ce cas, en est un exemple typique. Il convient également de noter l'acuité visuelle et auditive de l'équipage mais, là encore, ce sont les résultats fondamentalement négatifs de l'examen pathologique dans un accident dont la cause présumée est l'intervention de facteurs humains qui appellera l'attention sur ces systèmes.

18.9.3 Dans certains cas, les recherches devront porter sur le passé de l'équipage de conduite et, notamment, sur les motivations qui ont conduit les sujets en cause à choisir leur carrière, sur leur intelligence générale, sur leur stabilité émotionnelle, sur leur caractère et leur comportement. Néanmoins, une fois de plus, des anomalies dans ce domaine, lorsqu'elles ont été dûment décelées, ne sont guère compatibles avec les méthodes modernes de sélection des équipages de conduite et il est probable qu'on obtiendra une documentation beaucoup plus précieuse des renseignements sur les récentes activités et le comportement des membres de l'équipage de conduite ainsi que sur leurs habitudes personnelles et professionnelles, sur leur état de santé général et sur leur comportement habituel pendant de longues années qui pourront être obtenus auprès des amis, des proches, des relations, des chefs, des instructeurs, des médecins de famille et d'autres observateurs des intéressés.

18.9.4 On ne prête pas toujours une attention suffisante à l'identification et à l'examen des éléments psychophysiologiques qui sont à l'origine de nombreux accidents. Des éléments humains tels que la perception, le jugement, la faculté de décision, le moral, la motivation, le vieillissement, la fatigue et l'incapacité constituent souvent des variables relativement intangibles, mais très importantes. Même lorsqu'elles sont décelées, elles sont difficiles à mesurer et à prouver et il faut souligner le fait qu'une association positive entre la découverte d'une de ces anomalies et la cause de l'accident est le plus souvent du domaine de la conjecture. Malgré ces difficultés, il faut tout mettre en œuvre pour dépister et rapporter ces facteurs humains d'une manière aussi complète que possible.

Les problèmes propres au vol au cours duquel s'est produit l'accident

18.9.5 De nombreuses questions qui ne sont pas médicales par nature peuvent intéresser le Groupe des facteurs humains et c'est là qu'une liaison étroite avec le Groupe de l'exploitation est indispensable :

- a) le plan de vol — notamment les consignes données et les cas dans lesquels ces consignes n'ont pas été respectées ;
- b) l'équipement de vol — notamment le type de l'aéronef, la disposition du poste d'équipage, l'équipement de pressurisation, de ventilation et thermostatique de la cabine ;
- c) les aides à la navigation — notamment l'utilisation qui en a été faite ;
- d) les circonstances et la phase du vol — notamment la présence possible d'émanations de carburant et d'autres liquides provenant des moteurs ainsi que d'émanations toxiques dégagées par les marchandises transportées ;
- e) l'évaluation de la charge de travail de l'équipage au moment de l'accident.

18.9.6 Ces renseignements ont essentiellement pour but de guider les membres du Groupe des facteurs humains dans des domaines d'enquête importants où ils poursuivront leurs recherches pour leur propre compte. C'est ainsi qu'un écart de la trajectoire de vol peut indiquer qu'il y a lieu d'examiner la possibilité d'une intoxication par le monoxyde de carbone ; un circuit de pressurisation suspect pourrait amener à confirmer ou à infirmer que l'accident est dû à l'hypoxie. La ventilation des causes probables d'intoxication simplifiera et orientera le travail du spécialiste de la toxicologie aéronautique. Tel est le genre de questions qui souligne la nécessité de rencontres fréquentes entre les chefs des groupes d'enquête et d'un échange approprié de renseignements au cours de ces rencontres.

18.9.7 Les problèmes propres au vol considéré portent plus spécialement sur la possibilité que l'aptitude et l'efficacité de l'équipage de conduite ne se soient trouvées compromises sans que cela apparaisse à l'autopsie. Des erreurs et des défaillances dans l'exécution des tâches peuvent se produire, que le vol se déroule comme prévu, que des circonstances imprévues se produisent ou que la situation revête un caractère d'urgence. Il faut chercher la cause de ces erreurs et de cette diminution des performances dans les erreurs suivantes :

- a) *Erreurs de perception.* Il s'agit ici des sensations provoquées par l'ouïe, la vue, le toucher ou la position du corps.
- b) *Erreurs de jugement et d'interprétation.* L'appréciation fautive des distances, la mauvaise interprétation des indications fournies par les instruments, la confusion des instructions, les illusions sensorielles, la désorientation, les défaillances de mémoire, etc., entrent dans cette catégorie.
- c) *Erreurs de réaction.* Il s'agit plus spécialement de l'exécution en temps utile et de la coordination des activités et des techniques neuromusculaires dans leurs rapports avec les mouvements des commandes.

18.9.8 Des causes annexes d'erreurs et de baisse d'efficacité peuvent se trouver dans des domaines tels que :

- a) l'attitude et la motivation ;
- b) l'affect émotionnel ;
- c) la persévérance.

18.9.9 Tous ces facteurs sont susceptibles d'être exagérés par la fatigue, qui est un facteur omniprésent mais insaisissable en exploitation aérienne ; c'est dans l'évaluation de l'effet multiplicateur de ces facteurs que le Groupe des facteurs humains pourra apporter un concours inestimable à l'enquêteur désigné.

18.9.10 Le Groupe des facteurs humains devra faire soigneusement la distinction entre l'hypothèse et l'indice authentique ; dans la mesure du possible, un accident ne devrait être attribué à un facteur psychophysiologique que sur la base d'indices matériels. Par exemple, on peut présumer que le pilote était particulièrement irritable au moment du vol ; mais l'écoute des enregistrements de ses transmissions en vol montrera de façon beaucoup plus concluante si cet affect a joué ou non un rôle au moment de l'accident.

18.10 RÉSUMÉ

18.10.1 La composition du Groupe des facteurs humains doit être déterminée d'après la nature de l'accident et des indices susceptibles d'être décelés par l'étude des éléments humains. La participation de spécialistes de la médecine aéronautique présentera le plus grand intérêt lorsque les survivants sont nombreux, mais dans tous les cas où il y a des morts, c'est aux services de pathologistes qu'il faudra recourir.

18.10.2 Notamment dans le cas d'un accident où il n'y a pas de survivants, les indices fournis par la pathologie constituent une partie essentielle des enquêtes techniques et l'enquêteur désigné devra s'assurer que des renseignements importants pour ces enquêtes ne seront pas sacrifiés pour répondre à des soucis d'ordre sociologique et juridique concernant la rapidité de l'identification et les dispositions à prendre en vue des obsèques. À cette fin, l'enquêteur désigné devra, si possible, obtenir le concours d'un pathologiste au fait des enquêtes relatives aux accidents d'aviation et capable de coordonner les deux fonctions interdépendantes de l'enquête et de l'identification.

18.10.3 Le pathologiste devra avoir pour but essentiel de recueillir des indices sur la cause, le déroulement et les effets de l'accident en examinant l'équipage de conduite, le personnel de cabine et les passagers. Parallèlement à ces enquêtes, des indices relatifs à l'identification et présentant une importance du point de vue médico-légal se feront automatiquement jour, surtout si chaque examen tire sa valeur de la coordination des travaux du pathologiste, de la police, d'odontologistes, de radiologues, etc.

18.10.4 L'examen pathologique sera considérablement facilité par des préparatifs bien compris, notamment lorsqu'il s'agit de retrouver les corps et de prévoir des installations frigorifiques permettant de réfrigérer des cadavres entiers. À défaut de ces préparatifs, il appartiendra à l'enquêteur désigné de mettre à la disposition du pathologiste les moyens nécessaires pour que celui-ci puisse procéder au moins aux opérations ci-après pour répondre aux besoins des enquêtes techniques et aux nécessités médico-légales et sociologiques :

- a) identification et examen complet de l'équipage de conduite situé dans le poste de pilotage ;
- b) examen externe complet de tous les cadavres ;
- c) identification du personnel de cabine et comparaison avec les passagers ;
- d) autopsie interne minimale de tous les cadavres, en vue notamment :
 - 1) d'établir la cause de la mort ;
 - 2) de déceler toute maladie grave de nature à influencer sur l'espérance de vie du sujet ;

- 3) d'évaluer les effets de la décélération sur :
 - i) le système cardiovasculaire, le foie et le diaphragme ;
 - ii) la tête, le sternum, la colonne vertébrale et le bassin.
- e) prélèvement de sang sur tous les cadavres pour en déterminer la teneur en carboxyhémoglobine ;
- f) prélèvement sur les poumons sur tous les cadavres en vue d'une estimation du mode de décès.

18.10.5 Le pathologiste expérimenté interprétera les résultats de ses recherches avec prudence. Pour leur part, le chef du Groupe des facteurs humains et l'enquêteur désigné ne doivent pas oublier que les conclusions du pathologiste ne constituent qu'une partie de l'enquête technique et qu'elles doivent être mises en corrélation avec les autres indices recueillis par le Groupe des facteurs humains et par d'autres groupes. L'expérience a montré que le travail est facilité et qu'il atteint son maximum d'efficacité si le pathologiste assiste aux réunions périodiques de l'enquêteur désigné.

Chapitre 19

ENQUÊTE SUR LES SABOTAGES PAR EXPLOSIFS

19.1 GÉNÉRALITÉS

19.1.1 Selon les statistiques de l'OACI, entre 1970 et 2007, 23 aéronefs ont été détruits en vol par des actes de sabotage, y compris les aéronefs détruits par la détonation d'un engin explosif à l'intérieur de l'aéronef. Ce nombre ne comprend pas les incidents connus de capture illicite ni les aéronefs abattus au cours d'activités militaires ou paramilitaires. Il ne comprend pas non plus les cas non confirmés ni les aéronefs disparus dans des circonstances troublantes.

19.1.2 Les scientifiques ont collaboré avec les services d'enquête de l'aviation pour déterminer si la détonation d'une charge explosive avait été utilisée dans un avion qui s'est écrasé dans des circonstances mystérieuses. Une grande expérience a été acquise dans les méthodes de fouille des débris et les indices scientifiques obtenus à l'aide de diverses techniques analytiques. Les paragraphes qui suivent exposent les principales techniques utilisées et, en particulier, les indices de diverses caractéristiques des dommages dus à des explosifs révélés par des examens métallographiques et des examens au microscope électronique à balayage. Bien que décrites brièvement, ces caractéristiques sont analysées par rapport à la valeur des indices. Les indices destinés à des fins judiciaires sont indiqués pour les divers matériaux non métalliques susceptibles d'être rencontrés et les méthodes d'examen physique ou chimique utilisées. Il est recommandé d'être prudent dans l'interprétation des tissus déchiquetés comme indication possible d'une explosion à bord d'un aéronef en vol par rapport à d'autres expériences d'explosion. Les niveaux de détection des explosifs sont indiqués pour les diverses techniques chromatographiques dont dispose actuellement l'analyste. La grande importance de la radiographie des corps et des bagages pour y déceler des fragments de métal est mise en relief. La détonation d'engins explosifs à l'intérieur d'un aéronef est un événement peu fréquent. Par conséquent les enquêteurs chargés d'enquêter sur les accidents qui pourraient être causés par ces engins doivent faire appel aux connaissances à jour d'experts en explosifs de la police ou de l'armée.

19.2 INDICES RELEVÉS PAR L'ENQUÊTEUR

Indices matériels sur les lieux de l'accident

19.2.1 L'enquête technique effectuée par des spécialistes sur les lieux de l'accident est de la plus haute importance. C'est dans ces circonstances que les connaissances et l'expérience de l'enquêteur sont précieuses, notamment si l'on soupçonne un sabotage au moyen d'explosifs, car c'est dans cette phase de l'enquête que l'on peut isoler et conserver pour un examen ultérieur de laboratoire le maximum d'indices matériels.

19.2.2 Lorsqu'on se trouve devant plus de 50 tonnes d'une épave désintégrée et parfois brûlée, probablement dispersée sur des kilomètres d'un pays désertique ou récupérée morceau par morceau sous forme de minuscules épaves flottantes, il est bien difficile durant les premières phases de l'enquête technique d'avoir une idée de la cause probable de l'accident. L'enquêteur doit travailler avec soin, sans idée préconçue avant de parvenir à la conclusion qu'une « explosion » que des témoins disent avoir vue ou entendue n'est pas due à un grave défaut de fonctionnement des circuits de l'avion ou de ses groupes motopropulseurs. Par exemple, la désintégration d'un disque de turbine tournant à grande vitesse peut produire un bruit ressemblant à une forte explosion.

19.2.3 Des morceaux de métal peuvent parfois perforer les ailes ou le fuselage et causer un incendie dont le résultat global pourrait donner à penser qu'une explosion s'est produite. Pour un enquêteur expérimenté, un examen détaillé révélera des différences considérables entre ce type de dommages et celui que produit la détonation d'une substance explosive (Figure III-19-1).

19.2.4 Une rupture de cellule à grande vitesse causée par des contraintes excessives ou des contraintes de fatigue sera souvent signalée par des témoins comme une « explosion » et le bruit, la fumée ou les vapeurs de carburant tendront à les ancrer dans cette idée.

19.2.5 La foudre peut également, dans de rares cas, provoquer des dommages locaux ressemblant à une explosion, notamment si la mise à la masse du circuit électrique de bord est défectueuse. En général, la foudre ne causera pas de dommages importants ou catastrophiques mais des incendies et des explosions à basse pression des réservoirs de carburant sont possibles si on utilise un carburant à bas point d'éclair et si les mises à l'air libre se trouvent à proximité des extrémités d'aile, où la foudre frappe de préférence. Des indices de décharges électriques d'entrée ou de sortie sur la cellule devraient normalement être visibles aux extrémités de l'avion.

19.2.6 Si l'on peut inspecter l'épave, les indices matériels de la présence et de la mise à feu d'un engin explosif présenteront des caractéristiques ou des signatures distinctives (Figure III-19-2).

