

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DFE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA

FACULTE DES SCIENCES ET DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D' INGENIEUR D'ETAT EN
AERONAUTIQUE

THEME

Maintenance basée sur la fiabilité

Application : GE CF6 – 80 A3

Suivi par :

Mr : NECHE AHMED
Mr : KEHLA SAMI

Réalisé par :

ESSED REDA (OPTION STRUCTURE)
BENAISSA NOUREDDINE (OPTION PROPULSION)

PROMOTION : 2002/2003

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, qui m'ont élevé, mes frères et sœurs, et les membres de ma famille, à tous mes enseignants, à tous les employés d'Air Algérie, et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la finalisation de ce projet.



ESSED Reda

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, à toute ma famille, et à tous mes amis.

BENAISSA Nour-eddine

Remerciements

Nous remercions dieu tout puissant, pour tout.

Nous remercions tous nos enseignants, qui nous ont appris beaucoup de choses tout au long de notre cursus scolaire.

Nous remercions les employés d'air Algérie qui nous ont apportés leurs soutiens particulièrement Chakib, Sami, Rafik, El-hadj et Aziz.

Nous remercions nos promoteurs Mr. KAHLA et Mr. NECHE

Nous remercions Mme.SEMMAR pour son soutien et l'intérêt qu'elle a montré tout au long de cette thèse.

Nous remercions tous nos amis et camarades de l'institut d'aéronautique ainsi que les membres de jury.

RESUME

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) fut initialement développée à la fin des années soixante pour l'industrie aéronautique civile et a eu pour résultat final la publication du document MSG-3, à la base des pratiques modernes de la MBF. La MBF est désormais une méthodologie démontrée et acceptée, utilisée dans de larges domaines de l'industrie.

Le programme de maintenance MBF est l'ensemble des tâches qui résultent d'une analyse MBF. Les programmes de maintenance sont généralement composés d'un programme initial et d'un programme évolutif, «dynamique».

Le programme de maintenance initial, qui est souvent le résultat d'une collaboration entre le fournisseur et l'utilisateur, est défini, préalablement à l'exploitation, sur la base d'une méthodologie MBF. Le programme de maintenance évolutif, qui est un développement du programme initial, est initialisé aussi tôt que possible par l'utilisateur dès le début de l'exploitation et il convient qu'il soit fondé sur les données réelles de dégradation, ou les données concernant les défaillances, ainsi que sur les progrès effectués sur la technologie des matériaux et les données relatives aux techniques et outils de maintenance.

Un programme initial de MBF peut être entrepris lorsque le produit est en service pour rénover et continuer à améliorer un programme de maintenance existant qui a été préparé sur la base de l'expérience ou de recommandations du fabricant, sans bénéficier d'une approche structurée telle que l'approche MBF.

ABSTRACT

Reliability Centred Maintenance (RCM) was initially developed for the commercial aviation industry in the late 1960s, ultimately resulting in the publication of the document, MSG-3, upon which the modern usage of RCM is based. It is now a proven and accepted methodology used in a wide range of industries.

The initial maintenance programme, which is often a collaborative effort between the supplier and the user, is defined prior to operation and is based on the RCM methodology.

The on-going maintenance programme, which is a development of the initial programme, is initiated as soon as possible by the user once operation begins, and would be based on actual degradation or failure data, and advances in technology, materials, maintenance techniques and tools.

An initial RCM programme may be initiated when the product is in service to renew and improve on an existing maintenance programme that has been prepared based on experience, or manufacturer's recommendations without the benefit of a standard approach, such as RCM.

ملخص

الصيانة المعتمدة على تقنيات العوال قد بدأ تطبيقها مع نهاية الستينيات في مجال صناعة الطائرات المدنية وقد نتج عن ذلك نشر المسند (ص م ع) الذي هو أصل تطبيق العوال. العوال الذي هو منهجية مبرهنة و مقبولة مستعملة في مختلف الميادين الصناعية.

برنامج الصيانة (ص م ع) هو جملة الوظائف الناتجة من التحليل (ص م ع). برامج الصيانة هي عادة متكونة من برنامج أصلي و برنامج قابل للتطوير "ديناميكي".

برنامج الصيانة الأصلي الذي هو عادة ناتج عن اشتراك بين الممون و المستخدم يحدد قبل طور الاستغلال على قاعدة العوال.

البرنامج الديناميكي الذي هو تطور للبرنامج الأصلي يهيأ في بداية طور الاستغلال من طرف المستخدم و هو مبني على معطيات التدهور الحقيقية أو المعطيات الخاصة بالنقص و التطورات في تقنيات المواد الصناعية و معطيات تقنيات و لوازم الصيانة.

البرنامج الأصلي (ص م ع) قد يتمكن الإقدام عليه في طور الاستعمال لتجديد و تحسين برنامج الصيانة المتوفر الذي هيا على أساس تجربة و وصيات الممون دون الاستفادة من وجهة مهيكلية كوجهة (ص م ع).

SOMMAIRE

LA MAINTNANCE BASEE SUR LA FIABILITE APPLICATION CF6-80 A3

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: Historique et développement de la maintenance basée sur la fiabilité	
I.1. Introduction	4
I.2. Evolution de la maintenance dans l'aviation civile et militaire	5
I.2.1. Les années 1930-1960	5
I.2.2. Les années 1960 - 1968 : Changements de concepts de maintenance	5
I.2.3. Des années 1968 à aujourd'hui	6
I.2.3.1. Politique de maintenance MSG-1	6
I.2.3.2. Politique de maintenance MSG-2	7
I.2.3.3. Politique de maintenance EMSG	8
I.2.3.4. Politique de maintenance RCM (MBF)	8
I.2.3.5. Politique de maintenance MSG-3	9
I.3. Importance des notions de défaillance pour les programmes de maintenance aéronautique MSG ou RCM	13
I.3.1. Introduction	13
I.3.2. La nature de la défaillance	13
I.3.3. La définition de défaillance	14
I.3.4. Défaillances fonctionnelles	14
I.3.5. Défaillances potentielles	15
I.3.6. La détection des défaillances	15
I.3.7. Rôle de l'équipage	16
I.3.8. Les fonctions cachées de certains éléments	16
I.3.9. Vérification des défaillances	17

Chapitre II : Concepts de fiabilité et de maintenance

II.1. Introduction	20
II.2. La maintenabilité et la maintenance	21
II.2.1. Les critères de maintenabilité	21
II.2.2. Définition de la maintenance	21
II.3. La fiabilité d'un système	23
II.3.1. Notion de fiabilité	29
II.3.2. Rôle de la fiabilité	29
II.3.3. Relation entre la maintenance et la fiabilité	29
II.4. Définitions et Classification des défaillances	29

Chapitre III : Théorie de fiabilité- Méthodes fréquentielles

III.1. Introduction	32
II.2. Les données de survie	32
III.2.1. Les temps de défaillances	32
III.2.2. Les données de censure (ou les temps de troncature)	32
III.3. Modèles de fiabilité	33
III.3.1. Loi exponentielle	33
III.3.2. Loi de Gauss (normale)	34
III.3.2. Etude du modèle de Weibull	35
III.4. Méthodes fréquentielles d'estimation des lois de fiabilité	37
III.4.1. Les méthodes non paramétriques	37
III.4.1.1. Méthodes des rangs médians et rangs moyens	37
III.4.1.2. L'estimateur de Kaplan-Meier ou «Product Limit »	38
III.4.2. Les méthodes paramétriques	39
III.4.2.1. Le maximum de vraisemblance	39
III.4.2.2. Application de la loi de Weibull à 2 paramètres	39
III.4.2.2.1. Algorithme de résolution des équations de vraisemblance	39
III.4.2.2.2. Estimation linéaire	40
III.4.2.3. Tests d'adéquation	40
III.4.2.3.1. Test du Khi-deux (χ^2)	41
III.4.2.3.2. Test de Kolmogorov –Smirnov	41

Chapitre IV : Méthodologie de la maintenance basée sur la fiabilité

IV.1. Introduction	42
IV.2. Méthodes utilisées dans la MBF	42
IV.2.1. Analyse fonctionnelle	42
IV.2.1.1. Présentation	42
IV.2.1.2. Méthodologie	42

IV.2.2. AMDEC	46
IV.2.2.1. Présentation	47
IV.2.2.2. Méthodologie	48
IV.2.2.3. Grilles de cotation	49
IV.3. Approche du programme de maintenance	50
IV.3.1 Généralités	50
IV.3. 2. Objectifs du programme de maintenance	50
IV.3.3. Méthode d'élaboration de programmes de maintenance préventive basé sur la MBF	52
IV.3. 4. Contenu du programme de maintenance	52
IV.4. Programme de maintenance préventive basé sur la MBF	53
IV.4.1. Généralités	53
IV.4.1.1. Recueil des informations	54
IV.4.1.2. Analyse du système	54
IV.4.1.2.1. Généralités	54
V.4.1.2.2. Identification des systèmes	54
IV.4.1.2.3. Identification des fonctions du système	55
IV.4.1.2.4. Sélection des systèmes	57
IV.4.1.2.5. Identification des défaillances fonctionnelles du système et classification de leur criticité	57
IV.4.1.3. Identification des éléments prépondérants de maintenance (EPM)	58
IV.4.2. Analyse des défaillances des éléments prépondérants de maintenance	58
IV.4.3. Détermination des tâches de maintenance (analyse par arbre logique de décision)	59
IV.4.3.1. Généralités	59
IV.4.3.2. Niveaux d'analyse	59
IV.4.3.3. Analyse de premier niveau (détermination des effets)	59
IV.4.3.4. Second niveau d'analyse (catégories d'effets)	60
IV.4.3.5. Détermination des tâches	65
IV.4.3.5.1. Généralités	65
IV.4.3.5.2. Cheminement en parallèle et logique des défauts	65
IV.4.3.5.3. Tâches de maintenance	65
III.4.3.6 Fréquences/périodicités des tâches	68

Chapitre V : Application

V.1. Introduction	70
V.2. Collecte de la documentation (Recueil des informations)	70
V.2.1. Les exigences applicables au réacteur	70
V.2.2. Les documents de conception et de maintenance	71
V.2.3. Les données du retour d'expérience	71
V.3. Analyse du système	71
V.3.1. Description générale du CF6-80-A3	71
V.3.2. Les caractéristiques du CF6-80 A3	72
V.3.3. Description matérielle du CF6-80 A3 (Découpage modulaires du moteur)	73
V.3.4. Description fonctionnelle du CF6-80	76
V.3.4.1. Fonctions du turbofan	76
V.3.4.2. Modélisation fonctionnelle par la méthode FAST	77
V.4. Analyse du retour d'expérience	78
V.4.1. Recherche des informations nécessaires de retour d'expérience	78
V.4.1.1. Données sur les événements concernant le moteur	78
V.4.1.2. Données de fiabilité (Fiabilité intrinsèque)	78
V.4.1.2. Estimation des caractéristiques statistiques	78
V.4.1.2.1. Les données de survie	78
V.4.1.2.2. Méthodes non paramétriques	86
V.4.1.2.2.1. La méthodes de « Johnson » ou des rangs médians	86
V.4.1.2.2. Estimateur de Kaplan-Meier	89
V.4.1.2.3. Méthodes paramétriques (modélisation par la loi de Weibull)	90
V.4.1.2.3.1. Le choix priori d'un modèle	90
V.4.1.2.3.2 Estimation des paramètres de la loi de Weibull	90
V.4. Analyse des défaillances des matériels critiques	96
V. 5. Sélection des taches de maintenance	97

CONCLUSION

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) fut initialement développée à la fin des années soixante pour l'industrie aéronautique civile et a eu pour résultat final la publication du document MSG-3, à la base des pratiques modernes de la MBF.

La MBF est désormais une méthodologie démontrée et acceptée, utilisée dans de larges domaines de l'industrie.

La méthodologie décrite dans cette thèse est largement basée sur les procédures essayées et vérifiées du document MSG-3, mais est également applicable à une grande variété d'équipements autres que les avions. Il convient de remarquer que cette méthodologie est une des procédures particulières pour mettre en œuvre un programme de MBF mais n'est pas la seule méthode utilisée. Cette thèse tente d'expliquer l'essentiel des principes et de présenter leur utilisation en appliquant la méthodologie MSG-3 pour le turbofan de GE CF6-80 A3 équipant l'A310.

La MBF est une méthode destinée à établir un programme de maintenance préventive qui permettra d'atteindre réellement et efficacement les niveaux requis de sécurité et de disponibilité des équipements et des structures afin d'aboutir à une amélioration globale de la sécurité, de la disponibilité, et des aspects économiques de l'exploitation. Elle prévoit l'utilisation d'un arbre de décision logique destiné à identifier les exigences applicables et efficaces, en matière de maintenance préventive, des équipements et des structures, en fonction des conséquences opérationnelles et économiques et des conséquences sur la sécurité liées à chaque défaillance identifiable et à chaque mécanisme de dégradation responsable de ces défaillances. Le résultat final obtenu grâce à l'emploi de la logique de décision constitue un jugement sur la nécessité d'effectuer une opération de maintenance.

Les étapes fondamentales, lorsque l'on entreprend une analyse MBF, sont les suivantes:

- la définition des limites du système et/ou du sous-système;
- la définition des fonctions de chaque système et/ou sous-système;
- l'identification des éléments prépondérants de maintenance (EPM);
- l'identification des causes pertinentes de défaillance fonctionnelle des EPM;
- la prédiction des effets et de la probabilité d'apparition de ces défaillances;
- l'utilisation d'un arbre de décision logique pour classer par catégorie les effets des défaillances des EPM;
- l'identification des opérations de maintenance applicables et efficaces qui comprennent le programme de maintenance initial;
- l'établissement d'un programme de maintenance dynamique, qui résulte d'une mise à jour régulière et systématique du programme de maintenance initial et de ses révisions, sur la base de la surveillance, du recueil et de l'analyse des données d'exploitation.

Toutes les tâches sont fondées sur des considérations relatives à la sécurité tant du personnel que de l'environnement et d'ordre opérationnel et/ou économique.

Toutefois, il convient de noter que les critères pris en considération dépendent de la nature du produit et de ses applications. L'importance des étapes successives dépend

en conséquence de l'application, comme cela est le cas par exemple pour l'identification des entités considérées comme éléments prépondérants de maintenance.

La réussite de l'application de la MBF nécessite la connaissance des équipements et des structures, de leurs systèmes et sous-systèmes, des entités constituant ces équipements et ces structures, ainsi que la compréhension de leurs défaillances et des conséquences de ces défaillances.

L'application de la MBF requiert des analyses détaillées du produit et de ses fonctions. Ces analyses peuvent être laborieuses et, en conséquence, proportionnellement onéreuses. Pour cette raison, la MBF est une technique qui est appliquée habituellement seulement lorsque la maintenance est critique pour la sécurité et l'exploitation efficace du produit, lorsque les défaillances pourraient avoir des conséquences sévères pour la sécurité, les aspects liés à l'environnement ou l'exploitation. L'utilisation de la MBF dépend, en conséquence, du type de produit et de ses applications mais peut être aussi utilisée par les organisations de toutes tailles impliquées dans une fabrication industrielle, en fonction des exigences du projet.