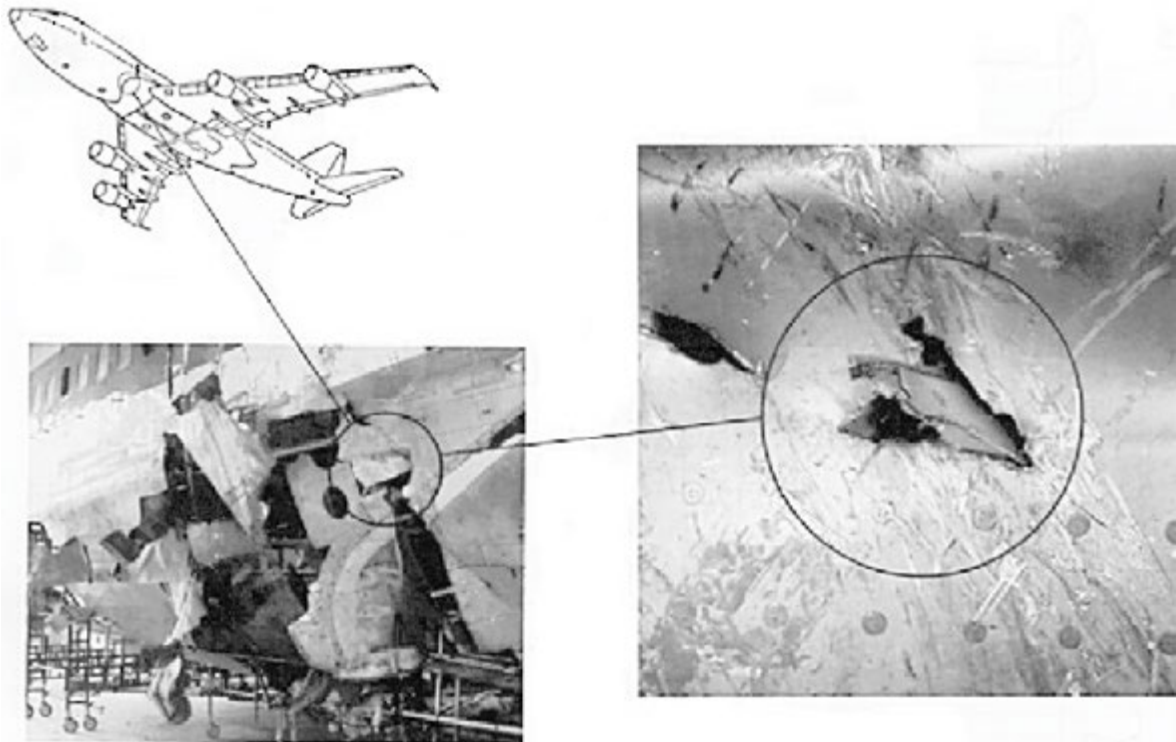


Figure III-19-1. Pénétration de fragments dans le vol 103 de Pan Am

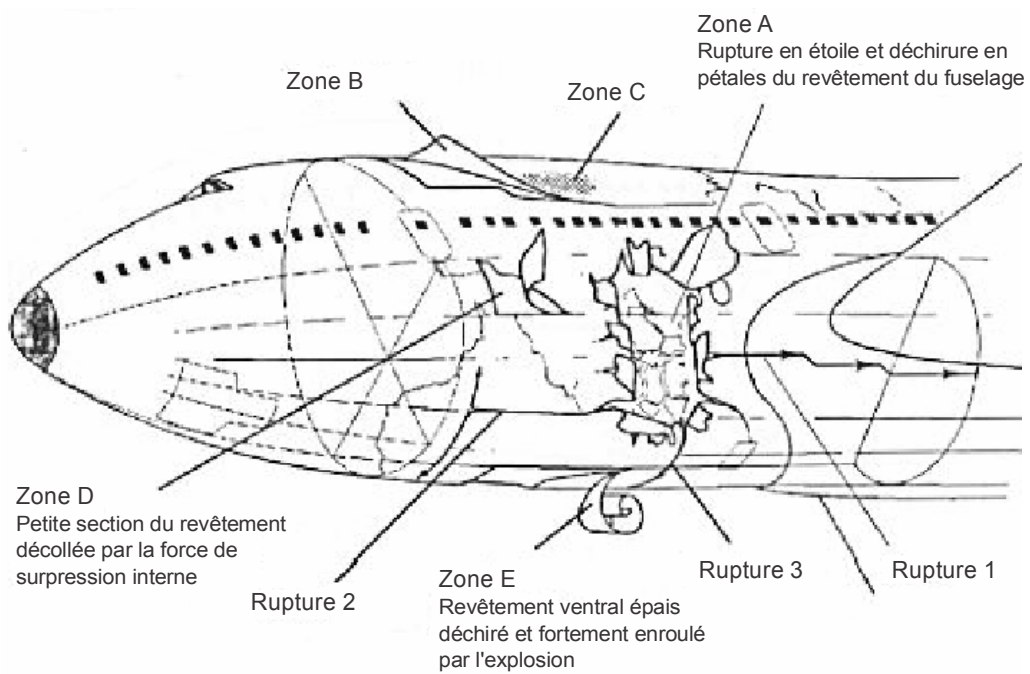


Figure III-19-2. Reconstitution du fuselage de l'avion du vol 103 de Pan Am

19.2.7 Les explosifs brisants modernes peuvent projeter des particules dont la vitesse, au moins la vitesse initiale, dépasse 7×10^3 m/s et ces particules, si elles sont suffisamment grosses, peuvent pénétrer profondément dans les éléments de la cellule et, même si elles sont très petites, peuvent pénétrer profondément dans les matériaux peu résistants tels que les coussins des sièges ou les corps humains. La rupture d'un circuit ou d'un élément des groupes motopropulseurs d'un avion est incapable d'accélérer des petites particules jusqu'à de telles vitesses. Les brûlures, les noircissements, les piqûres (c'est-à-dire les petits cratères dans les surfaces métalliques) ou le découpage à grande vitesse de matériaux mous sont des indices qui peuvent être tous présents et qui indiquent des circonstances très inhabituelles.

19.2.8 La déflagration elle-même, qui peut se produire dans une zone où ne se trouve aucun mécanisme ni aucun circuit sous pression susceptible de causer une telle déflagration est évidemment une indication en soi. Un tracé des trajectoires au moyen de tiges ou de câbles peut parfois aider à localiser l'origine de la déflagration. Très souvent, grâce à une fouille patiente et diligente pour relever de petits détails, on peut trouver des morceaux de détonateur ou d'un dispositif de retardement coincés dans un élément de la cellule, de la tapisserie, dans une valise, ou un colis ou un corps. De tels éléments, si petits soient-ils, sont capitaux et peuvent se révéler concluants. L'inspection des corps, des vêtements et des bagages est importante et tout indice qui semble indiquer une explosion, tel qu'un déchiquetage, un échauffement ou une fusion des fibres de matière plastique est important et les éléments en question devraient être conservés en vue de leur examen.

19.2.9 Ces éléments, soumis aux épreuves les plus modernes de la chimie peuvent fournir un indice quant au type d'explosif utilisé. Tout matériau, métallique ou autre, qui présente un aspect inhabituel et qui ne peut être identifié à aucune partie d'un avion doit être conservé pour une enquête plus approfondie car les dispositifs de retardement présentent des conceptions et des aspects infiniment variés. Tous les échantillons doivent à tout instant faire l'objet d'un maximum de sûreté.

Enregistreur de données de vol

19.2.10 La majorité des avions commerciaux de transport public sont maintenant dotés d'enregistreurs de données de vol (FDR) et d'enregistreurs de conversations dans le poste de pilotage (CVR). Le FDR est conçu et installé de telle façon qu'il puisse résister même à un impact violent, à l'incendie et à l'action des liquides.

19.2.11 Le FDR révélera, lors de son examen par des experts, les circonstances qui ont précédé immédiatement l'accident et qui peuvent aider à éliminer un certain nombre de causes possibles, mais il n'indiquera pas d'une manière précise s'il s'est produit une explosion à bord de l'avion. Pour que les renseignements fournis par le FDR soient utiles, l'enquêteur désigné doit placer, parmi ses objectifs, la récupération du FDR et veiller à ce que les données enregistrées soient disponibles le plus rapidement possible.

19.2.12 La reproduction d'un enregistrement de données de vol avec toutes ses lectures simultanées ne peut pratiquement pas entrer dans une seule page pour un certain nombre de raisons. Cependant, des extraits des traces critiques du Convair 880 de la compagnie Cathay Pacific Airways, accidenté le 15 juin 1972, sont reproduits sur la Figure III-19-3 pour illustrer les pointes enregistrées (entourées d'un cercle) et considérées ultérieurement comme indiquant qu'il s'était produit une détonation à bord de cet avion d'après les variations de l'accélération et de la vitesse. Les traces correspondant au cap, à l'assiette en tangage et à l'altitude présentaient les mêmes modifications brusques d'assiette.

19.2.13 La cessation brusque d'enregistrement des données, parfois accompagnée d'une saute brusque et incontrôlée des traces, est presque toujours due à la perte de puissance brusque provoquée par la rupture des câbles d'alimentation électrique. Une telle rupture peut être causée par une défaillance de la cellule ou par la détonation d'un engin explosif. Une brusque pointe de la trace de l'accélération pesanteur, positive ou négative, a été constatée au moment de l'arrêt des moteurs dans des cas où il a été établi qu'une explosion interne s'était produite. Cette pointe a un caractère et un minutage très différents de la pointe qui se produit en cas de turbulence et elle est probablement causée par une vibration très rapide du transducteur d'accélération qui est en général monté sur la cellule à proximité du centre

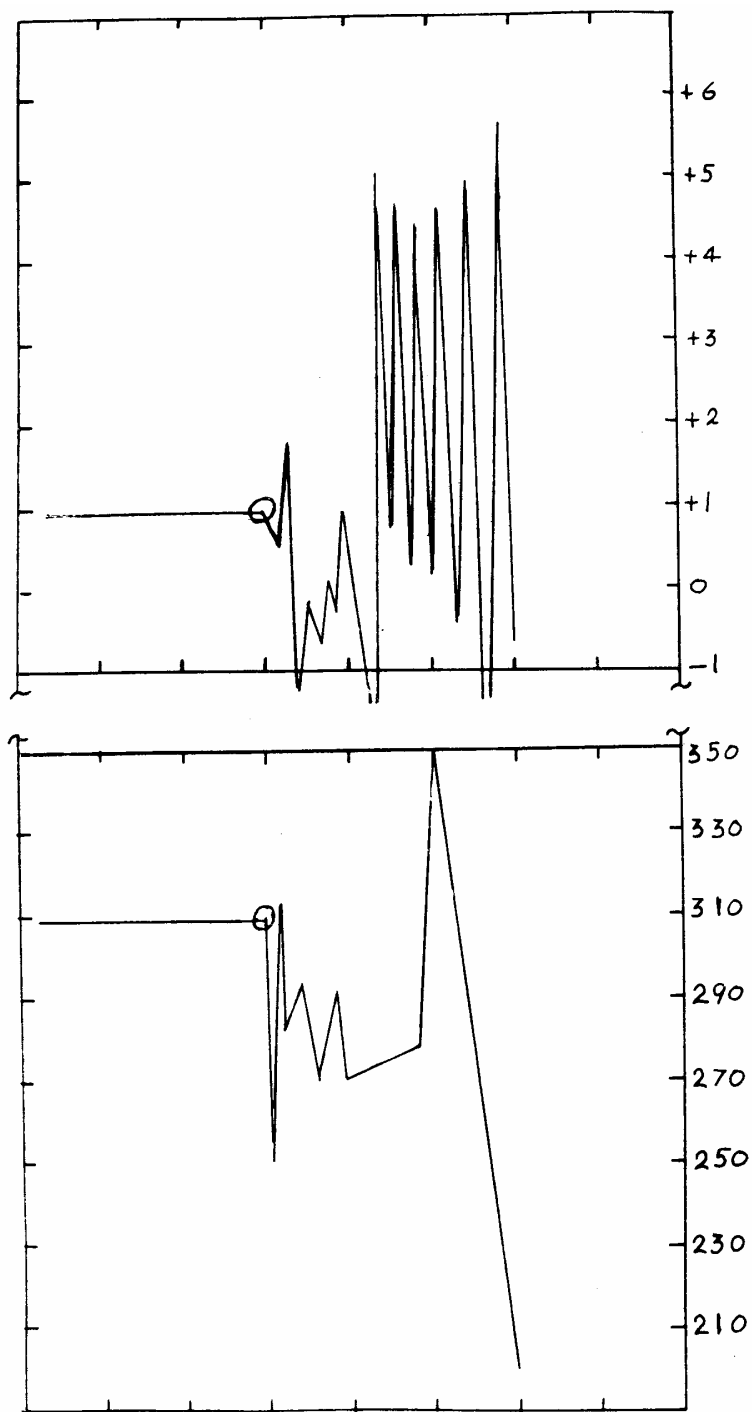


Figure III-19-3. Traces de vitesse et d'accélération du Convair 880

de gravité de l'avion (Figure III-19-3). La position de cette pointe anormale sur le support d'enregistrement indiquera le moment exact où l'incident s'est produit et, avec d'autres paramètres tels que la hauteur, la vitesse, le cap, l'assiette en tangage, etc., aidera beaucoup les enquêteurs à évaluer d'autres aspects de l'accident. Pour des raisons de sûreté, certains aéronefs sont aussi équipés d'enregistreurs vidéo dans la cabine pour fournir des preuves sur les passagers indisciplinés. Ces enregistrements peuvent aussi fournir la preuve de dommages causés par une explosion ou de la défaillance d'autres systèmes.

Enregistreur de conversations de poste de pilotage

19.2.14 Dans quelques rares cas, le CVR fonctionnant à partir d'un certain nombre de microphones placés dans le poste de pilotage a fourni des indices sur les événements qui se sont produits immédiatement avant l'incident, par exemple, des remarques faites par des membres d'équipage ou un bruit d'une milliseconde saturant l'enregistreur à la suite de l'onde de choc provoquée par la déflagration d'un engin explosif. Les microphones peuvent également enregistrer des avertissements sonores tels que des klaxons, des sonneries, etc., que l'on peut associer à une chute de pression brusque dans la cabine, à un incendie de moteur et d'autres défaillances.

19.2.15 La fumée et les gaz toxiques provenant des incendies peuvent être catastrophiques et la voix des membres de l'équipage enregistrée dans ce cas peut fournir des indices importants sur la cause ultime de la perte de contrôle finale. Lorsque l'enquête préliminaire semble indiquer un sabotage au moyen d'un engin explosif, la lecture et l'analyse des données de vol et des enregistrements de conversations dans le poste de pilotage doivent toujours être effectués par des experts, de préférence par ceux qui ont l'expérience des enregistrements de cas antérieurs de sabotage d'avions au moyen d'engins explosifs.

Caractéristiques superficielles intéressantes

19.2.16 Les ruptures de métaux causées par une explosion ont en général un caractère différent des cassures dues à des contraintes excessives ou aux forces d'impact. L'éclatement du métal en un grand nombre de petits fragments et la pénétration profonde de la surface d'un métal par des fragments minuscules ne sont pas des caractéristiques que l'on trouve généralement dans une épave à la suite d'un accident d'aviation. Les dimensions et les caractéristiques de ces particules souvent accompagnées d'un arrondissement du bord des cassures, d'un effritement de la surface, de piqûres, ou d'indices d'échauffement sont importantes car la surface d'une cassure peut ne pas fournir en soi des indices concluants d'une explosion. Toutes les particules suspectes devraient être conservées et identifiées en vue de leur examen ultérieur en laboratoire.

19.2.17 Si une explosion violente se produit à l'intérieur d'un aéronef en vol, le mode de désintégration de l'aéronef et la séquence des ruptures seront généralement très complexes et parfaitement illogiques du point de vue d'une contrainte aérodynamique excessive ordinaire. Avant de suggérer un sabotage par un engin explosif, il y a lieu, évidemment, d'éliminer la cellule et les moteurs de l'avion comme causes possibles de dommages causés à la structure et aux tissus.

Autopsie et examens radiographiques

19.2.18 Lorsque l'enquêteur a obtenu des indices matériels d'une explosion, il y a lieu de s'efforcer d'obtenir immédiatement un examen radiographique du plus grand nombre de morts et de blessés possible et de procéder à des interventions limitées pour extraire les particules implantées dans les corps. Une collaboration étroite avec l'équipe médicale, les pathologistes et/ou le juge d'instruction doit être établie dès le départ et le motif de cette liaison étroite doit être expliqué. Il faut également une coopération avec les autorités judiciaires et policières. Des qualités de diplomatie et de tact sont absolument nécessaires dans cette phase. Il est souhaitable, lorsque cela est possible, que le pathologiste participe ou assiste à l'examen radiographique des victimes. La photographie, de préférence en couleur, est également très utile pour une étude détaillée ultérieure.

19.2.19 Un examen pathologique pour déceler les effets d'une déflagration sur les tympans, les dommages pulmonaires dus à des surpressions, les blessures traumatiques inhabituelles ou importantes qui ne sont pas généralement associées à l'écrasement d'un avion, l'examen des tissus de la peau pour déceler la pénétration de la chaleur, les brûlures instantanées, le « criblage », etc., peuvent être très utiles.

19.2.20 Toute particule extraite, si petite soit-elle, doit être soigneusement conservée dans l'état où elle se trouve en vue d'un examen en laboratoire. On ne se rend peut-être pas assez compte que les liquides utilisés pour empêcher la putréfaction des objets métalliques extraits des corps, notamment les produits à base de formaldéhyde, peuvent causer une corrosion superficielle excessive pendant la durée de la conservation et le transport, ce qui peut entraîner la perte de caractéristiques topographiques précieuses. L'alcool chirurgical serait plus acceptable à cette fin. Il y a également lieu d'éviter de manipuler les particules avec des pinces ou autre objet du même genre qui pourraient également faire disparaître des marques superficielles.

19.2.21 Il se peut que l'autopsie ne révèle aucun indice d'explosion à cause de l'endroit où l'engin explosif avait été déposé et de l'effet d'écran de la structure de l'aéronef. Cependant, on ne saurait surestimer l'importance de la radiographie et de l'autopsie dans les premières phases d'une enquête lorsqu'on soupçonne un sabotage au moyen d'un engin explosif. Les objets retirés d'un corps, si petits soient-ils, peuvent devenir concluants lorsqu'ils sont soumis à une analyse métallurgique et chimique par un laboratoire scientifique et technique.

Identification des objets

19.2.22 Lorsqu'on recueille des objets pouvant présenter un intérêt scientifique, il ne faut pas oublier que des objets semblables trouvés à proximité mais qui ne présentent pas cet intérêt devraient être également recueillis à des fins de comparaison scientifique. C'est particulièrement le cas des tissus, des fils métalliques, des bagages et des vêtements. S'il est impossible qu'un expert légiste soit présent sur le lieu de l'accident pour aider à identifier les objets intéressants du point de vue des explosifs, ou pour recueillir à l'aide d'un solvant sur les surfaces intéressantes des traces d'explosif non décomposé, l'enquêteur doit veiller à ce que les cotons, solvants et autres articles ayant servi à faire des prélèvements soient placés dans des sacs de nylon scellés et convenablement étiquetés.

19.2.23 Il est possible que des poursuites judiciaires soient intentées à la suite d'examens en laboratoire ayant révélé la présence d'explosifs et les preuves de cette présence doivent être produites devant un tribunal. Pour éviter des difficultés à un stade ultérieur, les enquêteurs devraient apporter le plus grand soin aux dossiers d'origine, à la garde et à la remise d'objets pour un examen scientifique et technique et veiller à obtenir des documents et des signatures appropriées à tous les stades des transferts.

19.3 INDICES MÉTALLURGIQUES

Généralités

19.3.1 Les explosifs agissent par décomposition chimique à une vitesse beaucoup plus grande que la vitesse du son et cette décomposition est caractérisée par une réaction qui produit des gaz à très haute température et très haute pression. Ce processus de décomposition extrêmement rapide, connu sous le nom de déflagration, libère de grandes quantités d'énergie. Les explosifs militaires Brisants se caractérisent par une vitesse de 7×10^3 m/s et une pression de 3×10^5 atmosphères, ce qui représente deux valeurs élevées. On peut comparer ces valeurs à celles d'autres phénomènes rapides qui peuvent se produire lors d'accidents d'aviation, par exemple à une explosion d'un mélange air-carburant, qui produit généralement des surpressions de l'ordre de 2×10^1 atmosphères mais qui peuvent exceptionnellement atteindre 2×10^2 atmosphères, ou aux vitesses d'impact au sol se situent entre 50 et 200 m/s avec un maximum probable pour les avions supersoniques de 500 m/s. On peut également comparer ces valeurs à la vitesse périphérique maximale que prendrait une ailette de turbine qui se briserait au régime de décollage et qui pour une soufflante basse pression de

Boeing 747 est d'environ 450 m/s. On voit donc que la déflagration des explosifs Brisants présente des caractéristiques de violence et de rapidité qui produisent un certain nombre de signatures imprimées dans le métal qui peuvent être nettement identifiées par un examen approprié.

19.3.2 Lorsqu'une déflagration se produit, on peut observer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- a) la création de multiples petits fragments provenant de l'enveloppe de la bombe ;
- b) la déformation sous de fortes contraintes des matériaux voisins de la source de déflagration ;
- c) la formation d'effets superficiels caractéristiques tels que des piqûres et/ou une érosion et une fusion par les gaz ;
- d) la formation de cassures caractéristiques.

Fragments

19.3.3 Il n'est pas nécessaire qu'un engin explosif comporte une enveloppe métallique rigide pour être efficace mais, si tel est le cas, l'enveloppe se brise sous l'effet des gaz chauds en expansion et les fragments de cette enveloppe sont projetés vers l'extérieur comme s'ils provenaient d'une source ponctuelle. En général, plus la vitesse d'expansion des gaz est grande, plus les fragments sont petits. Ces fragments seront eux-mêmes peu déformés s'ils sont décélérés relativement lentement, par exemple s'ils rencontrent sur leur parcours des objets mous tels que les coussins des sièges, des corps humains ou des valises. En fait, lors d'enquêtes effectuées dans le passé, ces trois sources ont permis d'obtenir de précieuses informations (Bedford, 1976 et Clancey, 1968). L'impact ultérieur avec du bois ou des surfaces laminées de matière plastique ou même de métal provoque rarement une perte totale des caractéristiques de déflagration.

19.3.4 Les fragments que l'on retrouve sont généralement situés au fond d'une cavité carbonisée, notamment dans la mousse de polyuréthane des coussins de siège et c'est là une indication de grande vitesse d'impact. Les fragments sont souvent suffisamment chauds à l'impact pour provoquer la fusion de la matière plastique environnante comme l'a montré l'enquête sur le Comet et comme on peut le voir sur la Figure III-19-4.

Caractéristiques superficielles des fragments

19.3.5 On a relevé certaines caractéristiques des fragments provenant aussi bien d'explosions contrôlées en laboratoire que d'épaves d'aéronefs accidentés. Une compilation très utile de ces caractéristiques superficielles figure dans une publication (Tardiff et Sterling, 1967), qui illustre un certain nombre de caractéristiques superficielles qui ont été produites par un explosif Brisant commercial à base de nitroglycérine et un explosif militaire plastique (RDX) sur de l'acier doux et de l'aluminium. Les microcaractéristiques que l'on a relevées sont l'érosion et la fusion par les gaz, la piqûre et l'arrondissement du bord des cassures, caractéristiques que l'on rencontre le plus couramment.

Érosion et fusion par les gaz

19.3.6 Cet effet consiste en une fusion et une érosion superficielle du métal par les gaz chauds produits par la déflagration ; on le relève le plus souvent sur la surface intérieure de l'âme des canons après un tir excessif et il est de ce fait bien documenté et bien connu. La Figure III-19-5 montre la surface d'un fragment de l'épave du Comet qui présente cette caractéristique et un effet semblable après une déflagration de RDX contenue dans un tube en aluminium.

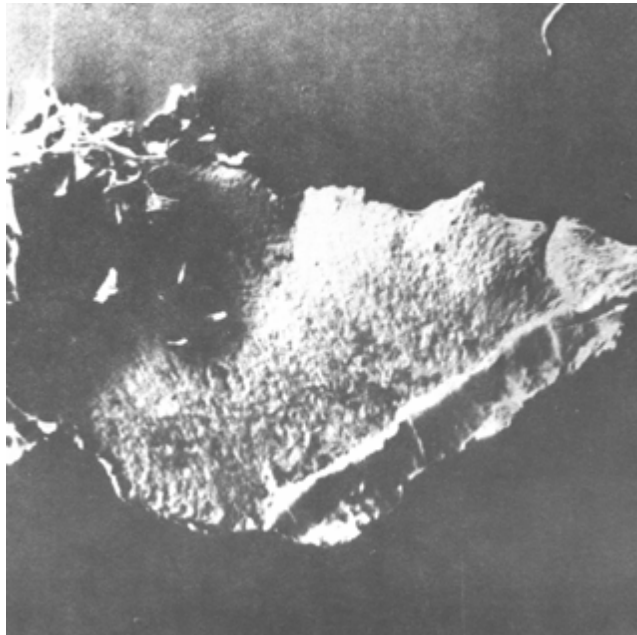


Figure III-19-4. Fragment de siège du Comet avec occlusion de mousse de polyuréthane

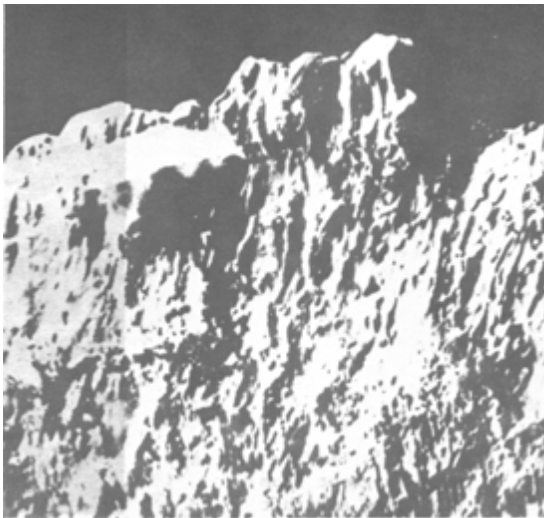


Figure III-19-5. Effet d'érosion et de fusion par les gaz sur un fragment du Comet (à gauche). Érosion et fusion par les gaz provenant de la déflagration de RDX sur un morceau d'aluminium (à droite).

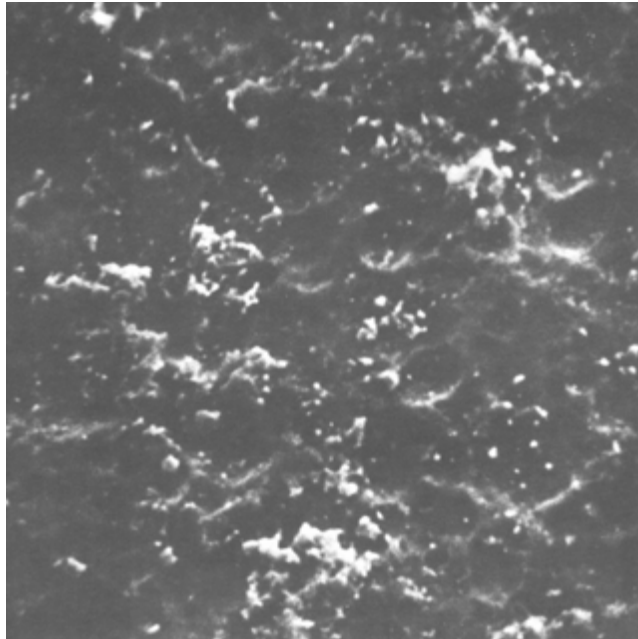


Figure III-19-6. Piqûres à la surface d'un fragment du Comet

Piqûres des surfaces

19.3.7 Cette caractéristique, illustrée à la Figure III-19-6, peut être observée sur la surface des fragments la plus proche du point de déflagration ; elle a été également relevée sur des fragments du Comet et du Boeing 720B de la Middle East Airlines (Higgs et divers, 1976). Dans ce dernier cas, il a été confirmé que du RDX se trouvait dans certains des bagages de la soute. On suppose que les piqûres sont causées par des particules à grande vitesse d'explosif partiellement brûlé et/ou de matière étrangère fondue qui se trouvait entre la charge explosive et le matériau « témoin ». On a fait exploser respectivement dans des conditions contrôlées un explosif brisant commercial à base de nitroglycérine et du RDX dans des tubes en aluminium et on a remarqué que seuls les fragments provenant de la déflagration du RDX présentaient des piqûres.

Arrondissement du bord des cassures

19.3.8 Cette caractéristique de cassure liée à la formation du fragment représenté à la Figure III-19-7 qui provient de l'accident survenu au DC8 de la compagnie Cubana (Higgs et divers, 1977) et qu'il y a lieu de comparer avec des caractéristiques semblables produites expérimentalement comme le représente la déflagration d'une charge de 57 g (2 oz) d'un explosif brisant commercial ligaturé sur une pile sèche à boîtier de zinc de 1,5 volt. On sait que cette caractéristique ne se produit que dans le cas d'une déflagration et on estime qu'elle est le résultat de l'échappement des gaz chauds qui provoque une fusion partielle et un polissage du bord de la cassure dans une direction inverse de celle des gaz. Les bords de cassure présentant cette caractéristique sont complètement lisses et ne portent aucune marque de cassure ou autre fissure.

19.3.9 Il est difficile d'imaginer que ces fragments puissent être produits par un autre moyen que par l'action d'explosifs. Les particules révèlent des traces de chaleur intense, de dépôts de produits chimiques et de déformation sous de fortes contraintes. Bien qu'un usinage classique produise des particules présentant la même forme générale, leur examen au microscope électronique révèle des caractéristiques superficielles entièrement différentes. La déformation

causée par l'action de l'outil tranchant constitué de sillons parallèles donne un effet général de champ labouré. Les résultats d'expériences de laboratoire au cours desquelles de petits fragments ont été produits par l'action d'explosifs sont parfaitement en accord avec les constatations faites sur les éléments provenant de l'accident.

19.3.10 Ainsi, on peut voir que de petites particules de métal qui présentent une érosion et fusion par les gaz, des piqûres et un arrondissement du bord des cassures ne peuvent provenir que d'une explosion et il y a un parfait accord entre les constatations faites sur les pièces à conviction et les résultats des expériences en laboratoire.

19.4 STRUCTURE ET COMPOSITION DES FRAGMENTS

Maillage

19.4.1 De même que les explosifs produisent des effets superficiels, il existe des mécanismes de déformation propres aux contraintes brutales aux températures normales. Sous l'effet de contraintes normales, les métaux se déforment en suivant les mécanismes habituels liés au mouvement de dislocation. Cependant, étant donné que ce processus est activé thermiquement, lorsque les contraintes sont brutales, ce processus ne peut se produire faute de temps et, dans certains métaux, la déformation se produit par maillage, comme on peut le voir sur la Figure III-19-8.

19.4.2 Cette caractéristique est bien connue en ce qui concerne le cuivre et le fer et elle est considérée comme une preuve nette d'une explosion. Elle a été relevée sur des fragments récupérés des épaves du Comet en 1967 et du Boeing 707 de la compagnie TWA en 1974.

19.4.3 Il est possible, à l'occasion, de relever ces caractéristiques dans des éléments qui étaient au voisinage du centre de l'explosion mais qui ne faisaient pas partie de l'enveloppe de la bombe (Cox, 1974). Cependant, la détection de macles au moyen du microscope optique dans ce cas exige beaucoup de persistance, car ce cas est peu fréquent.

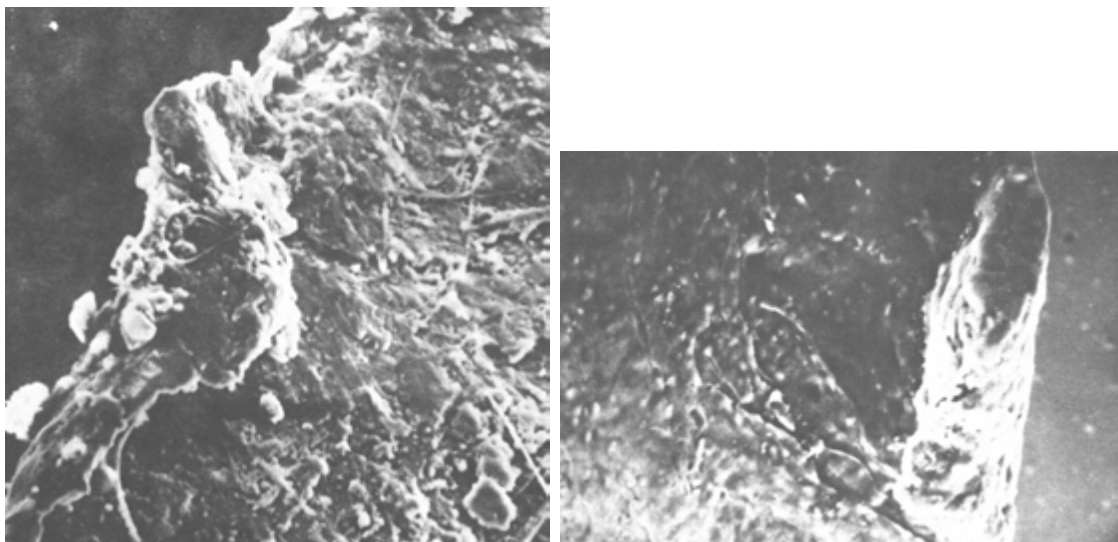


Figure III-19-7. Arrondissement du bord d'une cassure sur un fragment du Comet (à gauche). Déflagration contrôlée d'un explosif à base de nitroglycérine associé à une pile sèche au zinc de 1,5 volt (à droite)