Le plan que nous suivons dans cette thèse repose sur cinq chapitres :

- le premier chapitre, c'est historique et développement de la MBF ;
- le second chapitre est consacré aux concepts de la fiabilité et de la maintenance ;
- le troisième chapitre propose la théorie de la fiabilité (L'approche fréquentielle) ;
- le quatrième chapitre présente la méthodologie MBF ;
- et dans le dernier chapitre on a essayé d'appliquer la méthodologie MBF pour le turbofan de GE CF6-80 A3.

CHAPITRE I

Historique et développement de la
maintenance basée sur la fiabilité

I.1. Introduction

Assimilé à des actions de dépannage ou d'entretien, le rôle de la maintenance est rarement considéré comme une activité stratégique au sein des entreprises. Cette situation, en cours d'évolution, peut en partie s'expliquer par le fait que cette discipline ne disposait pas de méthodologie d'approche de la fonction maintenance. Peu reconnue comme une discipline scientifique à part entière, elle n'a incité que très peu de chercheurs et d'ingénieurs à approfondir ces domaines. Mais sous les effets conjugués de la crise économique et de la concurrence internationale, baisse des coûts de production des biens et des services, la position de la fonction maintenance évolue dans un sens favorable. Ces réductions des coûts de possession d'un bien conduisent de plus en plus de responsables d'entreprises à revoir leur position sur le rôle de la maintenance et à la considérer comme un levier significatif pour gagner des points de productivité.

Des études sur l'évolution des dépenses de maintenance montrent qu'elles ont continué à baisser chez plusieurs industriels. Les raisons de cette baisse sont principalement liées à des phénomènes de rationalisation des coûts de maintenances.

Parmi les stratégies de maintenance, porteuses de facteurs de rationalisation de maintenance, figure la **Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)**, objet de cette thèse.

Apparu dans le monde aéronautique, où les coûts de maintenance représentent entre 15 et 20% (Figure I.1) des dépenses directes d'exploitation ; la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) est une politique de maintenance préventive n'appliquant des tâches de maintenances qu'aux matériels dont les modes de défaillance ont des conséquences importantes sur la sécurité, la disponibilité opérationnelle et des coûts.

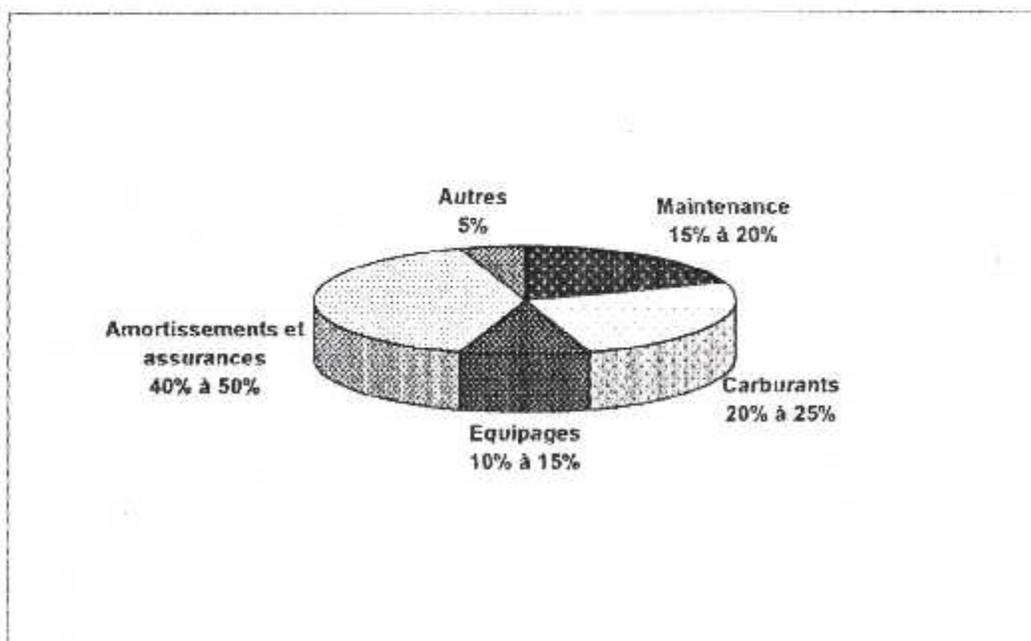


Figure I.1: Contribution de la maintenance dans les frais directs d'exploitation (Source Airbus Industry : pour l'A 340)

1.2. Evolution de la maintenance dans l'aviation civile et militaire

Pour comprendre la démarche de la maintenance basée sur la fiabilité qui assure aujourd'hui une très grande sécurité technique des flottes modernes, il est intéressant de suivre l'évolution de la maintenance aéronautique depuis les années 1930.

1.2.1. Les années 1930-1960

De 1930 à 1945, la maintenance aéronautique était caractérisée par les éléments suivants:

- révision totale des structures et des équipements toutes les 1 000 h à 2 000 h de vol ;
- la limite maximale d'utilisation des moteurs avant leur révision est comprise entre 300 et 600 heures de vol ;
- tous les équipements sont soumis à des démontages préventifs.

De 1945 à 1960, pas de modifications majeures de cette doctrine à l'exception des points suivants:

- révision totale ou partielle pour la structure ;
- la limite maximale d'utilisation des moteurs avant leur révision est comprise entre 900 et 1 800 heures de vol ;
- tous les équipements sont soumis à des démontages préventifs ;
- limites maximales (globales ou individuelles) pour les équipements importants.

La FAA pris conscience que certaines défaillances ne pouvaient être évitées, même si on met en oeuvre un usage intensif du hard time. Les études effectuées à la fin des années 1950 ont conduit à rejeter l'idée que tous les éléments d'un avion possèdent des intervalles de révision bien définis.

1.2.2. Les années 1960 - 1968 : Changements de concepts de maintenance

L'apparition des avions propulsés par des réacteurs dans l'aviation commerciale et l'impossibilité pour les compagnies aériennes de maîtriser la fiabilité de certains équipements par le changement de politique de maintenance ont conduit à la nécessité de réviser les concepts traditionnels de maintenance.

En 1960, une force de travail FAA /ATA s'est constituée et a conduit à la réalisation du « FAA Industry Reliability Program » publié en 1961.

Le programme de fiabilité des systèmes de propulsion définie par ce groupe de travail a établi les valeurs d'alarme pour le taux d'arrêt des moteurs. Si le niveau d'alarme est dépassée, les raisons doivent être déterminées et les actions correctives doivent être entreprises. On notera cependant qu'il n'en pas découlé d'exigence pour une modification obligatoire des limites pour la révision.

1964: Publication par la FAA d'une recommandation : contrôle de la maintenance par les méthodes de la fiabilité (Advisory Circular 120-17- Handbook for Maintenance Control by Reliability Methods - December 1964) qui fournit un guide pour obtenir une maîtrise de la périodicité de la maintenance préventive en utilisant des mesures de fiabilité. La diffusion de ce document a entraîné un usage intensif des programmes de fiabilité comme outil de gestion de la maintenance par les compagnies aériennes.

1966: Approbation par la FAA d'une procédure statistique (Scope - Systems and Components Operating Performance Evaluation) pour évaluer la nécessité d'un démontage périodique des composants d'un aéronef nouveau. C'est la première fois que l'on propose un programme initial de maintenance qui fournit un outil exploratoire pour déterminer la nécessité de démontages programmés de composants.

1.2.3. Des années 1968 à aujourd'hui

Cette période s'est caractérisée par des politiques de maintenance des avions militaires et civils reposant sur les données de fiabilité. Ainsi ont vu le jour successivement les méthodes : MSG-1, MSG-2, EMSG, RCM, MSG - 3.

1.2.3.1. Politique de maintenance MSG-1

1968: Premières applications opérationnelles de la logique de décision pour la définition du programme initial de maintenance préventive du B-747, appelé MSG-1. Le manuel MSG-1 (Maintenance Evaluation and Program Development) a été développé par un groupe de travail appelé MSG (Maintenance Steering Group) créé entre les constructeurs et les compagnies aériennes.

Le document MSG-1 a été approuvé en juillet 1968 par la conférence " Boeing 747 Interline" et utilisé pour développer le programme initial de maintenance programmée du B-747.

La méthode MSG-1 a été développée pour être un document universel applicable à tous les types d'appareils. Elle contient cependant des détails de procédure qui ne suivent pas la logique de base de décision MSG-1 et qui sont spécifiques aux appareils B-747.

La méthode MSG-1 utilise la notion de défaillance définit pas:

" L'inaptitude (momentanée ou définitive) d'un élément à remplir la fonction qui lui évolue selon une plage de paramètres de fonctionnement déterminée".

Entre la méthode MSG-1 et les méthodes utilisées pour les avions des générations précédentes, il existe une sensible évolution en ce qui concerne la notion de temps limite et d'entretien selon état.

Temps limite: Les avions des anciennes générations avaient une aérodynamique et des systèmes propulsion de qualité médiocre. Dans ces conditions, toute redondance des systèmes, entraînant une charge supplémentaire, était à exclure. Une défaillance, quelle qu'elle fût, pouvait avoir des conséquences graves (conception dite safe life). Il s'agissait donc de maintenir constamment en bon état tous les éléments de l'appareil : pour cela, l'idée la plus évidente consiste à réviser l'élément (ou à le remplacer par un élément neuf à réviser). Avant l'instant présumé de sa défaillance, en adoptant une certaine marge de sécurité. En fonction de la loi d'usure (plus ou moins connue) de l'élément, on définit un temps limite, appelé aussi potentiel, qui peut soit être limite de vie, soit un intervalle maximal entre révision.

Entretien suivant état: Les méthodes des temps limites présentaient l'inconvénient majeur de rejeter ou de soumettre à révision des éléments qui auraient pu rester utilisables un certain temps (ex: nombre et longueur de criques pour la structure, températures d'un moteur, etc..) et leur évolution, associé à la progression des possibilités de détection ou de mesure de ces paramètres (bancs d'essais,

moyens non destructifs tels qu'endoscopie, courants de Foucault, ressuage, meilleure accessibilité des éléments, etc..) a permis d'en venir à un mode d'entretien plus évolué, dit « selon vérification de l'état » (ou selon l'état) : à intervalles fixes, l'élément fait l'objet d'une vérification des paramètres significatifs de son état; cette vérification ne nécessite pas forcément le démontage de l'élément. Si la vérification conclut au bon état de l'élément, c'est-à-dire si les paramètres significatifs restent à l'intérieur d'un domaine prédéterminé, l'utilisation de l'élément peut se poursuivre jusqu'à la prochaine inspection programmée. Dans le cas contraire, l'élément est remis en bon état ou réformé.

1969: Acceptation de la procédure MSG-1 pour le B-747 et de l'approche de maintenance Condition Monitoring pour les composants non directement liés à la sécurité.

La Condition Monitoring : C'est une procédure qui consiste à analyser toutes les données associées à toute population d'éléments en service pour déterminer a nécessité éventuelle d'allocations de ressources. Ce n'est pas une méthode de maintenance préventive. L'inspection de l'élément et de l'action corrective qui en découle n'est entreprise qu'après la constatation de la défaillance.

1.2.3.2. Politique de maintenance MSG-2

1970: Publication de la version MSG-2 (Airline/Manufacturer Maintenance Planning Document MSG-2, Mars 1970), développée par deux comités de la maintenance de l'industrie (groupe de fiabilité et de maintenabilité de l'ATA et groupe de travail conjoint DC-10 et L-1011), pour les programmes initiaux de maintenance préventive des appareils DC-10 et L-1011. Le document MSG-2 est placé en annexe du document FFA AC 121-22 (Maintenance Review Board).

Le document MSG-2 apporte des modifications mineures à l'arbre logique de décision de la MSG-1 et des améliorations aux programmes d'inspection des structures.

Les principales différences entre les méthodes MSG-1 et MSG-2 sont les suivantes:

- la MSG-2 ne mentionne pas les objectifs de la MSG-1 pour l'analyse de maintenabilité des nouveaux types d'avions ;
- tous les détails et procédures spécifiques à l'appareil B-747 ont été supprimés pour conduire à un document universel ;
- la MSG-2 reconnaît explicitement la maintenance conditionnelle comme base de la maintenance ;
- une analyse séparée est contenue dans la MSG-2 pour les moteurs.

1971: Début d'une série d'études initiées par la FAA pour tenter de quantifier les exigences réglementaires en matière de fiabilité des systèmes critiques pour la sûreté des aéronefs.

I.2.3.3. Politique de maintenance EMSG

Pour le programme européen de l'Airbus A300B, le document EMSG (European Maintenance System Guide), a été publié par le groupe de travail MSG et approuvé en 1972.

Les différences principales entre la MSG-2 et la EMSG résident dans les domaines suivants:

- l'EMSG combine dans les analyses des systèmes/composants avec les moteurs ;
- la question (la défaillance prévient-elle un déroutement ?) et la question (le temps nécessaire pour la correction d'une défaillance est-il supérieur à 0.5 h ?) de la MSG-2 sont remplacées par une seule question (l'influence de la défaillance affecte-t-elle considérablement les considérations économiques ?) ;
- La méthode d'analyse de la structure de la MSG-2 (basée sur les questions relatives au système) a été remplacée par une procédure de notation spécifique à chaque structure d'appareil ;
- une méthode d'analyse de zones a été rajoutée dans l'EMSG ;
- l'EMSG a été appliquée avec succès pour les programmes européens A300B, Concorde et VFW614 ;
- les discussions entre les organismes AEA et AECMA ont été supplantées par les concepts de la RCM (Reliability Centered Maintenance) et les développements qui ont conduit plus tard à la MSG-3.

I.2.3.4. Politique de maintenance RCM (MBF)

La méthode RCM (Reliability Centered Maintenance) résulte d'une étude réalisée par la compagnie United Airlines pour le compte du Département Américain de la Défense et a été publiée pour la première fois en décembre 1978. Elle a fait l'objet de modifications contenues dans le document (MIL-STD-2173 (AS)-Reliability centered Maintenance Requirements for Naval Support, Weapons Systems and Support Equipment, 21 janvier 1986).

Cette norme explique les concepts de base, les principes, les définitions et les conditions d'application d'une discipline logique destinée à :

- développer des programmes efficaces de maintenance programmée ;
- gérer les programmes pendant la durée de vie.

Le nom de RCM (MBF) a été choisi en raison des concepts retenus centrés sur le maintien de la fiabilité intrinsèque des équipements à un coût minimal.