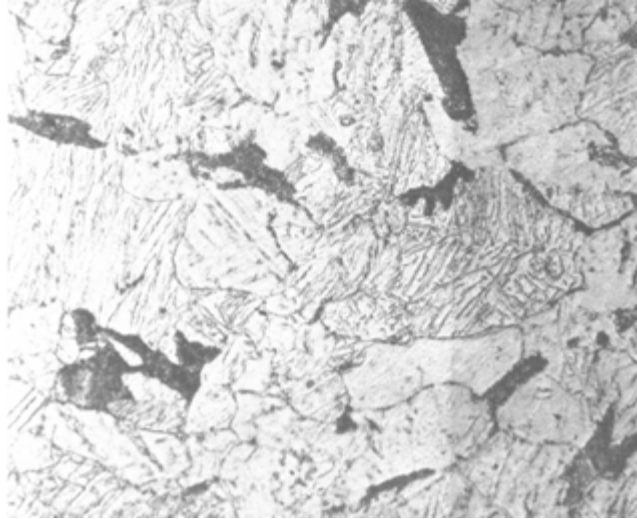


Figure III-19-8. Maclage dans un morceau d'acier doux

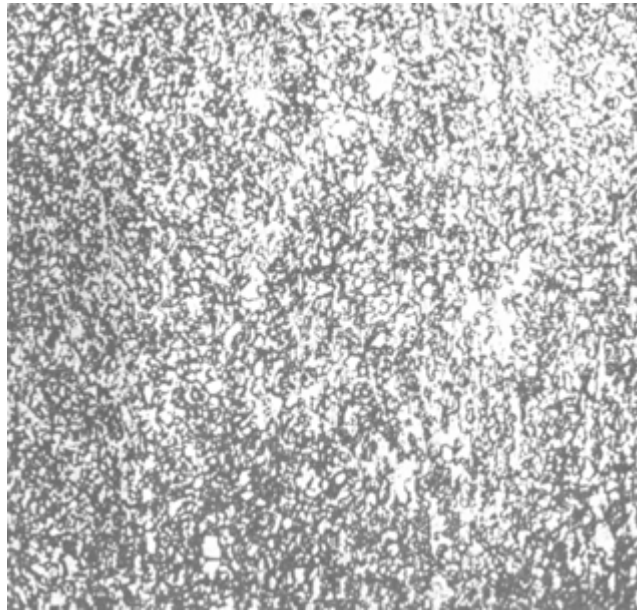


Figure III-19-9. Exemple de recristallisation dans un fragment d'alliage d'acier

Recristallisation

19.4.4 Parfois, la déformation subie par un fragment est si grande que la particule s'échauffe suffisamment pour qu'il se produise une recristallisation de la structure soumise à la déformation. De plus, étant donné que les particules sont généralement petites et que, par conséquent, leur refroidissement est rapide, il en résulte un grain anormalement fin de l'ordre de 1 à 3μ , comme le montre la Figure III-19-9. Les aciers doux commerciaux actuels ont un grain d'environ 50μ et plus. Des grains extrêmement fins ont été observés lors d'expériences contrôlées et d'enquêtes sur des accidents (Higgs et divers, 1976). Cependant, il est possible de produire des grains aussi fins, soit par un traitement thermomécanique spécial ou, plus couramment, en employant des inhibiteurs de croissance de grain. C'est pourquoi un grain fin ne peut être considéré que comme une indication et non comme une preuve nette d'échauffement dû à des explosifs.

Composition

19.4.5 La découverte de fragments de matériaux différents de ceux qui sont utilisés dans la cellule d'un aéronef est un autre indice important de l'explosion d'objets introduits à bord de l'aéronef. Des fragments d'alliage d'acier à faible teneur ont été découverts lors d'enquêtes judiciaires. Il est parfois nécessaire de vérifier tous les matériaux utilisés dans l'aéronef pour confirmer que l'explosif se trouvait dans une enveloppe dont le matériau était étranger à tous les matériaux utilisés à bord de l'aéronef considéré.

Dommages à la cellule — Cisaillement adiabatique

19.4.6 Un cisaillement adiabatique se produit lorsque la chaleur engendrée par la déformation plastique n'a pas le temps de se dissiper. Il en résulte des modifications microstructurelles qui ont été constatées dans l'acier, comme le montre la Figure III-19-10 (Bedford et divers, 1976) et dans les alliages de titane, de cuivre et d'aluminium. Les conditions nécessaires à la production d'un cisaillement adiabatique sont que la déformation soit limitée à une zone restreinte, que les contraintes soient grandes et que la déformation soit rapide. Ces conditions se présentent dans le cas de l'impact d'un projectile sur la cible et dans la fragmentation des engins explosifs.

19.4.7 Cependant, on a montré (Wingrove, 1973) que dans des conditions favorables, un cisaillement adiabatique peut se produire à des vitesses de 160 m/s, mais on n'a pas encore déterminé de limite inférieure. En conséquence, bien que la détection de zones de cisaillement adiabatique soit une indication très utile, elle ne peut être considérée comme une preuve concluante.

Cratères d'impact

19.4.8 Un excellent exemple de piqûre des surfaces a été trouvé dans des éléments de cellule du Convair 880 VR-HFZ de la compagnie Cathay Pacific Airways, accidenté le 15 juin 1972 (Lidstone, 1972). La Figure III-19-11 montre un exemple typique de plusieurs cratères de ce genre qui étaient tous entièrement noircis, ce qui laissait supposer un incendie postérieur à la formation des cratères.

19.4.9 L'impact sur la cellule de petits fragments d'enveloppe de bombe peut être d'une violence telle qu'ils produisent une cavité avec des projections comme le montre la Figure III-19-12. On peut calculer que le fragment doit avoir été projeté à des vitesses supérieures à 10^3 m/s pour que la particule fonde. La présence d'une telle caractéristique est donc un bon indice d'une déflagration.

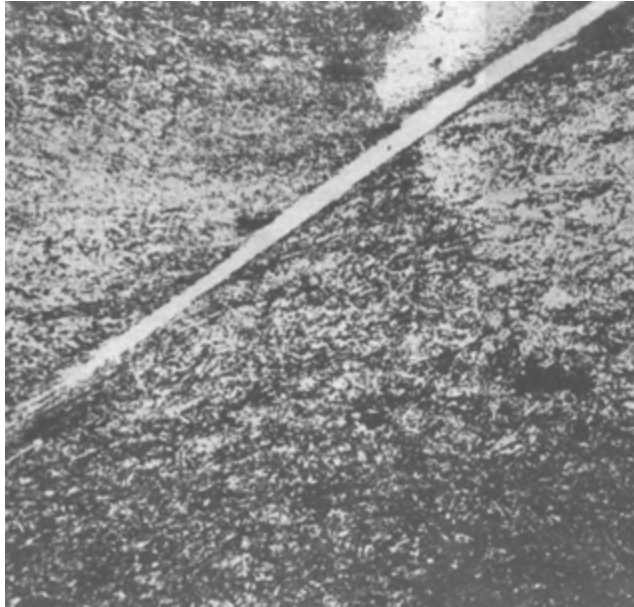


Figure III-19-10. Cisaillement adiabatique dans de l'acier doux

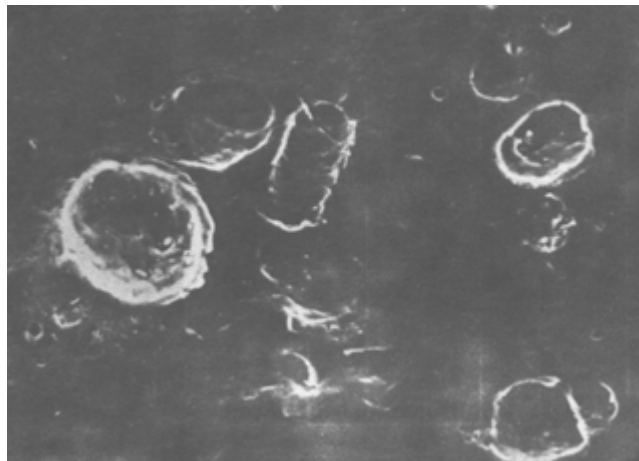


Figure III-19-11. Piqûres résultant d'un impact à grande vitesse

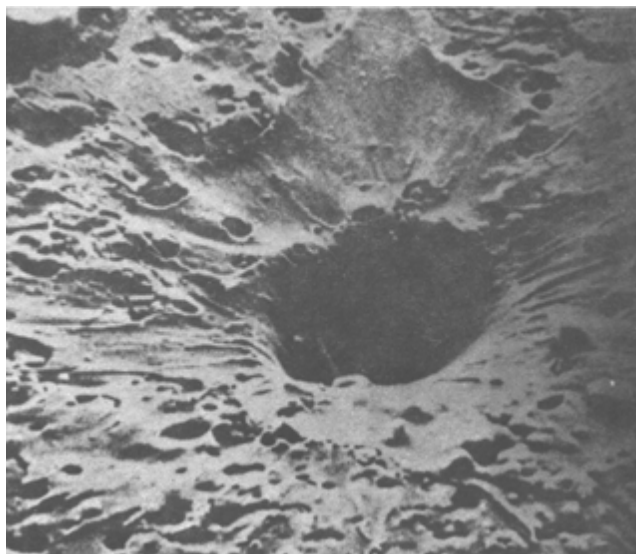


Figure III-19-12. Piqûre d'un morceau d'aluminium provenant de la voilure du Convair 880 VR-HFZ

19.5 CHIMIE ET ÉVALUATION DES MATÉRIAUX

Rôle de l'expert-légiste

19.5.1 Le rôle qui incombe normalement à un expert-légiste qui doit expertiser des débris de bombe est d'isoler parmi une masse énorme de débris ceux qui restent après la déflagration d'une bombe ou d'un engin explosif improvisé (IED). À ce titre, il doit donc chercher à découvrir des fragments de pile, de mécanisme d'horlogerie, de fils électriques, de rubans adhésifs et d'enveloppe d'explosif. En général, il y a d'autres indices montrant qu'une explosion s'est produite et l'expert-légiste doit chercher tout particulièrement à identifier les éléments de l'engin et à frotter certains objets à l'aide d'un coton imbibé de solvant en vue de l'identification chimique de l'explosif utilisé.

19.5.2 Un autre aspect de l'expertise légale sur les engins explosifs est le fait que les tribunaux britanniques n'exigent pas de preuves détaillées de la relation d'une pièce à conviction avec une explosion comme c'est le cas dans certains autres pays. Il suffit que l'expert qui témoigne déclare que, à son avis fondé sur de longues années d'expérience, les dégâts sont analogues aux dégâts causés par des explosions contrôlées effectuées à l'aide d'explosifs et de matériaux semblables.

19.5.3 Le problème auquel doit faire face l'expert-légiste qui doit examiner l'épave d'un aéronef est fondamentalement différent car il ne peut considérer qu'une explosion, c'est-à-dire la déflagration d'une charge explosive, s'est produite simplement par ouï-dire. Dans ce cas, l'expert doit chercher des signes de dégâts qui ressemblent aux dégâts connus causés par des explosions au sol et utiliser ces indices comme point de départ de ses investigations en restant à tout moment ouvert à d'autres possibilités qui pourraient expliquer les indices relevés. Tel a été le début de l'enquête judiciaire sur l'accident du Comet G-ARCO.

19.5.4 Les caractéristiques métallurgiques décrites ci-dessus ne sont pas les seuls indices d'une déflagration ; il faut aussi tenir compte des dommages subis par des matériaux non métalliques tels que : a) des tissus déchiquetés et effilochés, b) des panneaux de matière plastique présentant de petites perforations, c) des dégâts inhabituels et une décoloration des tentures ou des matériaux des sièges, et d) des bagages gravement endommagés, etc., voisinant avec

de nombreux autres qui semblent relativement intacts. Ces caractéristiques n'indiquent pas d'une manière irréfutable l'existence d'une explosion mais, lorsque ces indices sont examinés avec un fort grossissement, on peut en tirer des renseignements précieux comme l'indiquent les paragraphes qui suivent.

Radiophotographie

19.5.5 Des stries sombres accompagnées de déchirures irrégulières qui semblaient rayonner à partir d'un point sur l'un des morceaux de tissu des sièges découverts par l'enquêteur ressemblaient étroitement aux dommages causés à un tissu similaire de siège en polyuréthane qu'il avait vu au RARDE, à Woolwich. Ce dernier morceau de tissu faisait partie des pièces à conviction d'un cas où un explosif avait été utilisé par des criminels pour ouvrir un coffre-fort et le coussin avait été utilisé pour amortir le bruit de l'explosion.

19.5.6 L'histoire du Comet est suffisamment connue pour qu'il ne soit pas nécessaire de la relater en détail. Un exposé bref mais utile des caractéristiques marquantes des enquêtes faites à ce sujet a été publié dans *The New Scientist* (Clancey, 1968b). L'enquête sur le Comet était la première enquête de ce genre et était caractéristique de plusieurs enquêtes ultérieures à trois égards importants.

19.5.7 Premièrement, elle mettait en relief l'utilité d'une radiophotographie des objets et des corps pour localiser de menus fragments de matériaux, notamment lorsqu'il y a des indices de pénétration de ces objets ou de ces corps. Deuxièmement, elle a révélé qu'une masse de renseignements peut souvent être tirée d'un minimum de débris et que les matières plastiques sont aussi utiles que les métaux pour montrer des dommages caractéristiques. Troisièmement, elle a inauguré l'emploi du microscope électronique à balayage pour l'examen et l'analyse des fragments.

Analyse des fibres

19.5.8 Un fragment de zinc extrait d'un coussin de siège du Comet portait une touffe de matière fibreuse composée de 40 à 80 fibres d'un diamètre maximal de 0,01 mm, torsadée d'une manière lâche dans le sens des aiguilles d'une montre. Les fibres étaient aplaties et creuses et présentaient les convolutions typiques du coton (Todd et divers, 1968). La Figure III-19-13 représente ces fibres comparées à des fibres blanches analogues prélevées dans une enveloppe de coussin de siège du Comet. Les essais chimiques ont confirmé que les fibres étaient du coton et des coupes polies de fibres montées dans de la résine époxyde présentaient la coupe creuse typique en forme de haricot du coton.

Analyse par diffraction aux rayons X

19.5.9 Une enquête sur un accident d'aviation qui illustre la valeur de l'identification des espèces moléculaires au moyen de l'analyse par diffraction aux rayons X est celle qui a été effectuée sur les des débris du Viscount E1-AOM de la compagnie Aer Lingus, accidenté dans la mer d'Irlande le 24 mars 1968 (Higgs, 1970). L'enquête effectuée sur l'épave originale par Clancey n'avait révélé aucun indice d'explosion. Quelques 18 mois plus tard, deux rideaux ont été repêchés et envoyés à l'un des auteurs pour examen. L'un des rideaux, représentés à la Figure III-19-14, présentait une grande zone noircie qui a été attribuée à un incendie s'étant produit à bord de l'avion avant qu'il ne s'écrase en mer.

19.5.10 Le rideau présentait, côté cabine, un dessin régulier en relief imprimé sur un fond spéculaire argenté qui donnait un aspect général satiné. L'enlèvement de la couche extérieure de polymère à l'aide d'un solvant a mis à nu la substance spéculaire sous-jacente qui s'est révélée ultérieurement, à la suite d'une analyse par diffraction aux rayons X, être une forme de carbonate de plomb basique connue sous le nom de PLUMBONACRITE. De plus, les zones noircies présentaient une teneur de cette substance inférieure aux parties non noircies et une nouvelle analyse par diffraction aux rayons X a révélé la présence de sulfure de plomb.

19.5.11 L'expérience a montré que l'immersion du rideau décoloré dans de l'eau contenant de l'hydrogène sulfuré provoquait une lente conversion du carbonate basique de plomb blanc en sulfure de plomb plus foncé.

19.5.12 L'examen du rideau pour déterminer s'il avait été contaminé par de l'huile était difficile en raison de la présence d'une laque modifiée à l'huile constituant la couche protectrice extérieure. La comparaison des parties tachées et non tachées du rideau n'ont révélé aucune différence qui pouvait être attribuée à la présence d'huile. Néanmoins, il a été considéré que la cause la plus probable du noircissement du rideau avait été l'action d'une certaine quantité d'huile sulfatée ou sulfonée emprisonnée dans les plis du rideau, qui avait été trouvée dans la position roulée, que cette huile avait subi une dégradation biologique au cours de la longue immersion du rideau dans l'eau de mer et que l'excès d'huile avait été depuis longtemps éliminé par l'action des vagues.

Examen microscopique

19.5.13 On peut citer plusieurs excellents exemples (Higgs 1974, Hayes 1976, Higgs 1976 et Todd 1968) à l'appui de l'utilisation d'un simple stéréomicroscope pour mettre en relief des caractéristiques qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Les résultats les plus spectaculaires sont peut-être ceux qui ont été obtenus dans le cas, pourtant apparemment défavorable, de l'épave du Boeing 707-3311, N8734 de la compagnie TWA, qui s'est écrasé dans la mer Ionienne (Higgs 1974).

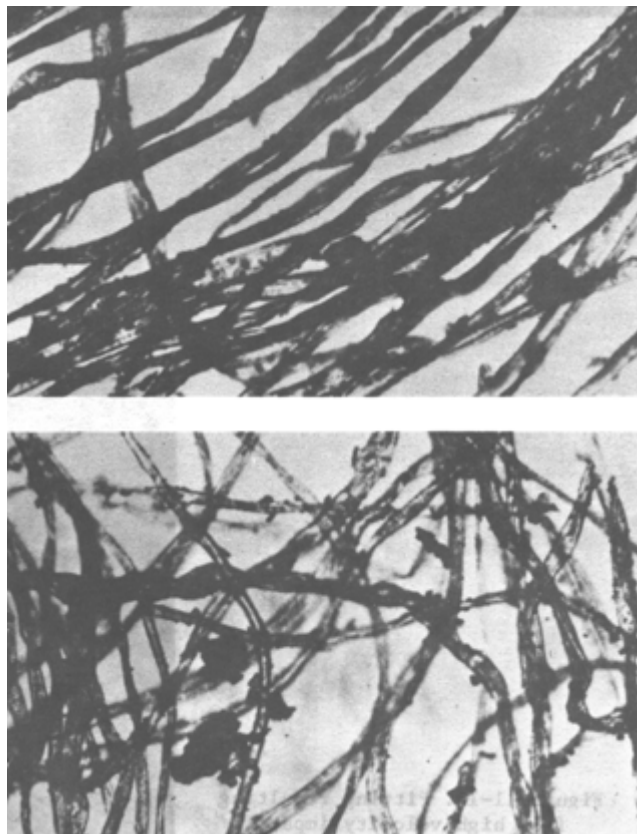


Figure III-19-13. Comparaison des fibres du fragment du Comet (en haut) avec des fibres de siège (en bas)

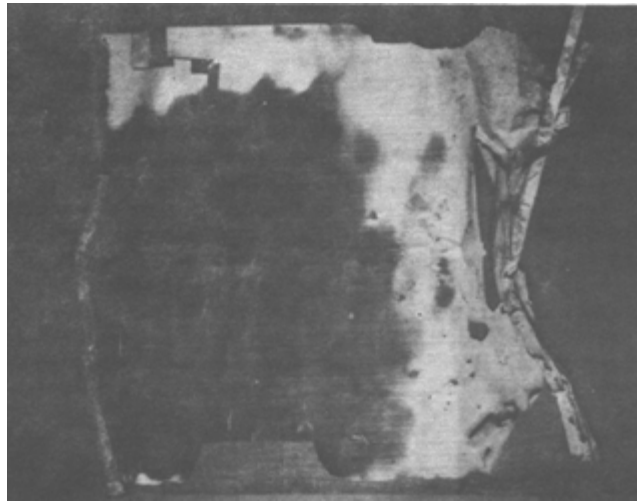


Figure III-19-14. Rideau endommagé et noirci du Viscount de la compagnie Aer Lingus

19.5.14 Parmi le peu d'éléments récupérés, une valise Samsonite rouge qui semblait n'avoir subi que quelques dommages sans importance présentait un intérêt particulier. Un examen minutieux a révélé de très petites perforations et lacérations de la couche de matière plastique rouge extérieure. À ces perforations correspondaient, dans la structure intérieure nervurée de polyéthylène à haute densité, des trous noircis et fondus que l'on peut voir sur la Figure III-19-15. Les zones endommagées et noircies ont été examinées à l'aide d'un stéréomicroscope de faible puissance et on a constaté qu'elles présentaient une masse de matière plastique déchiquetée, noircie et ramollie dans laquelle se trouvaient de nombreuses fibres colorées qui n'avaient manifestement aucun lien avec les tissus de la valise. Une exploration minutieuse à l'aide de pinces pointues a révélé la présence de plusieurs menus fragments de métal tous plus petits qu'une tête d'épingle. Par la suite, il s'est révélé que ces fragments isolés de métal étaient constitués d'aluminium, de cuivre, de laiton, de zinc et de fer. Chaque fragment a été monté sur une plaque de microscope en vue de son examen immédiat. Une microanalyse au microscope électronique à balayage a confirmé la composition élémentaire de ces fragments et révélé des caractéristiques superficielles fortement déformées. La présence de traces de dioxyde de manganèse a également été confirmée dans certaines des zones noircies de cette valise, ce qui suggérait la présence d'une pile électrique au voisinage immédiat de la source de déflagration. Des fragments typiques sont illustrés à la Figure III-19-16.

Dommages subis par les tissus

19.5.15 Les débris du Boeing 720B ont révélé des dommages subis par des matériaux fibreux qui n'avaient pas été rencontrés auparavant. Une valise verte, qui n'avait pas été fortement endommagée, présentait une petite déchirure externe près du bord supérieur. Un examen minutieux a révélé la présence dans la déchirure d'un matériau fibreux rouge partiellement fondu. Cette valise verte comportait un tissu de renforcement jaune à tissage lâche qui était resté intact au-dessous de la déchirure dans l'enveloppe extérieure verte en matière plastique. Cependant, la masse rouge incrustée avait pénétré entre la chaîne et la trame du tissu jaune et y adhérait fortement. Ce dommage ne pouvait résulter d'un impact mécanique et montrait que la masse fibreuse rouge avait été projetée sur la valise verte à haute température et à très grande vitesse.

19.5.16 Une chemise Clubmaster en polyester blanc portait également des traces de bombardement par un matériau fibreux rouge fondu analogue en deux endroits, à savoir dans la région du col et au coin de la boutonnière de la manche droite. Dans les deux cas, les fibres rouges avaient pénétré le tissu de la chemise non endommagée pour apparaître sur la face opposée du tissu de polyester. La masse fibreuse rouge adhérait si fortement au polyester qu'il était impossible de les séparer par traction à l'aide de pinces.



Figure III-19-15. Perforation noircie caractéristique de la valise Samsonite

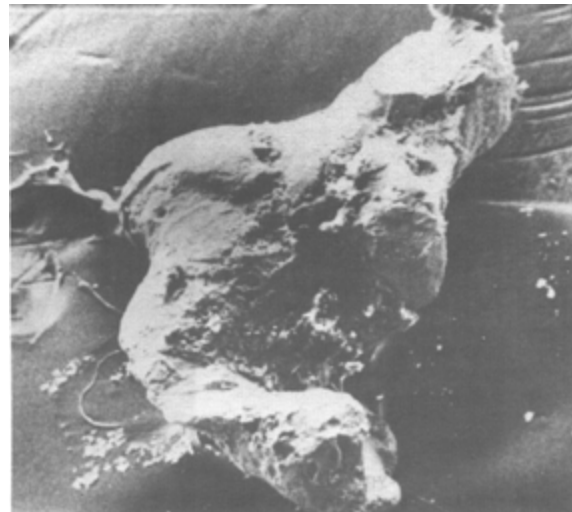


Figure III-19-16. Fragment d'aluminium (à gauche) et fragment de cuivre (à droite)
provenant de la valise Samsonite du Boeing 707-331B

19.5.17 La découverte de RDX et de nitroglycérine avec la caractéristique ci-dessus et de nombreuses autres qui ne sont pas mentionnées ici montre sans aucun doute qu'une charge explosive avait sauté à bord de l'aéronef à proximité d'une quantité de vêtements et provoqué ce dommage caractéristique.

Tissus déchiquetés et effilochés

19.5.18 Les tissus qui se trouvent à proximité d'une explosion présentent souvent un effilochage intense en chaîne et en trame. Cependant, deux autres phénomènes peuvent causer le même effilochage lorsque le tissu est suffisamment affaibli pour se déchirer. Par exemple, il est courant de voir de vieux drapeaux, constamment battus par de forts vents, qui présentent un tel effilochage à leur extrémité sous le vent.

19.5.19 On trouvait aussi couramment dans les avions anciens dont l'entoilage était constitué par des tissus renforcés d'une laque, qu'une déchirure en vol entraînait l'arrachement de la laque et que le tissu était fortement effiloché alors que dans le cas d'une déchirure à l'impact, cette déchirure est nette et dépourvue de tout effilochage. Il est clair qu'à bord des avions modernes, un tissu trouvé dans cet état après un écrasement au sol pourrait indiquer que la turbulence de l'air à la suite des dommages subis par la cellule en vol pourrait être la cause du dommage observé. La cause de la rupture initiale de la cellule importe peu dans ce cas. On ne peut certainement pas déduire qu'un tel dommage, du fait qu'il ressemble aux dommages causés par une explosion au sol, signifie nécessairement qu'une explosion à haute énergie s'est produite en vol.

19.5.20 L'indice le plus précieux fourni par les tissus endommagés ne peut souvent être décelé qu'à l'aide d'un microscope à faible puissance. C'est ce qui s'est produit dans le cas des débris de tissus prélevés sur l'épave DC8 CUT 1201 de la compagnie Cubana accidenté au large de la Barbade le 6 octobre 1976 (Higgs et divers, 1977). De nombreux fragments plus ou moins petits d'un tissu ressemblant à de la gaze étaient incrustés dans plusieurs valises, tissu qui a été identifié ultérieurement comme un tissu de nylon 6:6 spécial enduit d'un polymère polyisobutylène contenant de l'oxyde d'antimoine utilisé comme ignifuge. Il a également été découvert que l'enduit de polymère se dissolvait facilement dans le kérosène, ce qui explique pourquoi la couche verte caractéristique du polymère avait disparu des fragments de l'épave. Bien que la majeure partie de ce tissu de nylon ne présentait que des déchirures mécaniques aux extrémités des fibres, certaines de ces extrémités étaient cependant fondues et se présentaient sous une forme globulaire, représentée sur les Figures III-19-17 and III-19-18, d'une manière qui n'a pu être reproduite par le passage le plus rapide du tissu à travers la flamme d'un bec bunsen. Par exemple, ce chauffage produisait toujours plusieurs extrémités globulaires qui présentaient une évolution interne de gaz (formation de bulles due à la décomposition pendant la fusion) et/ou un noircissement qui donnait diverses teintes allant du jaune au brun. Au contraire, des expériences comportant la déflagration de petites charges d'un explosif brisant commercial ont révélé que sur une gamme optimale, les caractéristiques observées sur les tissus provenant de l'avion de la compagnie Cubana pouvaient être reproduites (Figure III-19-19) sur un échantillon de contrôle du tissu de nylon fourni par les propriétaires canadiens de cet avion.

Identification chimique des explosifs

19.5.21 Aucun indice d'explosif n'a été trouvé sur les fragments du Comet et du Convair ni, comme il a été dit plus haut, sur les rideaux du Viscount de la compagnie Aer Lingus. On estime qu'il aurait pu être possible de les déceler si l'on avait disposé à cette époque des méthodes de détection sensibles que l'on utilise actuellement. Dans les trois dernières enquêtes (Higgs 1974, Hayes 1976 et Higgs 1977), des essais chromatographiques en couche mince ont révélé la présence de traces d'explosifs qui, dans le cas du Boeing 707 de la compagnie TWA, étaient extrêmement faibles tandis que la présence de RDX et de nitroglycérine sur le Boeing 720B et de nitroglycérine sur le DC8 de la compagnie Cubana était suffisante pour être confirmée sans aucun doute possible par différentes méthodes.

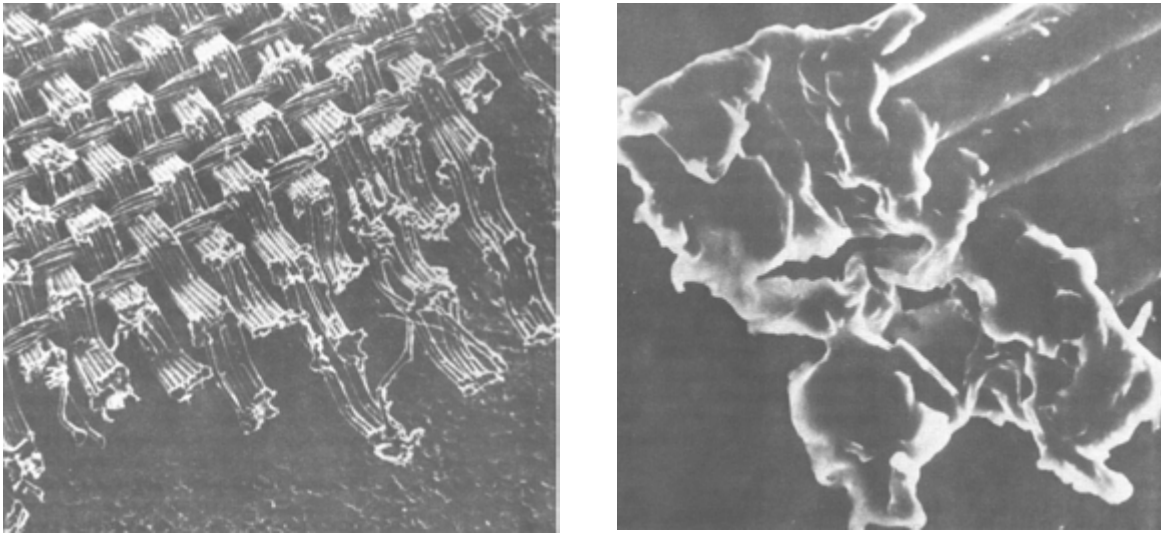


Figure III-19-17. Nylon 66 (à gauche) provenant du DC-8 montrant les extrémités fondues et vue agrandie (à droite)



Figure III-19-18. Globules à l'extrémité des fibres montrant l'absence de noircissement et de bulles de gaz

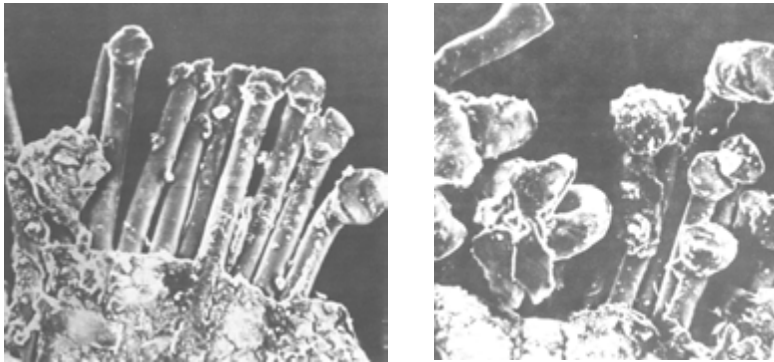


Figure III-19-19. Dommages causés par une explosion contrôlée à un échantillon de nylon 66 canadien (à gauche) et vue agrandie (à droite)

19.5.22 Le cas du DC8 offre d'intéressantes possibilités pour l'avenir du fait que malgré une immersion de 16 heures au moins dans l'eau de mer et d'un délai d'au moins deux à trois semaines avant que les diverses pièces aient pu être soumises aux essais, on a pu obtenir de fortes réactions caractéristiques de la nitroglycérine après avoir effectué des prélèvements par solvant sur les surfaces de plusieurs valises couvertes de matière plastique récupérées dans l'épave.

19.5.23 Toutes les pièces sentaient fortement le kérosène lorsqu'elles sont arrivées au laboratoire. Le kérosène est également fortement absorbé par certaines matières plastiques, notamment par le chlorure de polyvinyle qui constitue l'enveloppe extérieure de ces valises. Cette propriété laissait supposer que les dépôts initiaux d'explosif avaient pu être entraînés à l'intérieur de la matière plastique par l'action dissolvante du kérosène et préservés ainsi d'une dissolution dans l'eau de mer qui n'aurait pas manqué de se produire dans le cas de la nitroglycérine. Ce raisonnement a été confirmé lorsque des morceaux de chlorure de polyvinyle découpés dans la valise ont été traités à reflux d'un solvant. Malheureusement, le choix du solvant est très limité si l'on ne veut pas dissoudre également le polymère et les solvants qui conviennent le mieux pour dissoudre les résidus d'explosifs extraient également le kérosène et les plastifiants à base de phtalates. En conséquence, la méthode de dissolution sélective de l'explosif sous une forme qui se prête à l'analyse chromatographique était fastidieuse mais elle a montré qu'il y avait beaucoup plus d'explosif à l'intérieur même du polymère qu'à la surface.