La méthode MBF ne retient que les tâches de maintenance qui sont relatives au maintien du niveau de fiabilité intrinsèque définie à la conception et comporte plusieurs caractéristiques :

- la logique de sélection des tâches commence par les conséquences des défaillances qui seront déterminantes pour la sélection des tâches de maintenance ;

- les modes de défaillance d'un élément qui entraînent une défaillance fonctionnelle sont analysés seulement après avoir analysé leurs conséquences ou effets ;
- les tâches de maintenance sont ensuite sélectionnées en fonction des conséquences des défaillances et sont directement liées aux causes spécifiques de défaillance.

La méthode de maintenance MBF retient quatre tâches de base que les mécaniciens peuvent accomplir, qui sont les suivantes:

- les inspections programmées à intervalles réguliers pour découvrir les défaillances potentielles (On-Condition Tasks) ;
- les travaux programmés de remise en état à, ou avant, la durée de vie spécifiée (Rework task) ;
- la mise au rebut à, ou avant, la durée de vie spécifiée (Discard task) ;
- les inspections programmées pour découvrir les défaillances (Failure-finding task).

La logique de sélection des tâches programmées de maintenance de la MBF repose sur des critères d'applicabilité et d'efficacité qui dépendent tous deux des caractéristiques inhérentes de fiabilité:

- le critère d'applicabilité dépend du mode de défaillance objet de la tâche ;
- le critère d'efficacité dépend des conséquences de la défaillance.

La RCM utilise une logique par « défaut » qui permet de prendre des décisions dans le cas où les informations sur les défaillances sont incomplètes. L'objectif est de fournir une solution qui garantit des marges importantes vis-à-vis de la sécurité et de la fiabilité opérationnelle.

1.2.3.5. Politique de maintenance MSG-3

Suite à la dérégulation sur les vols domestiques et à la concurrence acharnée entre les compagnies aériennes, celles-ci se sont penchées sur la réduction de leurs activités de maintenance en affirmant qu'elles disposaient d'un retour d'expérience suffisant leur permettant d'éviter certaines tâches de maintenance sans altérer la fiabilité et la sécurité des vols tout en respectant les règlements de la FAA.

En 1979, il est devenu indispensable aux yeux des constructeurs et des compagnies aériennes de réviser les contenus des programmes de maintenance MSG en raison des considérations suivantes:

- points faibles relevés et révélés avec la MSG-2 et l'EMSG,
- retour d'expérience favorable de la RCM,
- nouvelles réglementations pour une conception tolérante aux dommages (FAR 2.5.571),
- durée de vie croissante des avions et publication des programmes complémentaires d'inspection des structures SSIP (Supplemental Structural Inspection Programs),
- nouvelles générations d'appareils (A310, B757, B767...).

En mai 1979, l'ATA a mis en place une force de travail pour analyser le retour d'expérience de la MSG-2 et la réviser quand des améliorations sont jugées nécessaires. Au total, quinze points spécifiques de la MSG-2 ont été identifiés pour analyse et amélioration. La force de travail a créé trois groupes de travail (pour les

systèmes, la motorisation et les structures) où l'ATA, les compagnies étrangères, les constructeurs américains et européens, la FAA, le UK CAA et l'US Navy étaient représentés. Après 23 réunions, sur une période de 18 mois, le document MSG-3 (Airline/Manufacturer Maintenance Program Planning Document) a été publié en 1980, présenté et accepté par l'ATA.

La MSG-3 fait appel à trois méthodes différentes:

1. Méthode d'analyse pour les systèmes et la motorisation : Elle est basée sur le diagramme logique de la RCM et comprend plusieurs améliorations et extensions.

2. Méthode d'analyse de la structure : Elle est dérivée des recommandations du document FAR 25.271 et laisse un certain degré de liberté aux constructeurs pour se conformer aux principes de la logique de l'analyse de la structure.

3. Méthode d'analyse de zone : Après la fin des travaux de la force de travail, les autorités réglementant le transports aériens présentèrent la MSG-3 comme un des moyens acceptables de conformité pour certaines exigences contenues dans FAR25/JAR25.1529 et son annexe H et comme une norme civile pour le développement des programme initiaux de maintenance de nouveaux appareils. Des méthodes de travail et de validation des documents régissent la mise au point d'un manuel d'entretien basé sur la méthode MSG-3 pour un avion nouveau.

Pour élaborer le manuel d'entretien, l'exploitant a besoin d'informations du constructeur qu'il adaptera à son type d'exploitation. La MSG-3 a été appliquée avec succès pour le développement des programmes de maintenance des avions Airbus, ATR, Boeing, Fokker et Saa.....

Des compléments aux documents du MRB (Maintenance Review Board) ont été apportés sur la base de la MSG-3. Les compagnies aériennes utilisent également la MSG-3 pour réévaluer et accroître l'efficacité des programmes de maintenance.

Le MRB comprend plusieurs instances de décisions et groupes de travail comme l'indique la figure (1.2).

Le MRB comprend:

- un comité directeur MSC (Maintenance Steering Committee), composé de représentants des constructeurs et des compagnies clientes, définit les méthodes de travail;
- des groupes de travail spécialisés (structure, propulsion, etc.) étudient les chapitres ATA de leur compétence selon la méthodologie qui leur est indiquée par le comité directeur et déterminent la nature et la périodicité des tâches d'entretien à effectuer ;
- les services officiels constituent une commission MRB chargée d'approuver le document. Pour cela, des représentants du MRB assistent aux réunions du MSC et des groupes de travail, en qualité d'observateurs « actifs ».

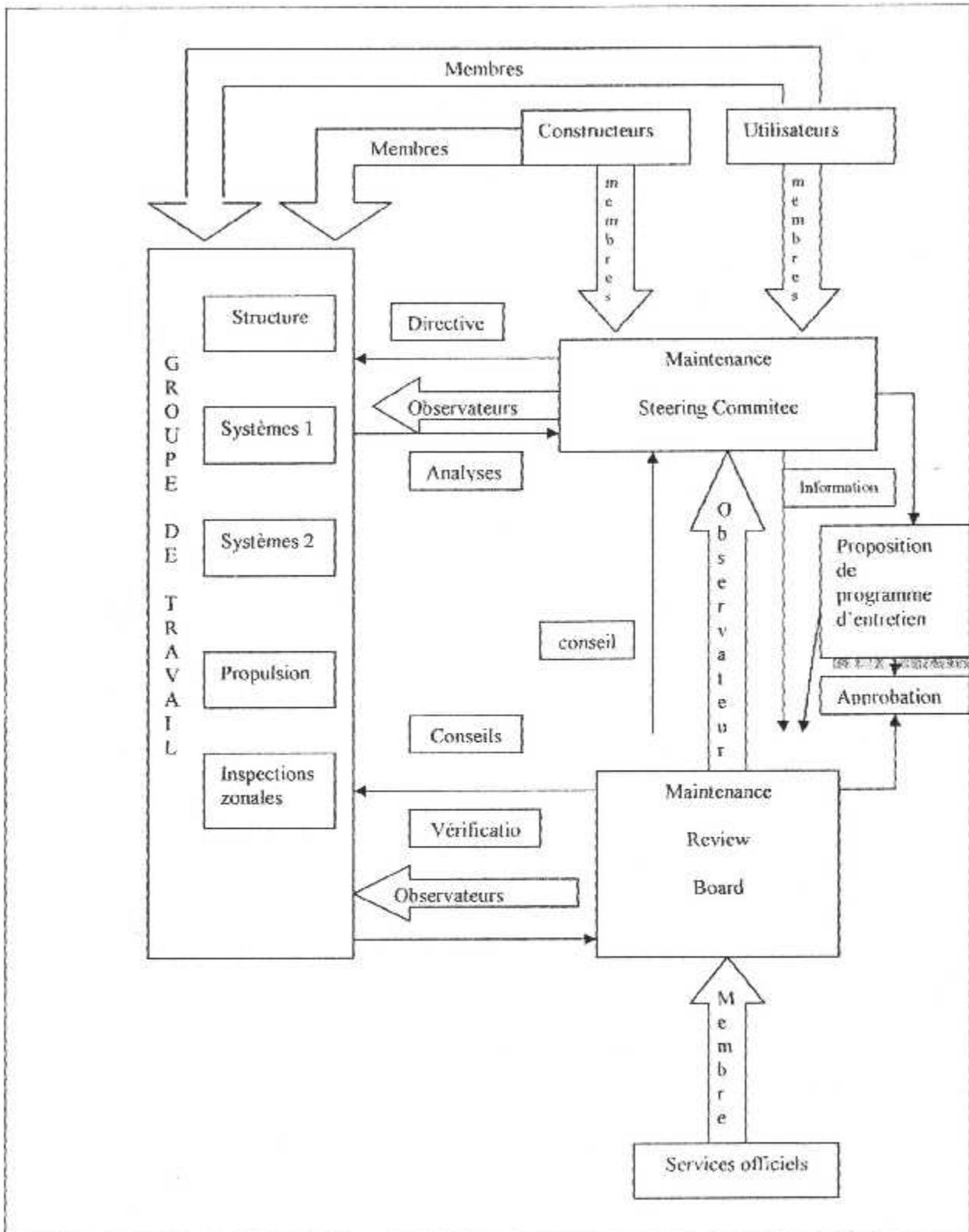


Figure I.2: Organisation du processus MRB

En septembre 1986, l'ATA organisa une réunion avec les compagnies américaines et européennes et les constructeurs pour évaluer les besoins pour le développement d'une méthode dérivée de la MSG-3. Cette réunion permit de Conclure qu'une refonte totale (version MSG-4) n'était pas nécessaire et que les constructeurs devaient s'engager à proposer une version révisée de la MSG-3.

On notera que la procédure MRB a été légèrement modifiée pour correspondre aux évolutions des technologies (commandes électriques, nouveaux matériaux et propulseurs). Ces modifications d'organisation sont représentées sur la figure (1.3).

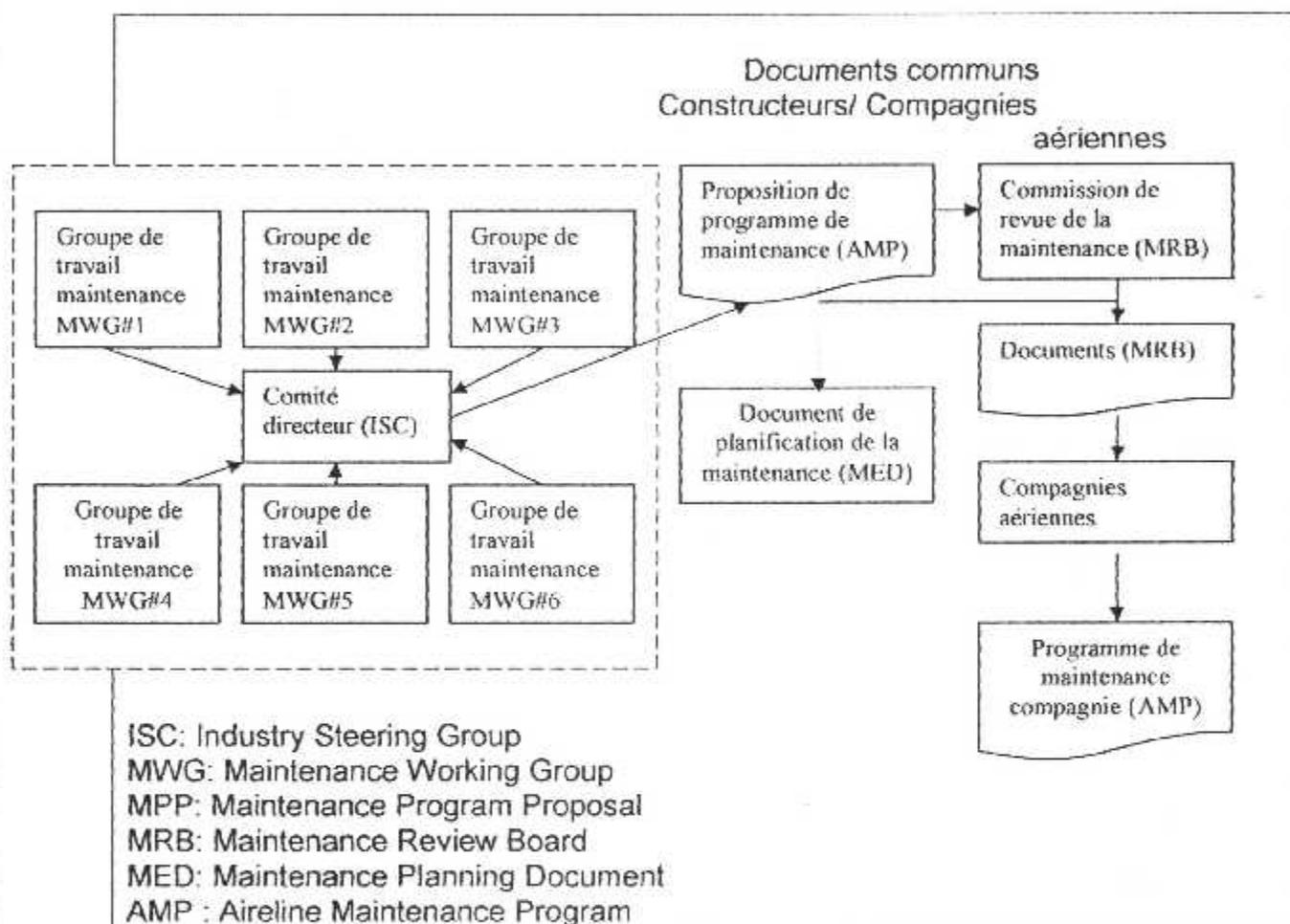


Figure I.3: Modification de l'organisation du processus MRB

L'accord final entre l'industrie aéronautique et la FAA a été finalement conclu après l'acceptation des modifications suivantes par l'industrie:

- demande pressante des autorités de certification pour la participation aux réunions MSG-3/MRB,
- réintroduction du chapitre supprimé sur le seuil d'échantillonnage des moteurs, -définition du terme « en exploitation » pour inclure toutes les circonstances, les passagers, les membres d'équipages sont à bord de l'appareil pour effectuer le vol,

- insistance pour inclure 100 % des éléments critiques pour les matériels et la structure (même si les tâches ne sont pas développées),
- décision de ne pas éliminer les termes « directe défavorable » dans la définition de la sécurité,
- un compromis a été atteint pour la redéfinition des effets des défaillances évidentes dans les catégories 6 et 7. Les causes de défaillances dans les modules FEC 6 sans tâche associée doivent être signalées à l'attention des ISC et du MRB.

Même après l'incorporation des modifications de la version 1, la MSG-3 reste très proche de sa version originale. Les vingt changements qui y ont été apportés ne modifient pas le concept initial de la MSG-3. Les premières applications de la MSG3, révision 1 ont été réalisées pour le développement des programmes initiaux de maintenance des Airbus A330/340 et du Canadair Regional Jet.

1.3. Importance des notions de défaillance pour les programmes de maintenance aéronautique MSG ou RCM

1.3.1. Introduction

L'historique du développement de la MSG-3 et de la RCM décrit au paragraphe (1.2) a fait ressortir l'importance accordée aux modes de défaillance et de leurs effets pour sélectionner des tâches de maintenance à la fois applicables et efficaces. Ce paragraphe reprendra leurs considérations sur l'importance prise par les défaillances et leurs conséquences pour mettre en œuvre une politique de maintenance basée sur la fiabilité.