Spectrophotométrie infrarouge

19.5.24 Il est rare qu'il y ait suffisamment de traces d'explosif sur les débris pour permettre une identification nette au spectrophotomètre infrarouge même si l'on utilise un échantillon sous forme de disque miniature et un condensateur microfaisceau. Tel était cependant le cas lors de l'enquête sur les débris du Boeing 720B OD-AFT de la compagnie Middle East Airline (Hayes et divers, 1976) qui s'est écrasé dans le désert d'Arabie Saoudite le 1^{er} janvier 1976.

19.5.25 L'une des deux valises, recouvertes d'un tartan rouge était abondamment saupoudrée d'une poudre blanche. Cette poudre a été éliminée en tant qu'indice lorsque l'analyse infrarouge a révélé que la substance était un détersif anionique alkylique sulfoné contenant comme additif un phosphate condensé et il a été confirmé que ce détersif figurait sur le manifeste de marchandises.

19.5.26 L'extraction par solvant de la surface de cette valise rouge a fourni suffisamment de matière pour donner un bon spectre en utilisant la technique normalisée du disque de bromure de potassium de 13 mm. La Figure III-19-20 montre le spectre ainsi obtenu comparé à celui d'un échantillon pur de l'explosif militaire RDX (cyclotriméthylène trinitramine également connu sous le nom de cyclonite et d'hexamine).

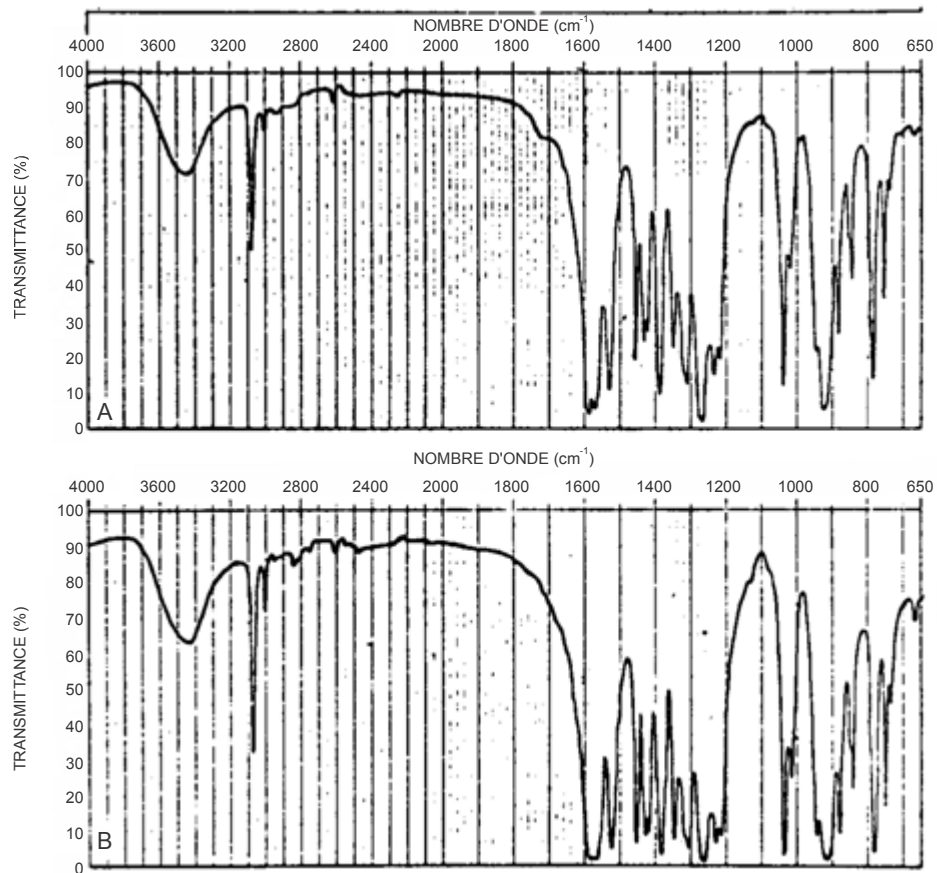


Figure III-19-20. Spectre d'absorption infrarouge du RDX provenant de la valise recouverte de tartan rouge

Méthodes de détection

19.5.27 La chromatographie en couche mince et la chromatographie en milieu gazeux/liquide sont utilisées, la dernière conjointement avec des détecteurs à capture d'électrons, pour maximiser la sensibilité de détection et réduire au minimum l'interférence provenant d'impuretés de capture non électroniques.

19.5.28 La chromatographie en couche mince avec extraction au toluène suivie d'une hydrolyse à la soude de 105° C et visualisation à l'aide d'un réactif de Griess modifié est considérée comme le meilleur moyen de séparation de toute une gamme d'explosifs ; cette méthode ne permet pas cependant de séparer la nitroglycérine du penthrite (tétranitrate et pentaérythrite). On sépare ces deux explosifs par extraction à l'aide d'un mélange d'acétate d'éthyle et d'éther de pétrole mais ce moyen d'extraction ne permet pas de séparer le RDX du HMX (cyclotétraméthylène tétranitramine). Un troisième agent d'extraction à base de chloroforme et de méthanol permet de séparer effectivement le RDX et le HMX mais non la nitroglycérine et le penthrite. Les niveaux de sensibilité pour la nitroglycérine, le RCS et le penthrite sont respectivement égaux à 2, 5 et 50 × 10⁻⁹ g par spot pour un dispositif optimisé pour la détection de la nitroglycérine. On peut obtenir des niveaux de détection plus bas pour les autres explosifs dans des conditions appropriées.

19.5.29 La chromatographie en milieu gazeux/liquide est employée surtout pour la nitroglycérine, les mono et dinitrobenzènes et les isomères correspondants du nitrotoluène plutôt que pour les explosifs militaires à longue durée de rétention. Le niveau de détection que l'on obtient pour la nitroglycérine est de 2 × 10⁻¹² g.

19.6 EFFETS DES FRONTS DE MACH

Introduction

19.6.1 Une détonation explosive à l'intérieur d'un fuselage, relativement près du revêtement, produit une onde de choc intense qui se propage vers l'extérieur depuis le centre de la détonation. Lorsqu'elle atteint la surface intérieure du revêtement du fuselage, l'énergie est partiellement absorbée par l'éclatement, la déformation et l'accélération des morceaux de revêtement et de lisse qui se trouvent sur son chemin. Une bonne partie de l'énergie restante est transmise, sous forme d'onde de choc, à travers le revêtement et dans l'atmosphère, mais une grande partie de cette énergie retourne sous forme d'onde de choc réfléchi, qui se propage de nouveau à l'intérieur du fuselage où elle rencontre l'onde de choc incidente avec laquelle elle interagit pour former des fronts de Mach ; ces fronts sont une recombinaison des ondes de choc qui peuvent avoir des pressions et des vitesses supérieures à l'onde de choc incidente.

19.6.2 Le phénomène des fronts de Mach est important pour deux raisons. Premièrement, il crée (pour des charges relativement petites) une limite géométrique sur la zone du matériau du revêtement que peut faire éclater l'onde de choc incidente. Cette limite géométrique se produit quelle que soit la charge (à l'intérieur des charges considérées comme réalistes pour le scénario du vol PA103) et fournit donc un moyen de calculer la distance d'écartement entre la charge explosive et le revêtement du fuselage.

19.6.3 Deuxièmement, le front de Mach peut être un facteur important dans la transmission de l'énergie explosive dans les cavités du fuselage, produisant des dommages à plusieurs endroits qui se trouvent loin de la source de l'explosion.

Formation des fronts de Mach

19.6.4 Un front de Mach est formé par l'interaction de l'onde de choc incidente et de l'onde de choc réfléchi, qui se fusionnent pour produire une nouvelle onde de choc unique. Si une charge explose dans un champ à une certaine distance d'une surface réfléchissante, l'onde de choc incidente se propage sphériquement jusqu'à ce que le front de l'onde touche la surface réfléchissante ; cet élément de la surface de l'onde est alors réfléchi (Figure III-19-21). L'angle local entre le front de l'onde sphérique et la surface réfléchissante est de zéro au point d'intersection entre la surface réfléchissante et l'axe normal, ce qui a pour résultat le renvoi de l'onde réfléchi directement vers la source et une surpression réfléchi maximale à la surface réfléchissante. L'angle entre le front d'onde et la surface réfléchissante aux autres endroits croît avec la distance par rapport à l'axe normal, produisant une augmentation correspondante de l'angle oblique de réflexion de l'élément d'onde et une diminution correspondante de la surpression réfléchi.

19.6.5 (D'une façon approximative, on peut considérer que les ondes de choc causées par une explosion suivent les mêmes trajectoires de réflexion et de réfraction que les ondes lumineuses. Voir *Geometric Shock Initiation of Pyrotechnics and Explosives*, R Weinheimer, McDonnell Douglas Aerospace Co.). Au-delà d'un angle critique (conique) autour de l'axe normal, généralement autour de 40°, les ondes réfléchies et les ondes incidentes se fusionnent pour former des fronts de Mach qui, de fait, coupent en deux l'angle entre les ondes incidentes et les ondes réfléchies et se propagent approximativement à angle droit par rapport à l'axe normal, c'est-à-dire parallèlement à la surface réfléchissante (Détail « A » dans la Figure III-19-21).

Estimation de la distance entre la charge et le revêtement du fuselage

19.6.6 Dans les limites de la charge probablement utilisée dans le vol PA103, les calculs indiquaient que la pression initiale du front de Mach près de la région de formation du front de Mach (c'est-à-dire la pression de l'avant de l'onde de choc exercée à angles droit par rapport au revêtement), serait probablement plus que le double de celle de l'onde de choc incidente, avec une vitesse de propagation supérieure de peut-être 25 %. Cependant, la pression extérieure au plan du front de Mach, c'est-à-dire la pression subie par la surface réfléchissante où elle est touchée par le

front de Mach, aurait été relativement faible et insuffisante pour faire éclater le revêtement. Par conséquent, pourvu que la charge ait une énergie suffisante pour produire l'éclatement du revêtement à l'intérieur de la région conique où ne se forme aucun front de Mach, les dimensions de la région éclatée seraient principalement fonction de la distance d'écartement et le poids de la charge aurait eu peu d'influence. Il était donc possible de calculer la distance d'écartement de la charge requise pour produire un éclatement du revêtement de certaines dimensions à partir de considérations géométriques seulement. Sur cette base, une distance d'écartement de la charge d'environ 25 à 27 po aurait eu pour résultat une zone éclatée de quelque 18 à 20 po de diamètre, largement comparable à la zone d'éclatement qui pouvait être observée dans la reconstitution tridimensionnelle de l'épave.

19.6.7 Même si la méthode analytique ne tient pas compte de l'effet de l'enveloppe IED ni de tout autre bagage ou contenant interposé entre la charge et le revêtement du fuselage, la présence de cette barrière aurait eu tendance à absorber l'énergie plutôt qu'à rediriger l'onde de choc transmise et aurait donc eu plus d'incidence sur la quantité de charge que sur son emplacement.

19.6.8 La similitude entre la distance d'écartement calculée à l'aide de cette méthode et celle de 25 po obtenue indépendamment à partir de la reconstitution du contenant et du fuselage est frappante.

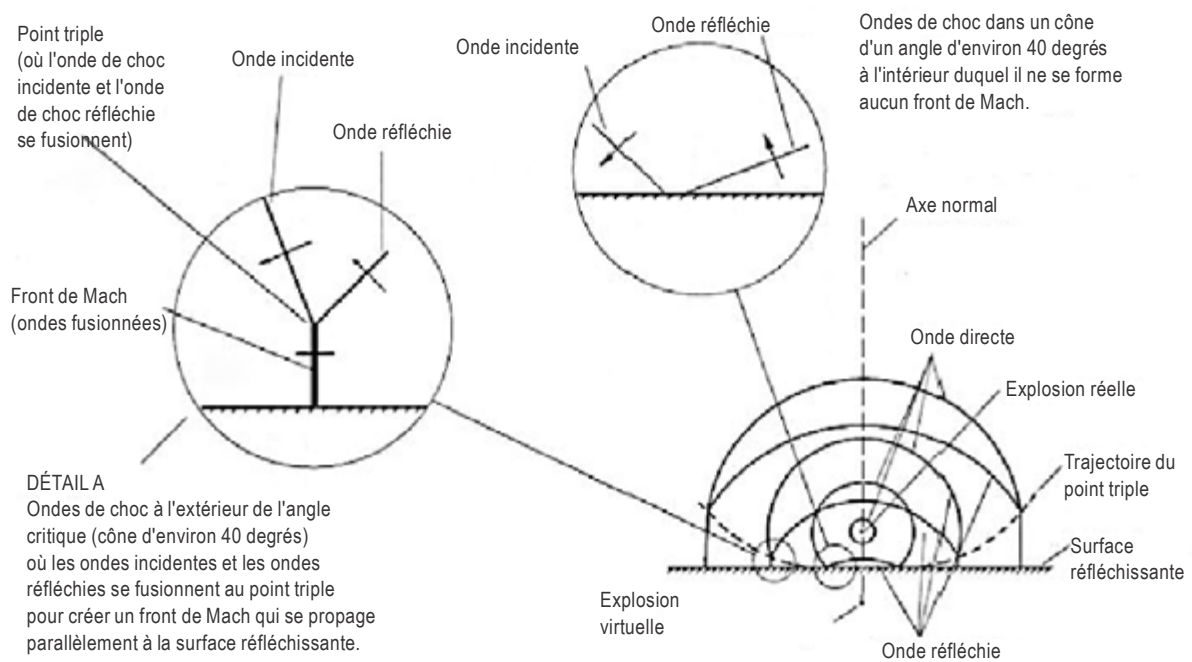


Figure III-19-21. Analyse du front de Mach

Chapitre 20

ENQUÊTE SUR LA CONCEPTION DES SYSTÈMES

20.1 OBJET ET PORTÉE

Le présent chapitre traite de la relation entre la conception des systèmes et la sécurité. Il explique brièvement certaines parties du processus d'assurance sécurité décrit dans la pratique ARP 4754 de la SAE et du processus d'analyse de la sécurité décrit dans la pratique ARP 4761 de la SAE. Il expose brièvement le rôle des essais dans le processus de vérification de la conception et indique comment l'enquêteur peut examiner le processus d'assurance sécurité pour évaluer la conception.

20.2 PROCESSUS D'ASSURANCE CONCEPTION

20.2.1 La complexité des systèmes de bord modernes est telle qu'il est absolument essentiel d'adopter une approche délibérée, systématique et bien documentée pour assurer des niveaux suffisants de sécurité. La communauté aéronautique internationale a largement adopté la Pratique aérospatiale recommandée ARP4754, *Certification Considerations for Highly Integrated or Complex Aircraft Systems*, de la SAE comme norme pour les nouvelles certifications. Ce processus a été élaboré à partir de processus semblables utilisés par les principaux avionneurs pour satisfaire aux exigences de certification. Les grandes étapes de ce processus sont les suivantes :

1. Identifier les fonctions de niveau aéronef, les besoins fonctionnels et les interfaces fonctionnelles.
2. Évaluer les conséquences et les implications des défaillances fonctionnelles.
3. Attribuer les fonctions aux systèmes
4. Concevoir l'architecture du système.
5. Concevoir/construire le matériel et le logiciel.
6. Intégrer le matériel et le logiciel.
7. Intégrer les systèmes.

20.2.2 Les activités de conception doivent être complètement intégrées au processus de certification, ce qui constitue un moyen global et systématique d'assurer la sécurité à l'étape de la conception.

20.3 PROCESSUS DE CERTIFICATION

20.3.1 Le processus de certification d'un aéronef a pour but de déterminer si l'aéronef et ses systèmes sont conformes aux spécifications de navigabilité applicables. Ce processus doit inclure un plan de certification qui décrit la méthode que le demandeur a l'intention d'employer pour démontrer la conformité. La conformité est démontrée par les données soumises comme preuve que les systèmes et l'aéronef satisfont aux exigences de navigabilité. L'ARP4754 de la SAE donne une bonne description de ce processus. L'élément clé de la certification est le processus d'évaluation de la sécurité.