1.3.2. La nature de la défaillance

Les éléments de n'importe quel équipement mécanique sont sujets à l'usure, à la corrosion et à la fatigue à l'origine des écarts par rapport aux conditions qui existaient quand l'équipement était neuf. Finalement, les écarts deviennent si importants que l'équipement ou un de ses éléments ne possèdent plus les performances requises, ce qui conduit à une défaillance. Avec pour résultat, que l'on a accordé insuffisamment d'importance au processus de défaillance lui-même, et encore moins d'attention à définir précisément une défaillance.

Une des raisons de ce manque d'attention a été le postulat commun selon lequel tout équipement s'use et devient inévitablement moins sûr avec le temps de fonctionnement. Ce postulat a conduit à la conclusion que le taux de défaillance total d'un élément atteint un niveau insuffisant à un âge limite, ce qui limite son utilisation jusqu'à l'âge où la probabilité d'une défaillance devient important, toutes les unités sont mises hors service quand elles ont atteint un âge prévu. Elles sont envoyées ensuite à la base de maintenance principale pour un complet démontage et une révision et sont traitées avec une procédure déterminée pour restaurer chaque élément dans ses conditions aux spécifications originelles, ce qui n'est pas très économique car la fiabilité n'est pas fonction du temps de fonctionnement.

Les mesures prises pour obtenir des indications précises et fiables sur l'imminence de la défaillance sont fréquemment et de loin une arme supérieure contre la défaillance. En outre, pour comprendre la nature spécifique de telles procédures quand elles appartiennent à un programme de RCM, il est nécessaire d'avoir une vue plus rapprochée du concept de défaillance. Donc nous définirons le terme défaillance et l'analyse de la défaillance, dans sa simplicité et sa complexité et le processus de défaillance.

1.3.3. La définition de défaillance

Nous sommes tous d'accord sur le fait qu'un système est déclaré défaillant s'il cesse de remplir des fonctions voulues. Mais il y a des moments où un élément continue à fonctionner, même si ce n'est pas au niveau escompté.

En outre, si aucune des conditions n'est corrigée, le temps nécessaire pour des réparations non-anticipées peut forcer à prendre d'autres alternatives, telles que le retard ou l'annulation d'un voyage. Pour couvrir toutes ces éventualités on peut définir une défaillance à peu près dans les termes suivants: une défaillance est une condition insatisfaisante. En d'autres termes, une défaillance représente une différence notable par rapport aux spécifications et qui n'est pas satisfaisante pour un utilisateur particulier. La détermination d'une condition non-satisfaisante dépend des conséquences de la défaillance dans un contexte opératoire donné.

En résumé, l'exacte frontière entre les conditions satisfaisantes et non-satisfaisantes ne dépendra pas seulement des fonctions de l'élément en question, mais aussi de la nature de l'équipement dans lequel il est installé et du contexte opératoire dans lequel cet équipement est utilisé. La détermination variera également d'une organisation à une autre. Dans une organisation donnée, toutefois, il est essentiel que les frontières entre les conditions satisfaisantes et non-satisfaisantes soient définies clairement et dans des termes sans équivoque pour chaque élément.

1.3.4. Défaillances fonctionnelles

Le jugement selon lequel une condition est non-satisfaisante signifie qu'il peut y avoir des conditions ou des spécifications de performance sur lesquelles ce jugement peut être fondé. Comme nous l'avons vu, une condition non satisfaisante peut aller de la complète incapacité d'un élément à remplir les fonctions voulues, à des signes physiques indiquant qu'il est sur le point d'être défaillant. Par conséquent, pour les objectifs de maintenance, nous devons classer les défaillances comme défaillances fonctionnelles ou comme défaillances potentielles.

Une défaillance fonctionnelle est l'incapacité d'un élément (ou d'un équipement le contenant) à satisfaire ses spécifications de performances. Une complète perte de fonction est clairement une défaillance fonctionnelle. Noter qu'une défaillance fonctionnelle inclut également l'incapacité d'un élément de fonctionner au niveau de performances qui avait été déterminé comme satisfaisant. Cette définition nous

donne ainsi une condition mesurable et identifiable, une base pour identifier les défaillances fonctionnelles.

1.3.5 Défaillances potentielles

Une fois qu'une défaillance fonctionnelle particulière a été définie, une condition physique qui indique que la défaillance est imminente peut souvent être identifiée. Dans ces circonstances, il devient possible de retirer l'élément en service avant le point de la défaillance potentielle.

Une défaillance potentielle est une condition physique identifiable qui indique qu'une défaillance fonctionnelle est imminente.

Le fait que les défaillances potentielles peuvent être identifiées est un aspect important de la théorie de maintenance moderne, car cela permet l'utilisation optimale de chaque élément sans subir les conséquences d'une défaillance fonctionnelle.

Les unités sont retirées ou réparées à leur stade de défaillance potentielle, de telle sorte que les défaillances potentielles ont souvent plus d'importance que les défaillances fonctionnelles.

Pour certains éléments, les paramètres mesurables indiquant l'imminence d'une défaillance sont directement liés aux critères de performance en rapport avec la défaillance fonctionnelle.

La capacité à identifier soit une défaillance fonctionnelle ou une défaillance potentielle dépend ainsi de trois facteurs:

- des définitions claires des fonctions d'un élément qui dépendent d'un équipement ou d'un contexte opératoire dans lequel l'élément est utilisé,
- une définition claire des conditions qui constituent dans chaque cas une défaillance fonctionnelle,
- une définition claire des conditions qui indiquent l'imminence de cette défaillance.

En d'autres termes, nous ne devons pas seulement définir la défaillance; nous devons aussi spécifier les indications avec lesquelles elle peut être identifiée.

1.3.6. La détection des défaillances

Les défaillances fonctionnelles et les défaillances potentielles peuvent toutes les deux être définies en terme de conditions identifiables pour un contexte opératoire donné. En évaluant la caractéristique de la défaillance, il est important de prendre en compte les différents points de référence de plusieurs catégories de personnels chargés de détecter les défaillances: l'équipage de l'avion, les mécaniciens au sol, les mécaniciens des ateliers et même les passagers. Comprendre comment et quand l'observateur remarque une défaillance et

comment il l'interprète comme crucial à la fois pour la fiabilité opérationnelle et une maintenance préventive efficace.

La détection et le compte rendu des défaillances dépendent de deux éléments principaux:

- l'observateur doit être en position de détecter la défaillance. Cette « bonne » position peut être une localisation physique, un moment particulier dans le temps, ou l'accès à un équipement d'inspection qui peut révéler cette condition,
- l'observateur doit avoir des critères qui lui permettront d'identifier si la défaillance qu'il a constatée est fonctionnelle ou potentielle.

1.3.7. Rôle de l'équipage

Les membres de l'équipage sont les seules personnes en position d'observer le fonctionnement des équipements dans leur environnement normal. Alors qu'un avion dans un atelier de maintenance est dans un environnement statique.

Dans la plupart des équipements complexes, la capacité de l'équipage à observer les défaillances est facilitée par une instrumentation abondante, des indicateurs d'alarme, ou d'autres appareils de contrôle. Cette instrumentation permet également à l'équipage de déterminer si les éléments qui sont encore en état de marche fonctionnent aussi bien qu'ils le devraient. Dans certains cas, une performance réduite est une indication d'une défaillance imminente, et ces conditions devront être examinées plus tard pour déterminer s'il s'agit d'une défaillance potentielle.

1.3.8. Les fonctions cachées de certains éléments

Bien que la plupart des défaillances fonctionnelles soient détectées par l'équipage, beaucoup d'éléments sont sujets à des défaillances que l'équipage n'est pas en mesure de détecter. Les tâches normales de l'équipage incluent souvent des tests spécifiques de certains éléments assurant des fonctions cachées, mais la plupart des défaillances doivent être détectées par des inspections ou des tests réalisés par le personnel de maintenance. Afin d'être sûr de savoir quand une défaillance est apparue, on doit savoir aussi si l'observateur est en mesure de la détecter. Puisque dans les objectifs de la maintenance basée sur la fiabilité, une distinction fondamentale est faite entre fonctions cachées et évidentes du point de vue de l'équipage, leurs définitions sont les suivantes:

- une fonction évidente est celle dont la défaillance sera évidente pour l'équipage, durant l'exécution des tâches normales,
- une fonction cachée est celle dont la défaillance ne sera pas évidente pour l'équipage durant l'exécution des tâches normales.

Un élément peut avoir différentes fonctions et ces dernières peuvent défaillir. Si la perte d'une de ces fonctions n'était pas évidente, l'élément devrait être classé d'un point de vue de maintenance comme un élément aux fonctions cachées. Les fonctions cachées peuvent être de deux sortes:

- une fonction qui est active normalement mais qui ne donne aucune indication à l'équipage si elle s'arrête,
- une fonction normalement inactive de sorte que l'équipage ne peut pas savoir si elle sera disponible si nécessaire (normalement à la suite d'autres défaillances).

1.3.9. Vérification des défaillances

Les équipages rendent compte de temps en temps des conditions non satisfaisantes qu'ils rencontrent mais qui restent cependant conformes aux critères de performance définis. C'est un principe de base de prévention. L'équipage ne peut pas toujours savoir si une différence particulière représente une défaillance potentielle, dans les intérêts de la sûreté, l'équipage doit rapporter tout ce qui est douteux. Sans la plupart des compagnies aériennes, l'équipage peut communiquer directement avec un groupe central de spécialistes de maintenance ou de personnels chargés des contrôles pour toute condition anormale observée durant le vol.

Une fois l'avion disponible pour une inspection de maintenance, l'équipe de maintenance est en meilleure situation pour diagnostiquer le problème et déterminer les conditions de défaillance qui sont remplies réellement. Ainsi, un élément peut être remplacé, réparé ou marqué « OK » pour la suite des opérations. Le fait que les observateurs de défaillance aient différents cadres de référence pour interpréter les différentes conséquences qu'ils voient, rend difficile l'évaluation des comptes-rendus des défaillances.

La situation est quelque peu différente lors de l'arrêt d'un moteur causé par des indications erronées des systèmes d'instrumentation. Bien que les passagers ne soient pas au courant de l'apparition d'une défaillance, l'équipage a noté une défaillance de l'appareil. Cependant, le mécanicien au sol peut découvrir que la défaillance était dans les instruments du cockpit et non sur le moteur. Il va ainsi placer l'instrument en cause et consigner une défaillance de l'instrument. Ainsi, les membres de l'équipage sont en position d'observer la défaillance, mais ils ne vont pas l'interpréter.

Dans d'autres circonstances, la situation aurait pu être renversée. Par exemple sur certains appareils, la perte des ailettes de turbine -une défaillance fonctionnelle - est précédée par le départ perceptible d'une ou de plusieurs ailettes de leurs supports. Si les ailettes se détachent en même temps, les membres (l'équipage et les passagers peuvent prendre brutalement conscience de la défaillance fonctionnelle, mais tant que l'appareil fonctionne normalement avec les ailettes perdues, ni l'équipage ni les passagers n'ont de raison de suspecter une défaillance potentielle.

Dans ce cas, les membres de l'équipage pourraient être capables d'interpréter la situation comme une défaillance potentielle, mais ils ne sont pas en mesure de l'observer.

Le mécanicien au sol qui inspecte le moteur dans le cadre de la maintenance programmée va vérifier s'il existe des ailettes possédant du jeu en faisant tourner doucement le montage de la turbine avec un détecteur (habituellement une tige de caoutchouc rigide ou un tube en plastique). S'il trouve une ailette avec du jeu, enregistrera la défaillance et enlèvera le moteur. Les mécaniciens dans l'atelier de réparation sont dans une situation plus favorable pour effectuer des observations détaillées, puisqu'ils doivent aller à l'intérieur de la carcasse du moteur pour atteindre les ailettes défaillantes. (à l'occasion, ils peuvent être les premiers observer des ailettes ayant du jeu dans un moteur démonté pour d'autres raisons). S'ils confirment le diagnostic des mécaniciens au sol, ils vont enregistrer la défaillance comme vérifiée.

Bien entendu, la situation n'est pas toujours aussi clairement tranchée. Souvent, il n'y a pas de méthodes de détection de pannes précises pour déterminer exactement quel composant ou quelle pièce est responsable du mauvais fonctionnement constaté. Dans ces circonstances, le mécanicien au sol retirera quelques éléments parmi lesquels se trouve celui ayant entraîné le problème. Cette pratique est parfois comparée à un dépannage « coup de poing ». Une grande partie de ces éléments suspects montreront des caractéristiques de performances normales après les tests réalisés dans la base de maintenance. Ainsi, bien qu'ils aient été classés comme défaillants au moment où ils sont retirés de l'équipement, ce sont des défaillances non-confirmées suivant les critères utilisés par les mécaniciens de la base de maintenance.

Les éléments retirés des équipements à la suite de défaillances potentielles ou de dysfonctionnements sont appelés retraits prématurés. Cette appellation est utilisée quand les éléments possèdent une durée de vie fixée. Un élément retiré quand il atteint cette limite est considéré comme ayant atteint sa durée de vie, tandis qu'un élément retiré du service à cause de sa défaillance avant la durée prévue est considéré comme un retrait prématuré.

CHAPITRE II

Concepts de fiabilité et de maintenance

II.1. Introduction

Les équipements aéronautiques sont de plus en plus complexes. Cette évolution n'aurait pas été possible sans une amélioration de la fiabilité de ces derniers. Les composants élémentaires interviennent dans des équipements dont la sûreté de fonctionnement est absolument nécessaire compte tenu des conséquences critiques qui peuvent en résulter dans certains secteurs d'application : aviation, espace, nucléaire...

Une bonne maintenabilité engendre une forte disponibilité pour les systèmes réparables. Toutes ces exigences doivent être prises en compte au cours du cycle de vie (Life Cost Cycle): conception, fabrication, exploitation. La prévision de la fiabilité et l'analyse des pannes encadrent la réalisation d'un produit.

Les problèmes de coût limitent l'amélioration de la fiabilité et de la maintenance et conduisent à la recherche de solutions optimales.

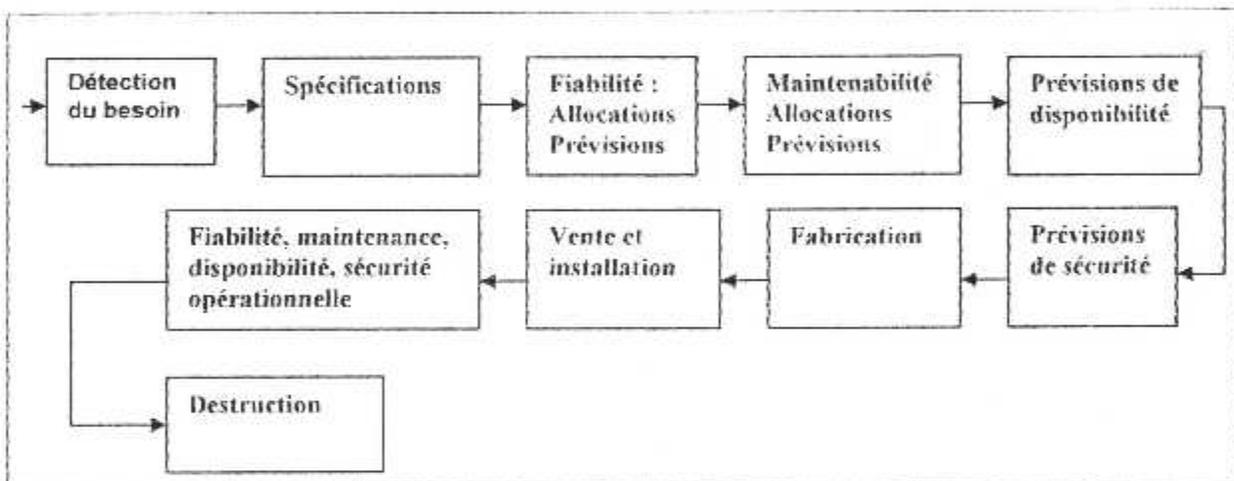


Figure II.1: Cycle de vie et F-M-D

Les définitions et les procédures relatives à ces domaines de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité (F-M-D) sont normalisées :

- En Europe par le CENELEC (Comité Européen de Normalisation de l'ELECTrotechnique),
- Aux Etats-Unis par les références militaires MILHDBK (MILitary HanDBOOK),
- Et mondialement par l'IEC (International Electrotechnics Committee) ou CE (Comité Electrotechnique).

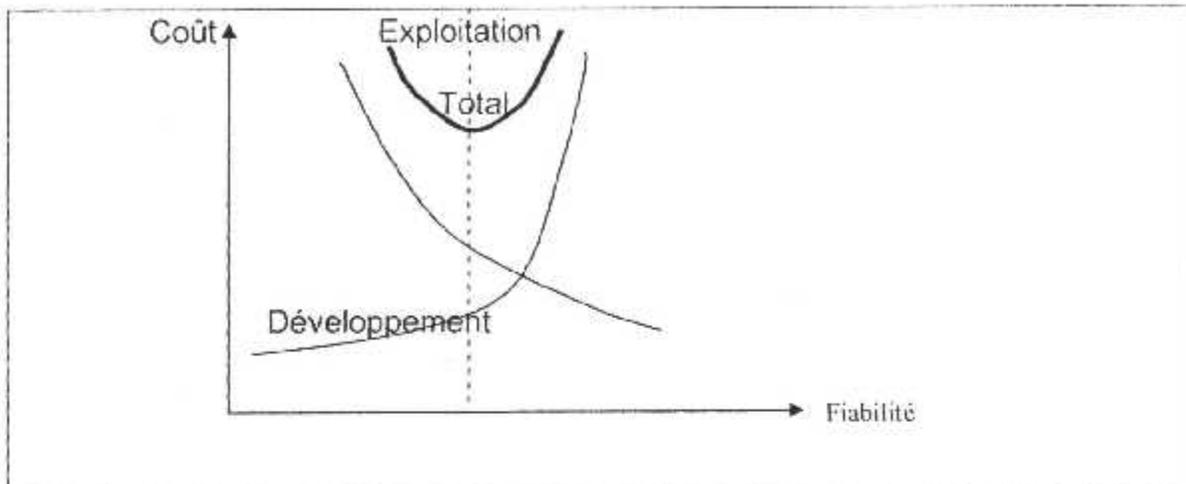


Figure II.2: Coûts

II.2. La maintenabilité et la maintenance

II.2.1. Les critères de maintenabilité

Les normes NFX 60-300 et X 60-301 spécifient cinq types de critères de maintenabilité :

- le premier critère est relatif à la surveillance de la maintenance préventive ;
- le deuxième est relatif à la maintenance corrective ;
- le troisième critère est relatif à l'organisation de la maintenance, périodicité du préventif, regroupement à des périodes identiques, homogénéité de la fiabilité des composants, la présence d'indicateurs et de compteurs et la complexité des interventions ;
- l'avant-dernier critère est lié à la qualité de la documentation technique ;
- le dernier critère de maintenabilité est lié au suivi du bien par le fabricant.

II.2.2. Définition de la maintenance

Les normes NF X 60-010 et 60 011 définissent la maintenance comme l'ensemble des actions permettant de maintenir un bien dans un état spécifié ou assurer un service déterminé.

La fonction maintenance est un ensemble d'activités formé de deux sous-ensembles :

- les activités à dominante technique ;
- et les activités à dominante gestion.

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés :

« **Maintenir et Rétablir** » :

- Le premier fait référence à une action préventive ;
- Le deuxième fait référence à l'aspect correctif (voir figure II.3).

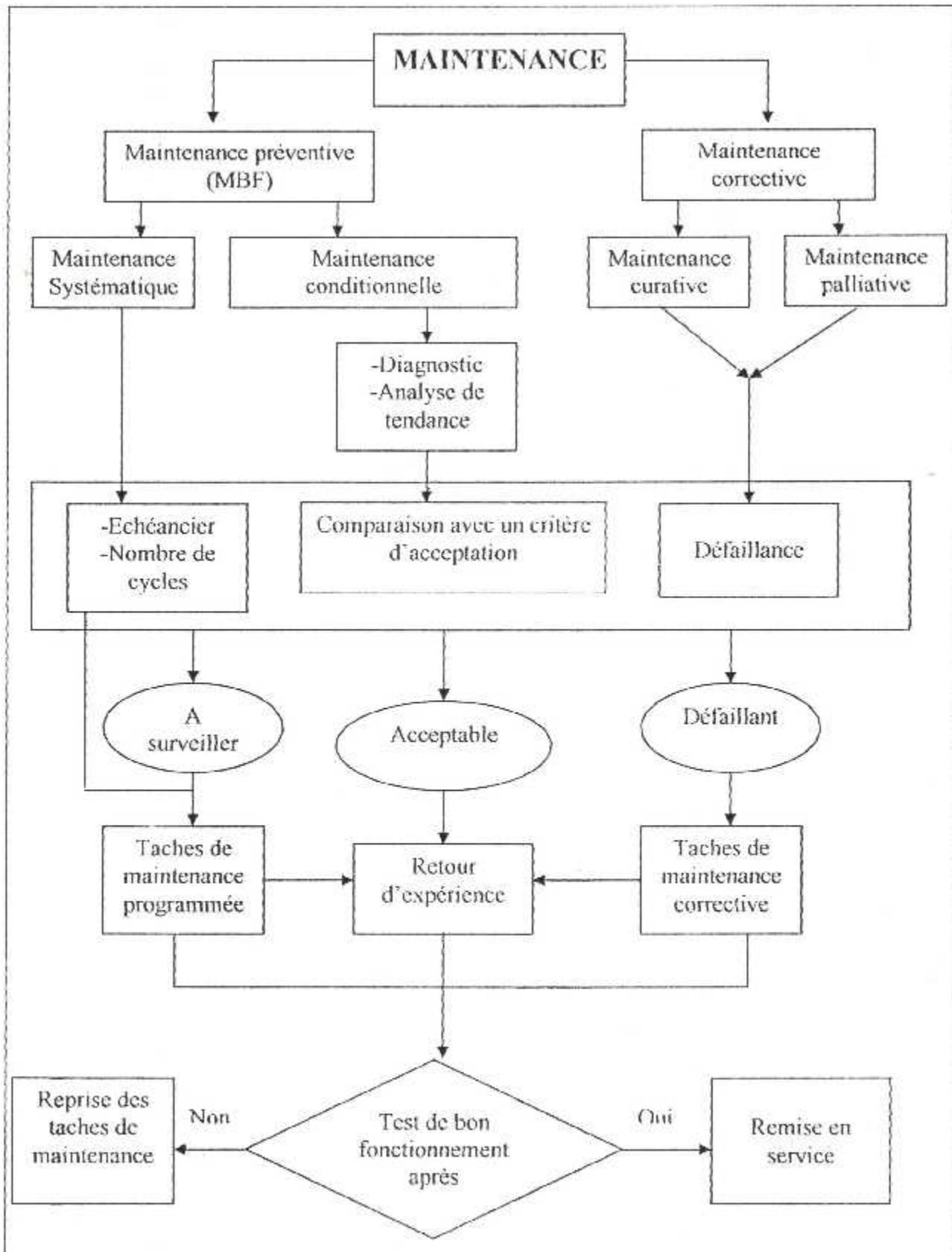


Figure II.3: Types de maintenance

La maintenance corrective est définie comme une maintenance effectuée après défaillance (AFNOR X 60-010). Elle est caractérisée par son caractère aléatoire et requiert des ressources humaines compétentes et des ressources matérielles (pièces de rechange et outillage) disponibles sur place. La maintenance corrective débouche sur deux types d'intervention :

- Le premier type est à caractère provisoire, ce qui caractérise la maintenance palliative ;
- Le deuxième type est à caractère définitif, ce qui caractérise la maintenance curative.

La maintenance préventive est définie quant à elle comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle) :

-La maintenance préventive systématique est une maintenance effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage (AFNOR). La périodicité des remplacements est déterminée selon deux méthodes : la première est de type bloc et la seconde, de type âge. La politique de remplacement de type âge suggère de remplacer l'équipement à la panne ou après T unités de temps de bon fonctionnement. La politique de type bloc suggère de remplacer l'équipement après une période prédéterminée de temps T, 2T, etc. indépendamment de l'âge et de l'état du composant.

-La maintenance préventive conditionnelle est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (AFNOR). Divers outils comme l'analyse de la vibration et l'analyse d'huile, permettent de détecter les signes d'usure ou de dégradation de l'équipement. Ceci s'effectue en mesurant, à chaque inspection, la valeur d'un paramètre de contrôle tel que l'amplitude de déplacement, de vitesse ou d'accélération des vibrations, le degré d'acidité, ou la teneur de particule solide dans l'huile. L'action ne se déclenche que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement, fixé par le constructeur ou par les normes de santé et de sécurité au travail.

La maintenance prédictive (ou prévisionnelle) est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

II.3. La fiabilité d'un système

II.3.1. Notion de fiabilité

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, conçus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné. Pour chaque système, il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer.

La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée (AFNOR). C'est donc une grandeur comprise entre 0 et 1. Nous la désignons, dans ce qui suit, par $R(t)$ où t désigne la durée de la mission (équation II.1).

$$R(t) = P \{ \text{durée de vie du système} > t \} \quad (\text{II.1})$$

Rappelons que la durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu. Selon le système étudié, elle s'exprime en terme de temps, de kilomètres, d'heures de fonctionnement ou autre.

On distingue plusieurs types de fiabilité (termes spécifiques) :

-La fiabilité opérationnelle (observée ou estimée) : déduites de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelles.

-La fiabilité prévisionnelle (prédite) : correspondant à la fiabilité future d'un système et établie par son analyse connaissant les fiabilités de ces composants.

-La fiabilité extrapolée déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes.

-La fiabilité intrinsèque est la fiabilité maximale que l'on peut attendre d'un matériel quand il fait l'objet d'une maintenance préventive efficace : c'est une valeur inhérente à sa conception.

Remarque:

L'obtention de niveaux supérieurs de fiabilité nécessite donc :

- soit des modifications ;
- soit de nouvelles conceptions.

Le fait que la défaillance d'un système puisse survenir à n'importe quel moment nous amène à considérer cette grandeur comme une variable aléatoire à laquelle nous pouvons associer une fonction de densité $f(t)$. Il importe de rappeler que $f(t) \cdot dt$ est la probabilité que la durée de vie d'un système soit comprise entre t et $t + dt$ (équation II.2), ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre t et $t + dt$ (figure II.1).

$$f(t) \cdot dt = P \{ t < \text{durée de vie du système} < t + dt \} \quad (\text{II.2})$$

Il va sans dire que :

$$\int_0^{+\infty} f(t) dt = 1 \quad (\text{II.3})$$

Il est souvent difficile de caractériser la défaillance d'un système. Nous convenons dans ce qui suit qu'un système est considéré défaillant ou hors d'usage s'il n'est pas en mesure de réaliser la fonction pour laquelle il a été conçu. Pour certains systèmes, nous parlons de défaillance lorsque les grandeurs caractéristiques évoluent en dehors de certaines limites de fonctionnement établies auparavant.

Cette seconde définition sera exploitée lorsque nous introduisons les concepts de maintenance conditionnelle. Nous désignons par $F(t)$, la fonction de répartition ou la fonction de distribution associée aux durées de vie. $F(t)$ peut s'interpréter comme la probabilité que la durée de vie du composant soit supérieure ou égale à t (équation II.4).

$$F(t) = P \{ \text{durée de vie du système} \geq t \} \quad (\text{II.4})$$

Nous supposons qu'en tout temps, le système est soit «en opération» ou «hors d'usage», il s'ensuit que :

$$\forall t > 0 \quad R(t) + F(t) = 1 \quad (\text{II.5})$$

De par la définition de la fonction densité $f(t)$ et en se basant sur les concepts de base de probabilité, nous avons :

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(x) dx \quad (\text{II.6})$$

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (\text{II.7})$$

de même :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Ou encore :

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{II.9})$$

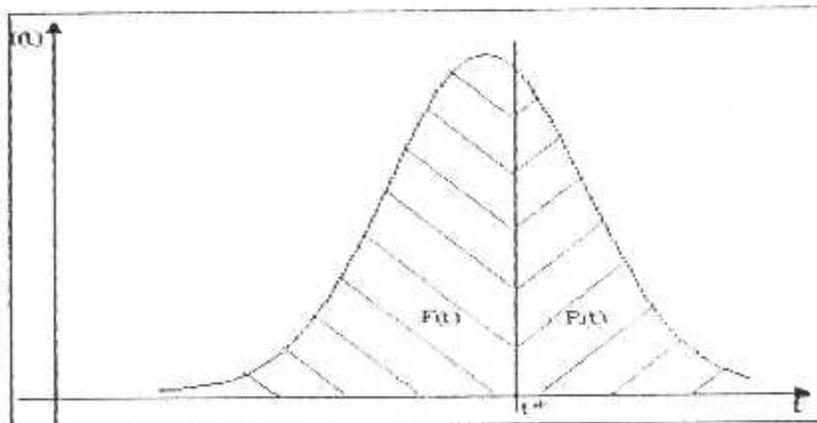


Figure II.5 : La fonction densité de durée de vie

La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Il est défini comme étant la probabilité conditionnelle que l'équipement tombe en panne entre l'instant t et $t + dt$ sachant qu'il a survécu jusqu'à l'instant t . Il

peut aussi être défini comme la proportion de composants ayant survécu jusqu'à l'instant t (équation II.10). Il représente également la vitesse d'arrivée de la panne.