20.3.2 Il convient de définir certains termes pour mieux comprendre le processus :

- a) *Système*. Ensemble de personnels, procédures, matériels, outils, équipements, installations, services et logiciels, à quelque niveau de complexité que ce soit. Les éléments de cette entité composite sont utilisés ensemble dans l'environnement opérationnel ou de soutien prévu pour exécuter une tâche donnée ou satisfaire aux exigences d'une production, d'un soutien ou d'une mission spécifiques.
- b) *Analyse de cause commune*. Terme générique englobant l'analyse de mode commun, l'analyse de risque spécifique et l'analyse de sécurité de zone. Ces trois types d'analyse se conjuguent pour identifier les modes de défaillance particuliers ou les événements extérieurs qui peuvent compromettre les interdépendances de la conception et se traduire par des conditions de défaillance catastrophiques ou dangereuses/graves-majeures. Ces types d'analyses et les procédures à utiliser pour les réaliser figurent dans l'ARP4761 de la SAE.
- c) *Condition de défaillance*. Condition ayant un effet, aussi bien direct qu'indirect, sur l'aéronef et ses occupants, qui a été causée par une ou plusieurs défaillances ou à laquelle ont contribué une ou plusieurs défaillances, compte tenu des conditions opérationnelles ou environnementales défavorables applicables. Les conditions de défaillance sont classées en fonction de la gravité des effets définie dans la circulaire AC 25.1309-1A de la FAA et le document JAA AMJ 25-1309.
- d) *Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA)*. La FMEA est une méthode ascendante systématique d'identification des modes de défaillance d'un système, d'un élément ou d'une fonction et de détermination des leurs effets sur le niveau supérieur suivant. La FMEA est normalement employée pour analyser les effets des défaillances uniques.
- e) *Analyse par arbre de défaillances (FTA)*. La FTA est une méthode descendante utilisée pour évaluer les défaillances uniques et les combinaisons de défaillances qui pourraient mener à une condition de défaillance spécifiée. La FTA peut être qualitative ou quantitative.
- f) *Analyse des risques fonctionnels (FHA)*. Examen systématique et exhaustif des fonctions pour identifier et classer les conditions de défaillance de ces fonctions selon leur gravité.
- g) *Danger*. Situation ou objet ayant le potentiel de causer des lésions au personnel, des dommages aux équipements ou aux structures, une perte de matériel ou une réduction de la capacité d'exécuter une fonction prescrite.
- h) *Risque de sécurité*. Conséquences ou résultats prévisibles ou prévus d'un danger existant ou d'une situation existante.

- i) *Accident*. Événement lié à l'utilisation d'un aéronef, qui, dans le cas d'un aéronef avec pilote, se produit entre le moment où une personne monte à bord avec l'intention d'effectuer un vol et le moment où toutes les personnes qui sont montées dans cette intention sont descendues, ou qui, dans le cas d'un aéronef sans pilote, se produit entre le moment où l'aéronef est prêt à manœuvrer en vue du vol et le moment où il s'immobilise à la fin du vol et où le système de propulsion principal est arrêté, et au cours duquel :
- 1) une personne est mortellement ou grièvement blessée du fait qu'elle se trouve:
 - dans l'aéronef, ou
 - en contact direct avec une partie quelconque de l'aéronef, y compris les parties qui s'en sont détachées, ou
 - directement exposée au souffle des réacteurs,

sauf s'il s'agit de lésions dues à des causes naturelles, de blessures infligées à la personne par elle-même ou par d'autres ou de blessures subies par un passager clandestin caché hors des zones auxquelles les passagers et l'équipage ont normalement accès ; ou
 - 2) l'aéronef subit des dommages ou une rupture structurelle :
 - qui altèrent ses caractéristiques de résistance structurelle, de performances ou de vol, et
 - qui normalement devraient nécessiter une réparation importante ou le remplacement de l'élément endommagé,

sauf s'il s'agit d'une panne de moteur ou d'avaries de moteur, lorsque les dommages sont limités à un seul moteur (y compris à ses capotages ou à ses accessoires), aux hélices, aux extrémités d'ailes, aux antennes, aux sondes, aux girouettes d'angle d'attaque, aux pneus, aux freins, aux roues, aux carénages, aux panneaux, aux trappes de train d'atterrissage, aux pare-brises, au revêtement de fuselage (comme de petites entailles ou perforations), ou de dommages mineurs aux pales de rotor principal, aux pales de rotor anticouple, au train d'atterrissage et ceux causés par de la grêle ou des impacts d'oiseaux (y compris les perforations du radome) ; ou
 - 3) l'aéronef a disparu ou est totalement inaccessible.
- j) *Défaut de conception*. Le système n'est pas conforme à la spécification ou norme de conception.
- k) *Défaut de fabrication*. Le système n'est pas conforme à la spécification ou norme de qualité.
- l) *Sécurité du système*. Application des principes, des critères et des techniques d'ingénierie et de gestion pour optimiser tous les aspects de la sécurité dans le cadre des contraintes d'efficacité opérationnelle, de temps et de coûts dans toutes les phases du cycle de vie du système.

20.4 PROCESSUS D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ

20.4.1 Les décisions prises durant le processus de conception d'un aéronef peuvent avoir des incidences importantes sur la cause d'un accident. Les prescriptions de navigabilité applicables à la certification des aéronefs commerciaux visent, pour la plupart, à assurer une sécurité adéquate des passagers ; elles spécifient la probabilité maximale requise pour que se produisent des événements fâcheux ayant des conséquences catastrophiques ou graves. La conception des aéronefs doit convenablement maîtriser ces événements. Le processus comprend une série d'analyses : évaluation des risques fonctionnels, évaluation préliminaire de la sécurité du système, évaluation de la

sécurité du système et analyse des causes communes. Chaque étape du cycle de développement est axée sur un domaine particulier et les analyses applicables à ce domaine appuient l'avant-projet.

20.4.2 Le Tableau III-20-1 montre qu'une analyse des risques fonctionnels (FHA) est effectuée durant la phase d'élaboration du concept. Elle examine les fonctions requises, évalue les risques inhérents à ces fonctions et leurs effets sur l'aéronef et classe les risques. Ce processus est répété au niveau des grands systèmes pour chaque système au cours de la phase de conception préliminaire. La FHA a pour objectif d'orienter les décisions de conception afin de réduire les risques à un niveau acceptable pour la certification, comme le définissent les directives applicables. Les FMEA et les FTA effectuées durant les phases de conception détaillée et de validation et vérification de la conception sont utilisées pour confirmer que la méthode de conception employée satisfait bien aux exigences de certification. Finalement, le processus d'analyse de causes communes met en relief les défaillances et les événements qui compromettent l'indépendance des systèmes et de la conception, ce qui peut se traduire par un risque inacceptable pour l'aéronef et ses occupants.

20.4.3 S'il est bien exécuté, ce processus établit la sécurité de l'aéronef et des systèmes et justifie les décisions de conception relatives à la sécurité. Ces analyses présentent donc un intérêt considérable pour l'enquêteur des accidents d'aviation, la raison première étant que les analyses sont effectuées avant que le système ne soit opérationnel, ce qui signifie que les concepteurs et les analystes doivent se fonder sur certaines hypothèses au sujet de l'environnement opérationnel.

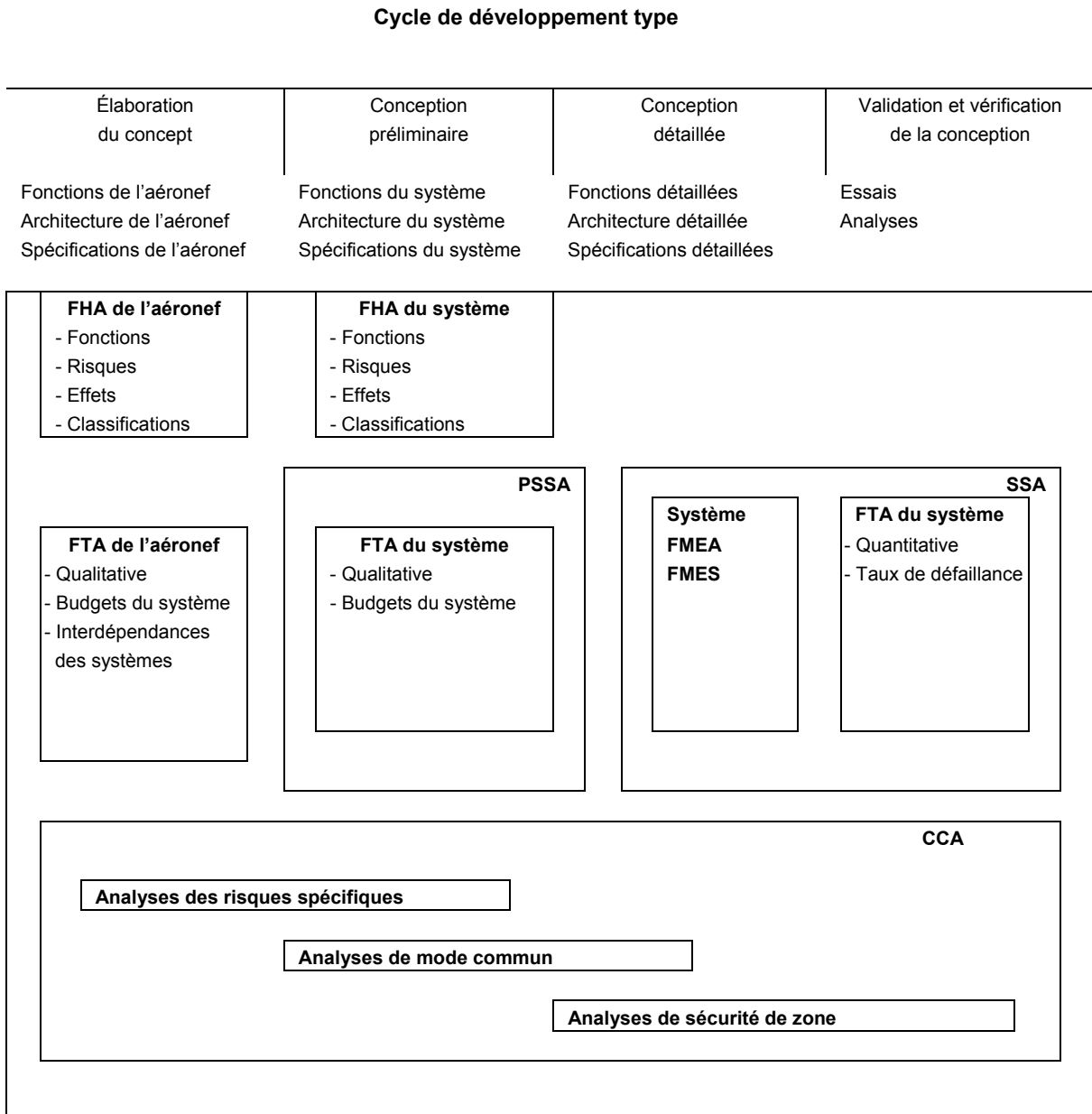
20.4.4 Ces hypothèses sont généralement exactes, mais il arrive que des conditions imprévues dans le contexte opérationnel réel compromettent la conception et mènent à un accident ou à un incident grave. Même si la conception respecte le critère de 1×10^{-9} pour les événements catastrophiques, cela ne signifie pas que l'événement ne peut pas se produire. Par exemple, la probabilité des séries de défaillances qui ont mené à l'écrasement du DC-10 du vol UA 232 à Sioux City (Nebraska), en 1989, calculée après l'accident était d'environ 1×10^{-15} . Six événements indépendants se sont combinés pour finalement causer la perte du système hydraulique et donc de toutes les commandes de vol.

20.4.5 Les modifications apportées aux systèmes de bord ou à l'environnement opérationnel de l'aéronef peuvent invalider l'exactitude des analyses précédentes. Les modifications opérationnelles sont un facteur courant en aviation militaire. Il arrive souvent que lorsque le système est mis en service, les exigences opérationnelles ont changé et l'aéronef doit être utilisé dans un nouveau contexte. Ces changements peuvent se produire même dans l'aviation civile. Un exemple récent est l'emploi d'anciens avions militaires comme avions-citernes pour lutter contre les incendies. Cette nouvelle application a imposé des contraintes imprévues aux avions et a eu pour résultat un nombre important de ruptures structurelles et d'accidents mortels.

20.4.6 En dernier lieu, les analyses sont fondées sur un système pleinement fonctionnel utilisé dans le cadre de la durée de vie théorique spécifiée. De nombreux aéronefs actuellement exploités ont dépassé de loin leur durée de vie théorique. Cette question est au cœur de tout le problème des aéronefs vieillissants. Elle concerne non seulement les éléments structurels mais aussi d'autres systèmes. Il existe des indices montrant que le vieillissement du câblage a pu contribuer à la perte d'un Boeing 747 du vol 800 de la TWA en 1996.

20.4.7 Comme il est indiqué plus haut, le processus d'évaluation de la sécurité a pour but d'évaluer les décisions de conception afin que l'aéronef réponde aux critères qui assurent un niveau satisfaisant de sécurité. En identifiant les risques inhérents à une conception et en limitant la probabilité d'accidents dus aux risques ou en réduisant la gravité des effets d'un accident, le concepteur peut satisfaire aux niveaux de sécurité spécifiés par la FAA et les Communautés européennes dans les FAR et les JAR. Chaque analyse a une fonction spécifique dans le processus.

Tableau III-20-1. Processus d'évaluation de la sécurité



20.4.8 La mesure de limitation des événements et des risques non désirés est un tableau de probabilités/risques qui calcule la probabilité maximale admissible d'un événement en fonction de l'effet estimé. Le Tableau III-20-2 montre le concept défini dans les FAR et les JAR.

Tableau III-20-2. Tableau des effets des probabilités/risques

Probabilité (quantitative)	1.0	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	
Probabilité (descriptive)	FAR	Probable		Improbable		Extrêmement improbable
	JAR	Forte	Raisonnement probable	Faible	Extrêmement faible	Extrêmement improbable
Gravité de la défaillance	FAR	Mineure		Majeure		Catastrophique
	JAR	Mineure		Majeure	Dangereuse	Catastrophique
Effets sur les occupants de l'aéronef	FAR	<ul style="list-style-type: none"> – Ne réduit pas de manière significative la sécurité de l'aéronef (légère diminution des marges de sécurité). – Actions de l'équipage largement à l'intérieur des capacités (légère augmentation de la charge de travail de l'équipage). – Quelques inconvénients pour les occupants 		<ul style="list-style-type: none"> – Réduction des capacités de l'aéronef ou de l'équipage dans des conditions d'exploitation défavorables – Réduction importante de la marge de sécurité – Augmentation importante de la charge de travail de l'équipage <p>Cas graves :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Importante réduction des marges de sécurité – Augmentation de la charge de travail ou de la détresse physique de l'équipage ; on ne peut plus compter sur sa capacité d'exécuter les tâches correctement. – Effets défavorables sur les occupants 		Conditions interdisant la poursuite du vol ou l'atterrissage en toute sécurité
	JAR	Perturbation	<ul style="list-style-type: none"> – Limites d'exploitation – Procédures d'urgence 	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction importante de la marge de sécurité – Les équipages peuvent difficilement faire face aux conditions défavorables – Blessures causées aux passagers 	<ul style="list-style-type: none"> – Importante réduction des marges de sécurité – Équipage dépassé par la charge de travail et les conditions environnementales – Quelques occupants subissent des blessures graves ou mortelles 	Plusieurs décès, généralement avec perte de l'aéronef

20.5 SÉCURITÉ DE LA CONCEPTION

Après avoir établi le niveau de probabilité du risque identifié, il faut prendre des mesures correctives si ce niveau ne respecte pas les critères de certification. Les mesures correctives et la méthode de conception sont fondées sur la méthode des priorités de sécurité. Cette méthode oriente les décisions de conception et comprend quatre priorités (1 à 4). Ces quatre priorités ne s'excluent pas mutuellement. En fait, la plupart des solutions utilisent une combinaison de deux priorités ou plus pour obtenir un niveau acceptable de sécurité. Les mesures recommandées sont décrites au Tableau III-20-3.