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(t)\Delta t} \quad (\text{II.10})$$

Avec

$N(t)$: Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant t .

$N(t + \Delta t)$: Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant $t + \Delta t$.

Si nous représentons le taux de panne en fonction du temps, nous obtenons une courbe appelée « en baignoire » qui est divisée en 3 parties (figure II.6) :

- La première est appelée période de mortalité infantile ou le taux de panne est en décroissance ce qui correspond aussi au rodage;
- La deuxième partie n'est autre que la durée de vie utile : c'est la zone où le taux de panne est constant;
- La dernière partie est appelée le vieillissement ou l'usure : en atteignant cet âge, le composant commence à vieillir et le taux de panne augmente en fonction du temps.

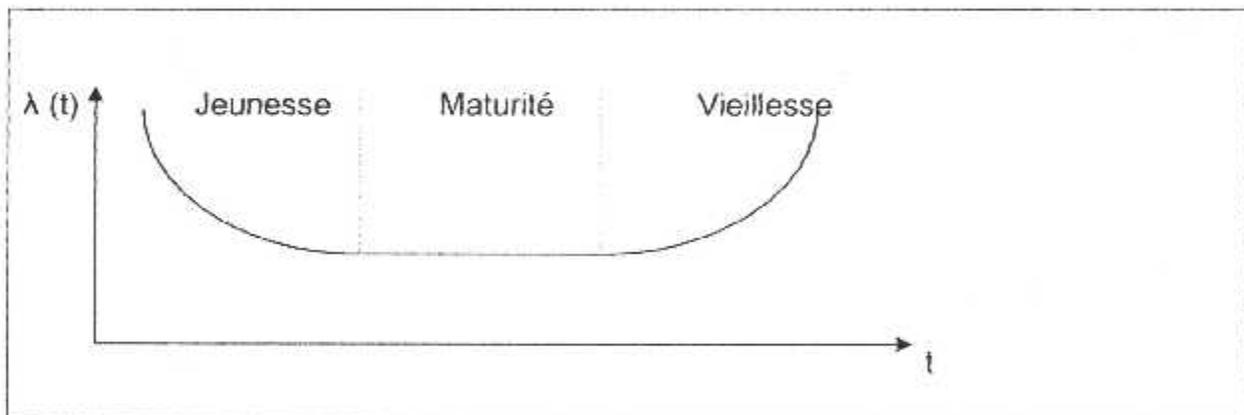


Figure II.6 : La courbe en baignoire

Il importe de rappeler que la fiabilité est une fonction décroissante de l'usage fait de l'équipement. Elle est liée au taux de panne $\lambda(t)$ par la relation suivante :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right) \quad (\text{II.11})$$

Où t est la durée de la mission considérée.

La vie utile d'un composant comporte des cycles de fonctionnement. Au cours d'un cycle, l'état du composant passe de l'état « en fonction » à l'état « hors d'usage » (figure II.7).

Si nous analysons ce cycle, nous remarquons qu'il est composé de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF). Cette moyenne est définie comme la durée moyenne de bon fonctionnement du composant (figure II.7). L'expression du MTBF est donnée par l'équation (II.12). La moyenne de temps de bon fonctionnement comporte la MUT (*Mean Up Time*) qui est la moyenne de temps de fonctionnement et la MDT (*Mean Down Time*) qui est la moyenne de temps de

panne. Cette dernière est composée de la moyenne de temps technique de réparation (MTTR) qui est la durée moyenne de réparation du composant sur un horizon de temps T (figure II.7) et une fraction de temps nécessaire à la détection de la panne et à la remise en route du composant.

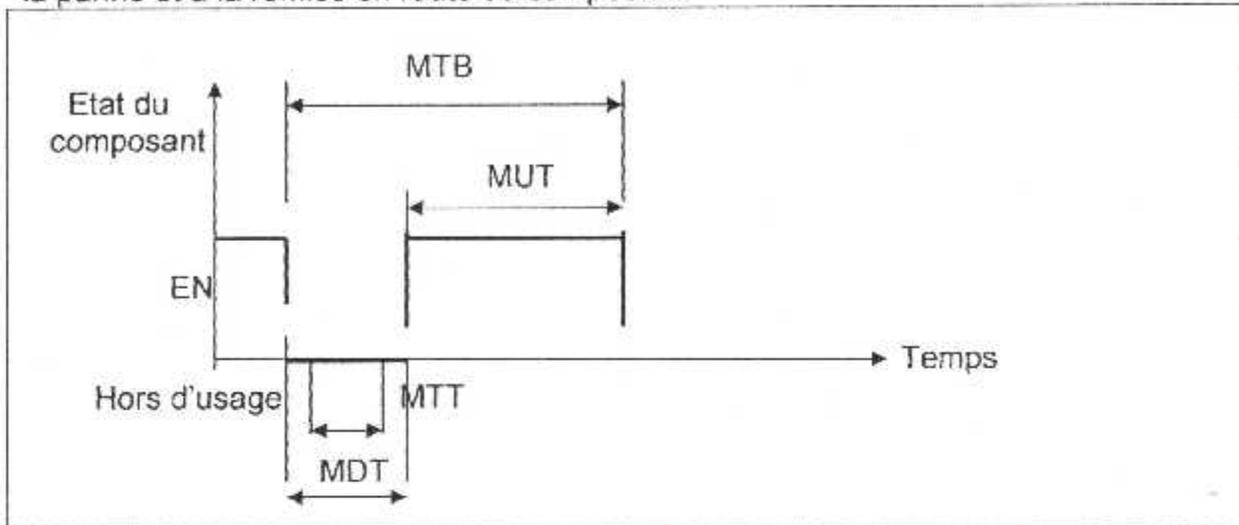


Figure II.7: La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps

La durée moyenne entre deux défaillances (MTBF) correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire T. Son expression est donnée par l'équation (II.12).

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (II.12)$$

Il résulte de ces définitions une grandeur qui caractérise un appareil au même titre que la fiabilité : la disponibilité. Elle est définie comme la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant t. Augmenter la disponibilité d'un matériel consiste à diminuer le nombre de ses arrêts et à réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci. Ainsi, la disponibilité, notée D, est donnée par l'équation (II.13)

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (II.13)$$

D'un point de vue pratique, la figure (II.8) présente un schéma global de détermination des caractéristiques de la fiabilité opérationnelle d'un composant à partir d'une banque de données, de l'historique des pannes ou du retour des expériences. Ces données nous permettent de déterminer la durée de vie observée et de déduire les différentes caractéristiques telles que le taux de panne, la fiabilité, la défaillance, etc.

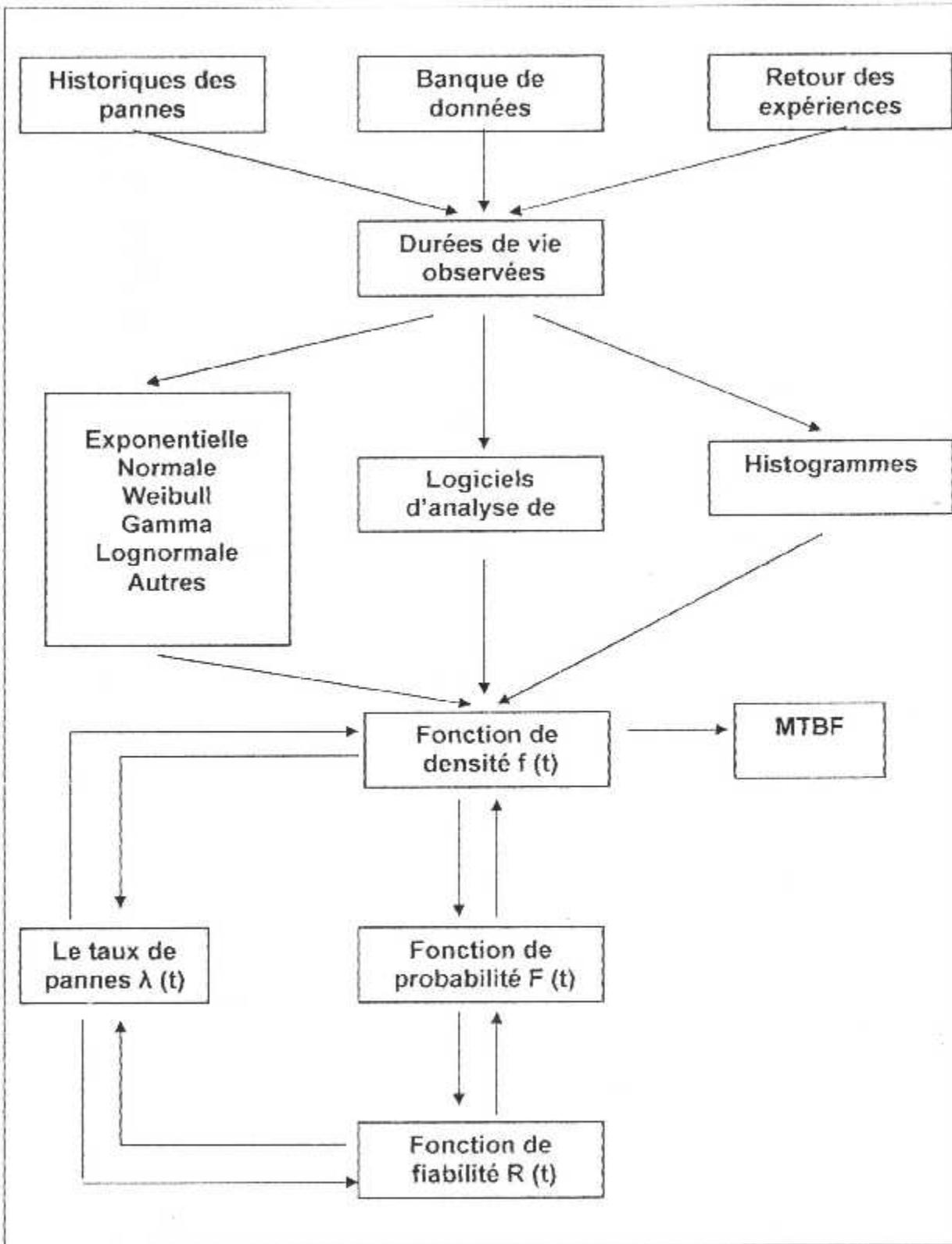


Figure II.8: La détermination expérimentale des caractéristiques de la fiabilité opérationnelle d'un composant

II.3.2. Rôle de la fiabilité

La fiabilité joue un rôle primordial dans la procédure d'identification de la criticité des modes de défaillances et pour la sélection des intervalles entre les opérations de maintenance préventive. Il est impératif de, si l'on souhaite appliquer la MBF, de disposer d'un retour d'expérience de qualité sur les taux et modes de défaillance.

II.3.3. Relation entre la maintenance et la fiabilité

La figure (II.9) présente la contribution des différents types de maintenance en ce qui concerne la fonction de fiabilité $R(t)$ et la durée de vie utile de l'équipement.

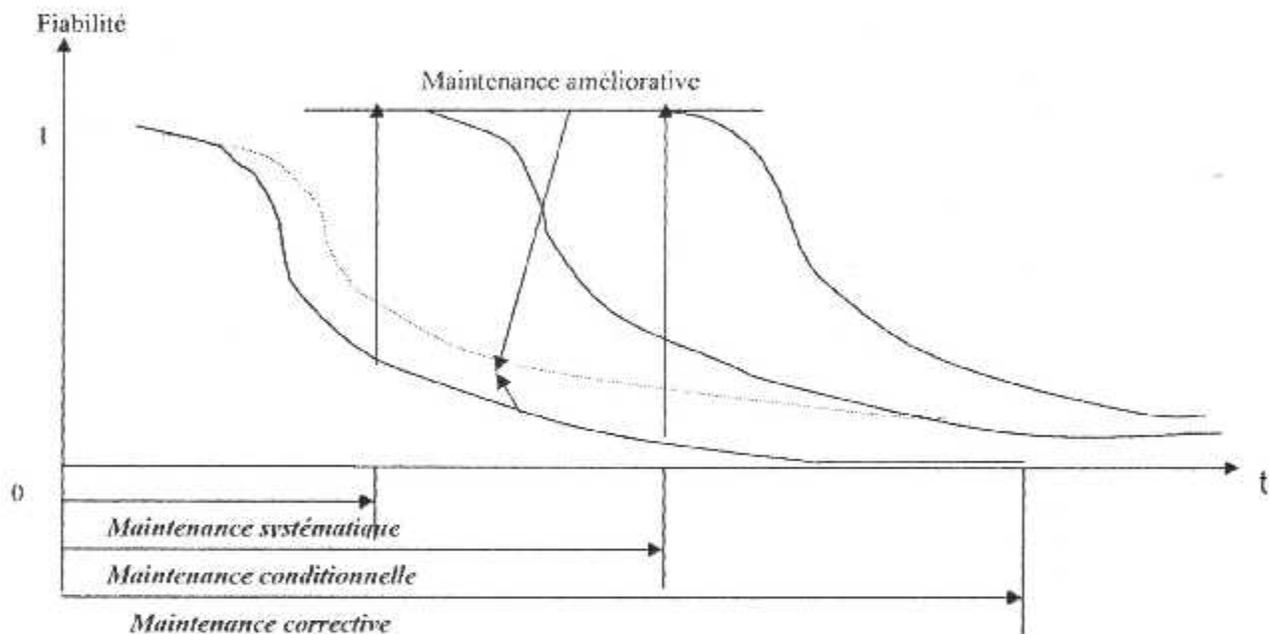


Figure II.9 : L'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements

Il va sans dire qu'une réduction du taux de panne $\lambda(t)$ entraîne une amélioration de la fonction de fiabilité $R(t)$. C'est dans cette optique que la maintenance améliorative a été instaurée. La maintenance préventive, avec toutes ses variantes, va en revanche tenter de ramener le taux de panne à son niveau le plus bas en remplaçant la composante usée sans améliorer les caractéristiques intrinsèques de l'équipement.

II.4. Définitions et Classification des défaillances

Pour mettre en place une politique de maintenance adéquate, il est important de comprendre les phénomènes de défaillance et de dégradation des composants. Il existe deux types de défaillances en fonction de la vitesse d'apparition et du degré : la défaillance catalectique (qui est à la fois complète et soudaine) et la défaillance par dérive ou par dégradation (qui est à la fois progressive et partielle). Cette dernière est due à un phénomène d'usure.

La norme AFNOR définit la défaillance comme une altération ou une cessation d'un bien à accomplir une fonction requise.

L'analyse de la défaillance est faite non seulement dans le but de réparer ou dépanner un système défaillant, mais également de chercher à éviter la réapparition du défaut. Une expertise doit permettre, à l'issue d'une défaillance d'un équipement, de déterminer les causes qui peuvent être soit un processus intrinsèque ou une imputation externe (accident ou mauvaise utilisation). Elle doit aussi permettre d'identifier la nature de la défaillance, de la détecter, d'en déduire les conséquences, d'en déterminer l'amplitude et finalement, de comprendre le processus de manifestation qui est caractérisé par la vitesse de propagation ou le caractère.

Les principaux modes de défaillances (effets par les quels une défaillance est observée) sont divisés dans les trois catégories suivantes :

-La santé – matière : il s'agit de défauts préexistants dans les pièces en service. Il apparaît suite à un défaut soit lors de l'élaboration de la matière, soit lors de l'élaboration de la pièce finie, ou lors du montage;

-Les modes de défaillances mécaniques en fonctionnement : il s'agit de plusieurs types de défaillances mécaniques. Elles apparaissent suite à un choc, à une surcharge, à une fatigue mécanique ou thermique, à un fluage, à l'usure, à l'abrasion, à l'érosion ou à la corrosion;

-Les modes de défaillances électriques : ces défaillances surgissent suite à la rupture d'une liaison électrique, au collage, à l'usure de contact ou au claquage d'un composant.

Pour remédier à ces défaillances, les concepts de maintenance et de maintenabilité ont vu le jour. Comme le mentionne, les défaillances sont à la maintenance ce que les maladies sont à la médecine : leur raison d'exister.

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ces fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Défaillance fonctionnelle : Une défaillance fonctionnelle correspond à la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

CHAPITRE III

Théorie de fiabilité- Méthodes fréquentielles

III.1. Introduction

La fiabilité d'un matériel ou d'un équipement correspond à sa probabilité de bon fonctionnement, c'est-à-dire à la probabilité d'accomplir la fonction pour laquelle il est requis.

A l'origine, il s'agit d'une notion qualitative. Cependant, de plus en plus, la fiabilité devient un concept quantitatif et il convient de développer des méthodes afin de la mesurer.

Les techniques utilisées pour obtenir des estimations des caractéristiques statistiques associées aux défaillances (La fiabilité et ses caractéristiques) correspondent aux deux approches suivantes :

1/ L'approche fréquentielle (les méthodes de la statistique classique appliquées la fiabilité),

2/ L'approche bayésienne (les méthodes de la statistique bayésienne appliquées la fiabilité).

Ce chapitre traite l'approche par les méthodes fréquentielles. Ces méthodes nécessitent l'accès à des données de défaillances issues des banques de données de retour d'expérience. Elles permettent ainsi de déterminer la loi de fiabilité observée du matériel à partir des observations de défaillance. Cette loi de fiabilité prend en compte implicitement les effets de la politique de maintenance préventive réalisée sur ce matériel.

Ce chapitre traite ces problèmes. En particulier, il met en évidence que, la plupart du temps, les données recueillies sont censurées. Dans ces conditions, faut-il utiliser des méthodes paramétriques ou non paramétriques pour déterminer la loi de défaillance ? L'évaluation de l'estimateur de Kaplan-Meier est la méthode à recommander dans le sens qu'elle ne nécessite aucune hypothèse quant au choix d'une loi de fiabilité définie. Au contraire, les méthodes paramétriques qui consistent à ajuster les données de retour d'expérience sur un modèle mathématique, le plus souvent le modèle de Weibull, doivent permettre d'estimer les paramètres de ce modèle. Dans ces conditions, l'estimation des paramètres ne suffit pas. Il convient également de déterminer un intervalle de confiance ou plutôt une loi de distribution de ces paramètres afin d'apprécier l'incertitude associée à l'estimation. Ce chapitre présentera également la manière de procéder.

III.2. Les données de survie

Pour pouvoir déterminer une loi de fiabilité et ajuster ses paramètres, il faut constituer des échantillons de « temps » t . Les échantillons sont formés de deux grands types d'observations :

III.2.1. Les temps de défaillances

Le dispositif X a une défaillance à la date t (référence par rapport à une origine), t sera une donnée de défaillance de l'échantillon.

III.2.2. Les données de censure (ou les temps de troncature)

Il existe trois types de données censurées :

1-Les données censurées à droite : on décide d'arrêter l'observation à la date d . A cette date, le dispositif n'a pas eu une défaillance. La date t sera une donnée censurée à droite (ou tronquée à droite).

2-Les données censurées à gauche : on décide d'observer l'état du dispositif X à partir de la date g . On constate que le dispositif a été défaillant mais on ne sait pas à quelle date, t , a eu lieu cette défaillance. On a seulement l'information : t est inférieure à g

3-Les données censurées par intervalle : le dispositif X a eu une défaillance entre deux date g et d connues ; il s'agit d'une donnée censurée par intervalle.

III.3. Modèles de fiabilité

Seules les lois les plus fréquemment utilisées dans le retour d'expérience sont évoquées ici.

III.3.1. Loi exponentielle

Appliquée à un matériel, elle correspond à la période pendant laquelle le de défaillance est constant avec le temps, c'est-à-dire qu'à tout instant la probabilité de défaillance est la même.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{III.1})$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{III.2})$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{III.3})$$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{Cte} \quad (\text{III.4})$$

écart type = $1/\lambda$

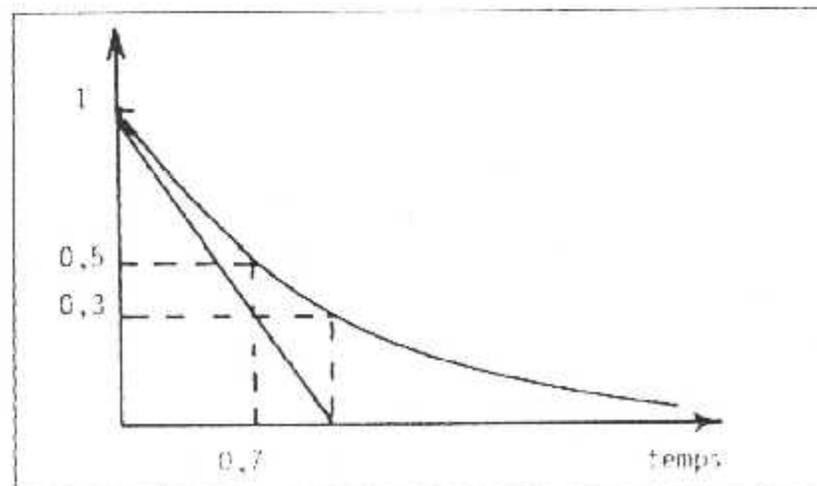


Figure III.1: Loi exponentielle

III.3.2. Loi de Gauss (normale)

La densité de probabilité est donnée par :

$$f(t) = \left[\sigma \sqrt{2\pi} \right]^{-1} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (III.5)$$

Et la fiabilité en intégrant :

$$R(t) = \int_t^{\infty} \left[\sigma \sqrt{2\pi} \right]^{-1} e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (III.6)$$

Le taux de défaillance est le quotient de ces deux expressions.

La moyenne est μ et l'écart type σ .

Le papier graphique de Gauss permet d'aligner les points sur une droite de "Henry".

Comme t est toujours positif, cette loi ne peut pas être utilisée si $\mu < 3\sigma$. Elle décrit assez bien les phénomènes d'usure (λ croissant).

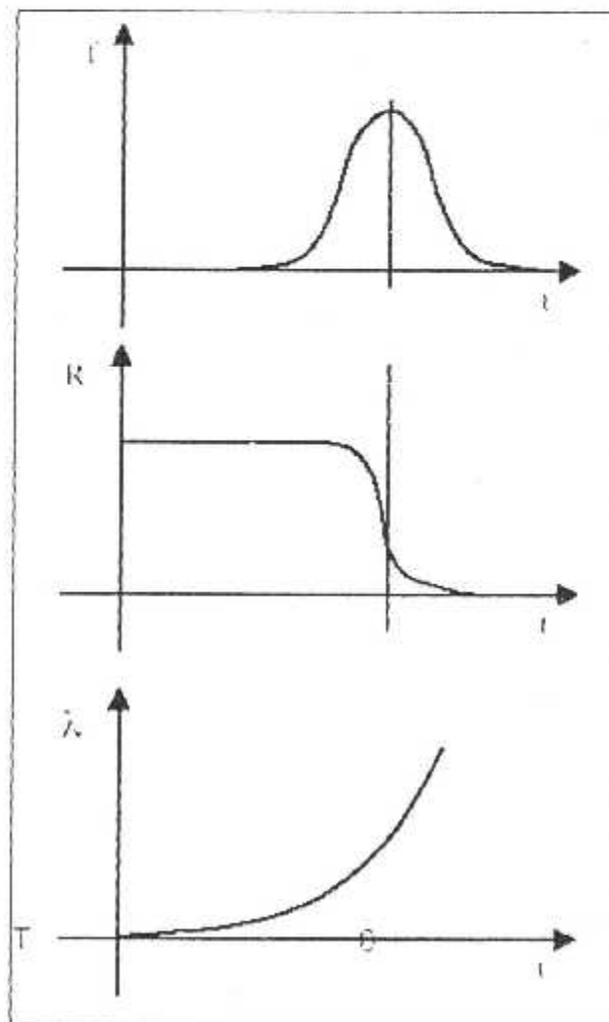


Figure III.2: Loi de Gauss

En remplaçant t par son logarithme décimal ou népérien on obtient une loi log-normale parfois utilisée pour les réparations ou les phénomènes d'usure.

III.3.2. Etude du modèle de Weibull

C'est encore une loi exponentielle mais disposant de trois paramètres ajustables:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Avec

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \text{ Pour } t \geq \gamma \quad (\text{III.7})$$

et

$$R(t) = 1, \text{ Pour } t < \gamma$$

$\gamma \sim 0$ décalage de l'origine (temps)

$\beta > 0$ paramètre de forme (sans dimension)

η : paramètre d'échelle (temps)

Si $\gamma = 0$, la loi de Weibull à deux paramètres donne :

$$\lambda(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1} = \lambda t^{\beta-1} \quad (\text{III.8})$$

λ décroissant avec t pour $\beta < 1$

$\lambda = \text{constante}$ pour $\beta = 1$

λ croissant pour $\beta > 1$.

Cette croissance est linéaire pour $\beta = 2$.

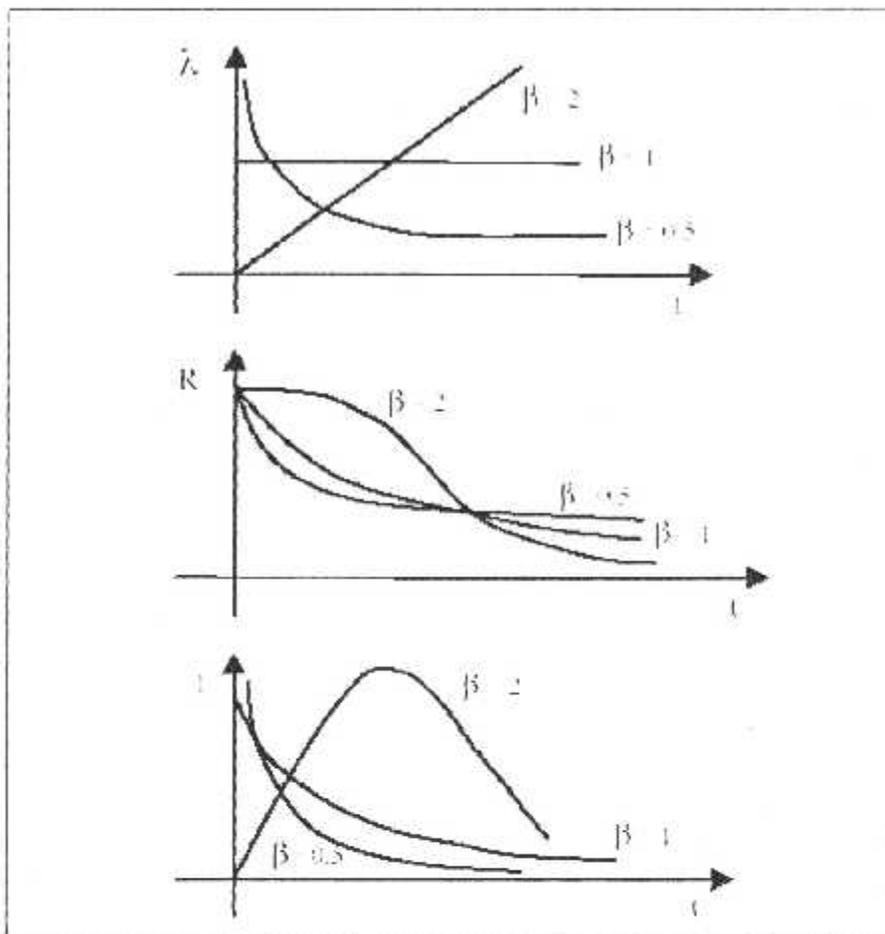


Figure III.2: Loi de Weibull

Les trois périodes de la courbe en baignoire peuvent donc être décrites avec différentes valeurs de β .

La moyenne et l'écart type valent respectivement :

$$\bar{Y} = + \eta \Gamma (1 + 1/\beta) \quad (III.9)$$

$$\sigma = \eta [\Gamma (1 + 2/\beta) - \Gamma^2 (1 + 1/\beta)]^{1/2} \quad (III.10)$$

Γ étant la fonction eulérienne de seconde espèce (C'est la fonction Gamma).

Les paramètres β et η sont en général estimés graphiquement avec les transformations :

$$Y = \ln [- \ln (R (t))] = \ln [\ln (1 - F (t)) - 1] = \beta \ln t / \eta \quad (=0 \text{ si } F (t) = 0,63)$$

$$X = \ln t$$

Soit :

$$Y = \beta(X - \ln \eta)$$

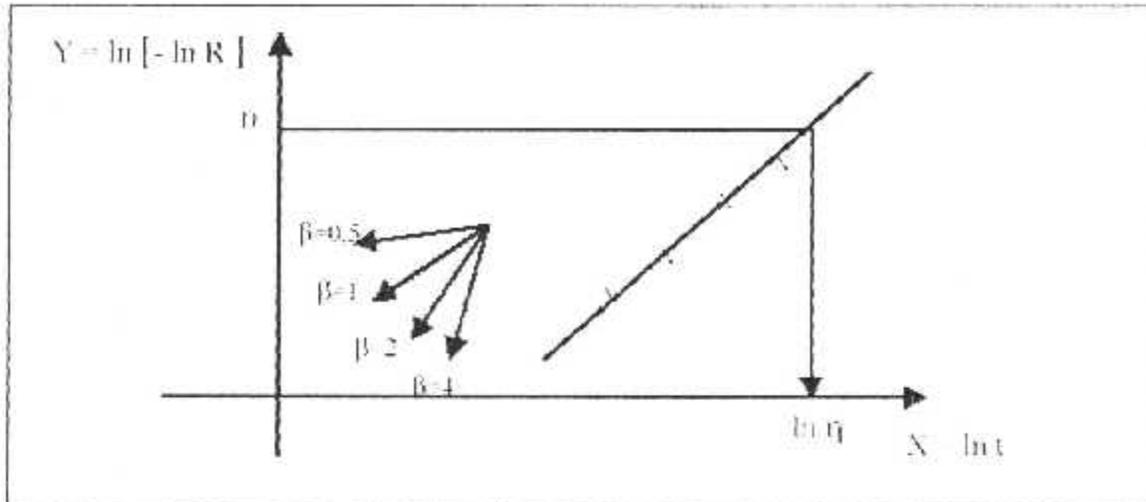


Figure III.3: Graphique Allan Plait

Le papier graphique à échelle fonctionnelle d'Allan Plait permet de représenter linéairement les points expérimentaux puis de déterminer η par intersection avec l'axe horizontal et β par la pente.