Tableau III-20-3. Ordre des priorités de sécurité applicables à la conception

Description	Priorité	Définition
Conception pour un risque minimal	1	Conception visant à éliminer les risques. Si le risque ne peut pas être éliminé, il faut effectuer des choix de conception pour le réduire jusqu'à un niveau acceptable.
Incorporation de dispositifs de sécurité	2	Si les risques identifiés ne peuvent pas être éliminés en faisant des choix de conception, il faut réduire le risque en utilisant des caractéristiques ou des dispositifs fixes, automatiques ou autres. Il faut prévoir des vérifications fonctionnelles périodiques des dispositifs de sécurité.
Utilisation de dispositifs d'avertissement	3	Lorsque ni la conception ni les dispositifs de sécurité ne peuvent éliminer le risque ou le réduire de manière satisfaisante, il faut utiliser des dispositifs pour détecter la situation et produire un avertissement approprié. Les signaux d'avertissement et leur application doivent être conçus pour réduire au minimum la probabilité d'une réaction ou d'une réponse humaine inappropriée. Il faut fournir des signaux d'avertissement et des affichettes pour indiquer au personnel d'exploitation et de soutien la présence de ces risques, par exemple, la présence de haute tension ou d'objets lourds.
Élaboration de procédures et de formation	4	Lorsqu'il est impossible d'éliminer les risques par une sélection de conception, un dispositif spécifique ou des dispositifs d'avertissement, il faut avoir recours aux procédures et à la formation. Il faut cependant avoir l'approbation de l'autorité lorsque des procédures et la formation sont utilisées pour réduire des risques catastrophiques, majeurs ou critiques.

20.6 FIABILITÉ ET SÉCURITÉ DES SYSTÈMES

20.6.1 Il existe une différence fondamentale entre la façon dont les ingénieurs en fiabilité et les ingénieurs en sécurité voient les défaillances. La fiabilité s'applique au matériel, comme le montre la définition selon laquelle la fiabilité (d'un élément non réparé) est la probabilité que cet élément exécute la fonction requise sans défaillance dans les conditions et durant la période de temps établies¹. La sécurité, par contre, est axée sur les événements qui risquent d'avoir des effets catastrophiques sur l'ensemble du système et, plus spécialement, sur les personnes. La défaillance d'un composant ou d'un élément n'est importante qu'en ce qui concerne son incidence sur le potentiel accidentogène de l'ensemble du système. On peut citer comme exemple l'incident de l'Airbus 330 du vol 236 d'Air Transat en 2001, où la défaillance d'un élément du système carburant a eu pour résultat une défaillance des deux moteurs de l'aéronef ETOPS et un vol plané de 65 NM au-dessus de la mer jusqu'à l'atterrissage. Cet incident peut être évalué en comparant le processus de la FMEA (un outil de fiabilité) et l'analyse de risque de sous-système (SSHA) (un outil de sécurité des systèmes).

20.6.2 La FMEA est une analyse ascendante qui évalue la défaillance de chaque partie d'un composant, d'un élément, d'un sous-système ou d'un système dans chaque mode de défaillance et condition opérationnelle possibles. C'est une analyse orientée matériel axée sur les défaillances uniques. L'erreur humaine est prise en compte mais elle doit quand même constituer une défaillance unique puisque l'analyse ne se prête pas à la combinaison de défaillances. Le vrai problème de la FMEA cependant est qu'elle doit examiner TOUTES les défaillances d'un système. Par conséquent, des défaillances importantes peuvent se perdre dans la masse de données disponibles. En outre, la FMEA

1. O'Connor, Patrick D.T., *Practical Reliability Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1985, page 5.

examine l'intérieur du système mais ne traite pas les événements externes très efficacement. La SSHA, par contre, est axée sur les exigences de sécurité plutôt que sur les normes de fiabilité. Même si une bonne partie du processus de la SSHA est le même que celui de la FMEA, son objectif est très différent et l'importance des défaillances est établie en fonction de leur incidence sur la sécurité. En général, les SSHA sont principalement utilisées dans les programmes militaires. Les programmes civils, notamment les programmes d'aviation civile, utilisent un processus semblable à celui qui est indiqué au Tableau III-20-1.

20.7 SÉCURITÉ DES SYSTÈMES ET L'ENQUÊTEUR SUR LES ACCIDENTS D'AVIATION

20.7.1 Il n'y a eu par le passé que peu ou pas de liens entre l'enquêteur sur les accidents d'aviation et l'analyste de la sécurité des systèmes, et c'est malheureux. Il est vrai que les enquêteurs trouvent souvent des problèmes de conception ou de systèmes qui sont liés aux causes des accidents et de nombreuses recommandations de sécurité portent sur l'amélioration de la conception. Il est rare cependant que l'enquête examine comment les défaillances qui ont mené à l'accident ont été traitées dans les analyses effectuées durant la conception de l'aéronef. Dans un processus d'évaluation de la sécurité bien exécuté durant la conception d'un aéronef, tous les risques plausibles sont identifiés et classés. Même si le système fonctionne en théorie, les résultats obtenus dans la pratique sont loin de l'idéal. Comme il est indiqué plus haut, il arrive parfois que, pour une raison ou pour une autre, les hypothèses posées par les ingénieurs et les analystes durant la phase de conception ne traduisent pas les réalités opérationnelles. À cela s'ajoute le fait que toute conception est un compromis, un équilibre entre la vitesse nécessaire, la capacité d'emport, le rayon d'action et le confort et la sécurité des passagers. Parfois ces compromis ne sont pas optimaux. L'accident du MD-11 du vol 111 de Swissair au large des côtes de la Nouvelle-Écosse en 1998 en est un exemple. Il semble, d'après les indices, que le système de divertissement de bord a contribué, du moins en partie, à l'incendie qui s'est déclaré à bord. Les décisions de conception sont parfois le résultat d'un manque de technologie. Il existe plusieurs exemples de ces problèmes dans les débuts de l'aviation moderne. Un nouveau problème a fait surface récemment : avec l'introduction de l'avionique évoluée et de systèmes de commandes de vol électriques assistés par ordinateur, l'analyse de sécurité a été incapable de suivre la technologie. Un système logiciel ne peut pas être évalué comme un système matériel classique.

20.7.2 Le principal objectif des enquêtes sur les accidents d'aviation est d'empêcher que des accidents semblables se reproduisent. Une des questions qu'il convient donc de se poser est pourquoi les défaillances qui ont mené à l'accident n'ont pas été convenablement maîtrisées à l'étape de la conception. Lorsqu'il est estimé que les problèmes de conception ont causé un accident, ou y ont contribué, l'enquêteur désigné doit s'assurer qu'un expert en conception des aéronefs participe à l'enquête.

20.7.3 Une partie du processus d'enquête doit être d'obtenir et d'évaluer les analyses soumises dans le cadre du processus de certification. L'enquêteur doit notamment rechercher les risques ou les défaillances qui ont contribué à l'accident. L'enquête doit inclure un examen de l'analyse et des mesures correctives recommandées. Il faut se demander pourquoi la mesure corrective choisie n'a pas empêché la défaillance. La réponse à cette question peut être un pas important vers la prévention des accidents. L'enquêteur doit essayer de déterminer si la mesure corrective recommandée incluait une formation ou des procédures et s'il a été donné suite à ces recommandations dans les manuels de procédures et les programmes de formation.

20.7.4 En résumé, l'enquêteur doit essayer de répondre aux questions suivantes :

a) Comment la sécurité a-t-elle été intégrée à la conception ?

- 1) Comment l'équipe de conception a-t-elle pris en compte les risques généralement reconnus et comment l'architecture de conception satisfait-elle aux critères des spécifications FAR/JAR ?

- b) Demander les analyses qui ont défini les risques et les mesures correctives qui ont été incorporées dans la conception.
 - 1) Les classifications des risques identifiés ont-elles été correctement évaluées ?
 - 2) La formation faisait-elle partie des mesures correctives ?
- c) Analyser la conception en fonction de l'accident qui fait l'objet de l'enquête.
 - 1) Quelles mesures correctives doivent être recommandées à la lumière de l'accident ?
- d) Identifier les spécifications et les critères de conception applicables. Ont-ils été suivis ?
- e) Le niveau de risque acceptable était-il approprié ?
- f) La mission ou l'utilisation ont-elles été modifiées sans une réévaluation de la sécurité ?

20.8 ENQUÊTE SUR LES SYSTÈMES

20.8.1 Examiner d'abord le fonctionnement du système au moment de la défaillance. Déterminer si le composant ou le système a excédé ses paramètres d'exploitation, c'est-à-dire durée de service, plage de mouvement, vitesse, régime nominal et capacité. Si la réponse est affirmative, on peut s'attendre à une défaillance du système ou de l'élément. Ce qu'il faut se demander cependant c'est si le résultat de cette défaillance avait été correctement identifié dans le processus d'évaluation de la sécurité. On peut citer comme exemple l'accident de l'Airbus 300 du vol 587 d'American Airlines en 2001 ; le vol dans le sillage de l'aéronef précédent conjugué à une sollicitation brutale des commandes par le pilote a eu pour effet de dépasser les limites d'intégrité structurelle de la cellule.

20.8.2 Par ailleurs, si l'élément ou le système n'a pas dépassé les paramètres normaux d'exploitation établis, il faut répondre à une série différente de questions. Dans ce cas, l'enquêteur doit déterminer si la conception convient à l'exploitation réelle. Il faut ici encore se reporter à la spécification de conception d'origine pour trouver les informations et les comparer aux conditions réelles d'exploitation. Il faut ensuite évaluer la maintenance du système. Les spécifications répondaient-elles aux exigences réelles de l'exploitation ? En dernier lieu, si une défaillance imprévue survient, l'enquêteur doit évaluer les intervalles d'inspection du système ou du composant. Durant la conception initiale, de nombreux intervalles d'inspection ont été déterminés sur la base de taux de défaillance calculés ou prévus ou de la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF). Ces estimations sont souvent très pessimistes. À mesure que les données opérationnelles deviennent disponibles, les intervalles peuvent être modifiés pour tenir compte des « données en temps réel » ; le résultat est normalement des intervalles d'inspection ou de remplacement plus longs. Cette modification est acceptable tant que la MTBF est constante. Cependant, à mesure que le système vieillit, la MTBF commence souvent à diminuer, ce qui signifie que l'intervalle d'inspection établi n'est plus approprié pour empêcher que les défaillances se produisent. L'enquêteur doit comparer les valeurs prévues avec les données de l'expérience réelle pour déterminer les mesures correctives à prendre.

20.9 ESSAIS, ÉVALUATION ET ENQUÊTE

20.9.1 Le programme d'essais a pour but de prouver les calculs théoriques concernant la conception, la fiabilité et la sécurité. Les types d'essais associés à la conception sont généralement :

- a) *Essais de l'avant-projet.* Ces essais servent à déterminer si la conception satisfait aux prescriptions de fiabilité et de sécurité et à mettre en évidence les points qui doivent être améliorés ;
- b) *Essais de démonstration et de qualification.* Ces essais servent à démontrer la conformité aux exigences de conception et à déterminer si une conception donnée doit être envisagée pour l'application prévue ;
- c) *Essais d'acceptation.* Essais pour déterminer si une pièce, un ensemble ou un élément final doit être accepté ou rejeté pour l'utilisation prévue ;
- d) *Essais opérationnels.* Essais conçus pour vérifier les analyses réalisées durant le projet et pour fournir des données sur les modifications des procédures et politiques opérationnelles qui ont une incidence sur la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité.

20.9.2 Le but de tous ces essais est de valider ou d'améliorer la conception, mais non de valider spécifiquement la sécurité. Même si des essais de sécurité peuvent être effectués, ils représentent des dépenses majeures dans n'importe quel programme et les tests spécialisés se limitent souvent à des risques spécifiques. Le principal avantage pour la sécurité de la plupart des essais est la validation des mesures de contrôle des risques de conception et, au besoin, l'identification de risques ou de réactions inattendus liés aux mesures de conception.

20.9.3 Un programme complet d'essais et d'évaluation produit plusieurs rapports et un grand nombre de données, notamment les rapports d'analyses des essais, les listes de risques identifiés et les listes des données de sécurité requises ; ces rapports et ces données peuvent être une source d'informations très utiles pour l'enquêteur d'accidents d'aviation. Un des points que l'enquêteur doit examiner est l'interaction entre les différentes analyses, la conception et le programme d'essais. Une des étapes clés du processus de conception consiste à vérifier si la conception respecte de fait les critères de sécurité, ce qui peut être fait au moyen d'une analyse, d'une inspection ou d'un test. Si l'enquêteur trouve des indices qui laissent penser que les critères de conception n'ont peut-être pas été respectés, il est essentiel que le programme d'essais soit évalué pour déterminer si tel est le cas et pourquoi.

20.9.4 Il ne peut y avoir aucun doute sur l'importance d'avoir un programme d'essais qui soit complet, planifié, documenté et vigoureusement exécuté. Il faut pour cela que la procédure d'essai soit bien pensée et bien exécutée. Plus le niveau de fiabilité ou, plus important encore, le niveau de sécurité requis est élevé, plus la qualité de la procédure d'essai est cruciale.

20.9.5 Les procédures d'essai sont conçues pour décrire et contrôler trois domaines d'essais distincts. Lorsqu'il évalue le programme d'essais, l'enquêteur doit surtout déterminer dans quelle mesure la procédure a atteint ses objectifs.

20.9.6 Le premier domaine est l'étalonnage de l'équipement. L'équipement doit être étalonné par rapport à des normes qui peuvent être reliées à des organismes de normalisation internationaux reconnus. L'enquêteur doit s'assurer que l'étalonnage a été fait aux fins d'essai. L'étalonnage doit inclure les éléments d'entrée et de mesure de l'équipement et les conditions environnementales doivent bien représenter l'environnement prévu.

20.9.7 Le deuxième domaine, qui est étroitement lié au premier, est la vérification de l'équipement d'essai. Il s'agit de démontrer formellement que la conception et la configuration de l'équipement d'essai pour un test déterminé donnent les résultats escomptés lorsque l'équipement est connecté au matériel d'essai. Cette vérification est également utilisée pour découvrir toute anomalie inattendue de l'équipement ou des conditions. Pour l'enquêteur, le dossier de ces vérifications est important, notamment lorsqu'il s'agit d'un nouvel équipement d'essai.

20.9.8 Le troisième domaine est la vérification du programme d'essais lui-même. Le programme doit non seulement décrire en détail tous les ajustements, raccordements et séquences de commutation nécessaires pour effectuer l'essai, mais il doit aussi comprendre des relevés détaillés où sont clairement consignées toutes les données pertinentes requises pour mener à bien le test.

20.9.9 Les essais présentent un autre avantage important pour le concepteur et l'enquêteur : la détection d'opérations ou d'indications non spécifiées ou indésirables. Le problème est que la plupart des spécifications sont rédigées pour décrire ce qu'un système doit faire mais non, sauf pour quelques événements critiques évidents, pour préciser ce qu'il ne doit pas faire. Cependant, si un plan d'essais est bien conçu, il doit documenter les opérations ou les indications inhabituelles ou non spécifiées, particulièrement celles qui sont défavorables. L'enquêteur devrait donc vérifier si le programme d'essais a mis au jour une indication quelconque correspondant aux caractéristiques ou aux effets opérationnels notés dans l'enchaînement des événements de l'accident. Si ces effets défavorables ont été découverts, il faut déterminer si des mesures de conception ont été prises pour contrôler ces effets.

20.10 RÉSUMÉ

Dans l'aviation moderne, les défaillances dues à la conception représentent une partie relativement petite de l'ensemble de l'enquête, notamment parce que la communauté aéronautique s'est efforcée au cours des années de tenir compte de la sécurité dans la conception. C'est un fait cependant qu'il se produit des erreurs, des omissions, de mauvaises utilisations et des défaillances ; lorsqu'une question de conception semble avoir contribué à l'accident, l'enquêteur doit examiner le processus de conception pour bien le comprendre et formuler des recommandations qui permettront de corriger ces carences. Un expert en conception des aéronefs devrait faire partie de l'équipe d'enquête lorsqu'il est estimé que des questions relatives à la conception ont causé un accident ou un incident grave ou y ont contribué.