III.4. Méthodes fréquentielles d'estimation des lois de fiabilité

III.4.1. Les méthodes non paramétriques

III.4.1.1. Méthodes des rangs médians et rangs moyens

Si l'on dispose d'un échantillon non censuré de défaillances ($t_i, i=1, n$) la fonction de répartition empirique est définie par :

$$F_{n(t)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(t_j \leq t) \quad (III.11)$$

Où $I(A)$ désigne la fonction indicatrice de l'événement A.

Si maintenant l'échantillon ($t_i, i=1, n$) est censuré, on cherche à obtenir un équivalent de la fonction de répartition empirique. En général, ce n'est pas à F mais à $R=1-F$, la de fiabilité que l'on s'intéresse, et c'est elle que l'on cherche à estimer.

Plusieurs méthodes existent mais seul l'estimateur de Kaplan-Meier fait référence ainsi la méthode de « Johnson » ou des rangs médians.

L'historique des pannes permet l'obtention d'un tableau de valeurs (la chronologie des défaillances).

-Grands échantillons :

Intervalles des classes	Effectif	Fréquence relative	Fréquence cumulée
t_{i-1}, t_i	n_i	$f_i = n_i/N$	$F_i = \sum n_j/N = F(t)$

-Petits échantillons ($n < 50$) :

Temps croissants	Effectif	Ordre ou rang de la défaillance	Fréquence Cumulée
t_i	n_i	$i = \sum n_i$	$F_i = i/N$

Le nombre de survivants est donc $N - n_i$ à t_i , $N + 1$ -ordre de la défaillance précédente

Remarques :

Si $N < 20$: on utilise la méthode des rangs médians; cette méthode calcule l'ordre d'apparition des défaillances en donnant un certain incrément de l'ordre en fonction du nombre de données censurées entre deux défaillances.

Si l est l'incrément et N l'effectif de l'échantillon, on a :

$$\text{Incrément} = l = \frac{N + 1 - \text{ordre de la défaillance précédente}}{l + \text{nombre d'entités ayant fonctionné plus longtemps que le dernier censuré}}$$

Si e_i est l'ordre d'apparition de la défaillance (ordre effectif+ incrément) le rang médian s'écrit:

$$\text{Rang médian} = F(i) = (e_i - 0.3) / (N + 0.4)$$

Et la fiabilité est estimée par :

$$\text{Fiabilité} = R_n(t_i) = 1 - \text{Rang médian}$$

Si $20 < N < 50$: on utilise la méthode des rangs moyens

$$F(l) = l / (N + 1)$$

III.4.1.2. L'estimateur de Kaplan-Meier ou «Product Limit »

L'estimateur de Kaplan-Meier est considéré comme l'estimateur non paramétrique le plus direct de la fonction de survie.

Si on pose :

$$Q_j = \text{Prob}(T \geq j / T \geq j-1) ;$$

$$R(t) = \text{Prob}(T \geq t) = Q_1 Q_2 \dots Q_j \dots Q_n$$

Ou :

Q_j est la probabilité conditionnelle d'être en bon fonctionnement à l'instant j , sachant qu'à l'instant $(j-1)$ le matériel était en bon fonctionnement ;

$R(t)$ est le produit des estimateurs q_j de Q_j , ou q_j est la proportion observée de matériels en fonctionnement à j , parmi ceux des matériels qui étaient en bon fonctionnement juste avant cette date j .

Posons :

d_j le nombre de défaillances à t_j .

n_j le nombre de dispositifs soumis à risque à t_j , n_i défaillants, n_i censurés,

On en déduit :

$$R(t_i) = \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{r_j}\right) \quad (III.12)$$

C'est l'estimateur de Kaplan-Meier

III.4.2. Les méthodes paramétriques

III.4.2.1. Le maximum de vraisemblance

Le problème du choix à priori d'un modèle se pose, si l'on veut ajuster un modèle paramétrique. A l'incertitude des données, on ajoute l'incertitude due au choix du modèle si $f(t, \theta)$ est la densité de probabilité, de forme connue, mais de vecteur paramètre θ inconnu, la vraisemblance des observations s'écrit:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta)$$

Les estimateurs du maximum de vraisemblance sont ceux qui maximisent la vraisemblance. Ils sont obtenus en écrivant la condition nécessaire d'extremum:

$$\partial L(\theta) / \partial \theta_j = 0$$

III.4.2.2. Application de la loi de Weibull à 2 paramètres

La vraisemblance s'écrit :

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^r f(t_i / \theta) \cdot \prod_{i=r+1}^n R(t_i, \theta) \quad (III.13)$$

L'estimateur $\hat{\theta} = (\hat{\beta}, \hat{\eta})$ est donné par le système d'équations suivant:

$$\ln \hat{\beta} = (1/r) \sum_{i=1}^r \log t_i - \left(\sum_{i=1}^n t_i \log t_i \right) / \sum_{i=1}^n t_i \quad (III.14)$$

$$\hat{\eta} = \left[(1/r) \sum_{i=1}^r t_i \right]^{\hat{\beta}} \quad (III.15)$$

III.4.2.2.1. Algorithme de résolution des équations de vraisemblance

La 2^{ème} équation de vraisemblance est de la forme

$$\hat{\beta} = F(\hat{\beta})$$

On peut donc la résoudre à l'aide d'approximations successives:

$$\hat{\beta}_k = (\hat{\beta}_{k-1} + F'(\hat{\beta}_{k-1})) / 2$$

Algorithme :

- 1- Choisir une valeur initiale $\hat{\beta}_0$ aussi proche de la réalité que possible (suivant l'expérience antérieure par exemple);
- 2- Calculer: $\hat{\beta}_0 = F'(\hat{\beta}_0)$
- 3- La nouvelle estimation est $\hat{\beta}_1 = (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_0) / 2$
- 4- Retour au pas 2, avec $\hat{\beta}_1$
- 5- Test d'arrêt $|\hat{\beta}_j - \hat{\beta}_{j-1}| < \varepsilon, (0 < \varepsilon < 1); j=1, 2, \dots$

III.4.2.2. Estimation linéaire

On pose $Y = \text{Log } X$ alors la fonction de répartition de Y est de la forme:

$$F(Y) = 1 - \exp[-\exp(Y-U)/V] \quad -\infty < Y < +\infty$$

$U = \text{log} \eta, V = 1/\beta$ (C'est la loi des valeurs extrêmes).

La valeur de Y est :

$$Y = U + V [\text{Log}(1/R)]$$

Qui est l'équation d'une droite $Z = By + A$ avec $B = v, A = U$

Soient X_1, \dots, X_n . La statistique d'ordre des durées de vie de la loi de Weibull $Y_i = \text{Log } X_i$

Les paramètres U et V peuvent s'exprimer sous la forme:

$$\hat{U} = \sum_{i=1}^r a_i Y_i; \quad \hat{V} = \sum_{i=1}^r c_i Y_i$$

Où a_i et c_i sont des coefficients linéaires de poids: leurs valeurs sont tablées.

Cette procédure aboutit à une estimation linéaire des paramètres.

Les estimations des paramètres sont alors de la forme:

$$\hat{\eta} = e^{\hat{U}} \quad ; \quad \hat{\beta} = 1 / \hat{V}$$

III.4.2.3. Tests d'adéquation

Les modèles que l'on peut établir sont issus d'un échantillon de population, puis on fait l'hypothèse qu'ils suivent une loi particulière (Loi de Weibull pour notre application). Ainsi il reste à vérifier la validité de cette loi. Cette vérification est obtenue par un test d'adéquation. Pour cela, on admet dans l'utilisation des statistiques un risque d'erreur « α » petit, qui est le niveau de signification (α est égal à la probabilité de se tromper en utilisant ce test).

III.4.2.3.1. Test du Khi-deux (χ^2)

On range les données en classes et dans chaque classe, on calcule une distance du χ^2 , indicatrice des écarts:

$$\chi^2 = \sum_{r \text{ classes}} (O_j - T_j)^2 / T_j \quad (III.16)$$

O_j : nombre d'observations dans la $j^{ème}$ classe ;

T_j : nombre d'observations total fois P_i ;

$$P_i = R(t_i) - R(t_{i+1})$$

Distance que l'on compare à la valeur du χ^2 à $v = r - p - 1$ degré de liberté (p étant le nombre de paramètres qu'il a fallu estimer pour obtenir la loi théorique).

Si $\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}(v)$, on rejette l'hypothèse du modèle théorique choisi.

Il faut un nombre important d'observations $N \geq 50$.

La détermination du nombre de classes peut être faite par les règles :

$$r = \sum (n_i)^{1/2}$$

$$r = 1 + 3.3 \log \sum n_i \quad (\text{règle de Sturges})$$

III.4.2.3.2. Test de Kolmogorov -Smirnov

Il peut être appliqué, quelque soit le nombre d'observations. On mesure l'écart point par point entre les deux fonctions réelle et théorique.

$$D_{n_i} = \left| F(t) - F(t) \right| \quad (III.17)$$

↑
↑
 Fonction réelle Fonction théorique

$D_n = \text{Max} \left| F(t) - F(t) \right|$ suit une loi ne dépendant que de n et on écrit que:

$$p \{ \text{Max} \left| F(t) - F(t) \right| < D_{n, \alpha} \} = 1 - \alpha \quad (III.18)$$

La valeur de $D_{n, \alpha}$ est donnée par la table de Kolmogorov -Smirnov.

Si $D_n > D_{n, \alpha}$ on refuse l'hypothèse du modèle théorique.

Si $D_n < D_{n, \alpha}$ on accepte l'hypothèse du modèle théorique.

CHAPITRE IV

Méthodologie de la maintenance basée sur la
fiabilité

IV.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire en détail les étapes indispensables à la mise en place d'une maintenance basée sur la fiabilité pour un système en cours de conception ou déjà existant.

Comme des méthodes identiques seront utilisées à plusieurs reprises au cours des différentes étapes, elles feront l'objet de descriptions détaillées au début du chapitre.

IV.2. Méthodes utilisées dans la MBF

IV.2.1. Analyse fonctionnelle

IV.2.1.1. Présentation : D'après la norme AFNOR NF X 50-151, l'Analyse Fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un produit. L'Analyse Fonctionnelle s'applique à la création ou à l'amélioration d'un matériel. Elle est dans ce cas l'étape fondamentale de l'Analyse de la Valeur.

IV.2.1.2. Méthodologie : L'Analyse Fonctionnelle s'effectue en plusieurs étapes

A/ Déterminer le profil de vie du système : Dans un premier temps, il faut rechercher l'information nécessaire pour identifier les différentes phases du cycle de vie du matériel, depuis son arrivée jusqu'à son retrait de service. Pour chaque situation, il faut lister les éléments, personnes, matériels, matières qui constituent l'environnement du système.

B/ Recenser les fonctions : La recherche des fonctions est réalisée en étudiant les relations du système avec son environnement. Elle s'effectue selon une méthodologie axée sur le recensement exhaustif des fonctions. Il faut distinguer les fonctions de service des fonctions techniques :

1-Les fonctions de service : Elles se déclinent en deux catégories :

1-1-Les fonctions principales : Pour chaque phase du cycle de vie, il s'agit d'identifier les relations créées par le système entre deux ou plusieurs éléments de son milieu d'utilisation. Il faut ensuite exprimer le but de chaque relation créée. Chaque but détermine ainsi une fonction principale.

1-2-Les fonctions contraintes : Pour chaque position d'utilisation, il s'agit de définir les contraintes imposées au système par son milieu extérieur d'utilisation. Cela revient à identifier les relations entre le système et un élément du milieu extérieur.

2-Les fonctions techniques : Chronologiquement, elles ne sont identifiées qu'une fois les fonctions de service clairement exprimées. Elles sont issues de solutions techniques pressenties. L'architecture du système est composée d'éléments existants plus ou moins standardisés. Le projet consiste alors à les organiser de façon nouvelle ou à créer des relations nouvelles entre ces éléments.

Ces fonctions de service vont alors être relayées par des fonctions techniques reliant les diverses solutions techniques pressenties. Les fonctions techniques reflètent l'organisation entre les différentes voies de solutions.

C/ Ordonner les fonctions : Les fonctions identifiées précédemment ont été notées sans respecter un ordre particulier. Il est important d'établir une décomposition logique entre ces diverses fonctions. Cela se traduit par la création d'un diagramme fonctionnel qui ordonne les fonctions identifiées, vérifie la logique fonctionnelle, contrôle l'exhaustivité du recensement des fonctions et sert de support à la recherche de nouvelles fonctions. Cette phase est également appelée découpage fonctionnel.

D/ Méthode FAST (Diagramme FAST): Imaginée par l'américain Charles W. Bithenay, la méthode FAST (Functional Analysis System Technique) ou Technique d'Analyse Fonctionnelle Systématique est couramment employée en matière d'analyse de la valeur.

En France, le FAST est considéré comme une étape dans les descriptions d'un système, et on lui donne souvent le nom de DAFSY (Diagramme d'Analyse Fonctionnel des Systèmes).

L'application des méthodes d'analyse fonctionnelle décrites précédemment aboutit à un grand nombre de fonctions. La méthode FAST présente l'avantage d'ordonner les fonctions suivant un ordre logique, elle contribue à la clarification de "état fonctionnel du produit (et à la rédaction finale du Cahier des Charges Fonctionnel).

FAST est une aide à la reconception d'un produit ou d'un système. Elle permet:

- d'ordonner les fonctions identifiées,
- de vérifier la logique fonctionnelle,
- d'avoir une bonne connaissance du produit ou système étudié,
- de prendre conscience de l'importance relative des éléments ou des structures vis-à-vis des fonctions qu'ils assurent,
- de mettre en évidence des synchronisations entre les fonctions indépendantes,
- enfin, de répartir les coûts par fonction.

Le diagramme FAST ne réalise ni l'identification ni la validation des fonctions d'un produit. C'est une étape qui peut intervenir après l'identification de toutes les fonctions assurées par le système.

1- Domaines d'application : La méthode FAST est aussi bien utilisée pour décrire des systèmes mécaniques et des systèmes d'organisation.

2- Démarche FAST : À partir de la liste de fonctions identifiées par une des méthodes d'analyse fonctionnelle, on identifie les fonctions qui s'appliquent à l'ensemble du produit et on les répertorie en marge du diagramme FAST.

Les fonctions sont notées chacune sur des canes indépendantes. Ces canes seront disposées les unes à côté des autres dans un ordre qui sera déterminé par les réponses aux 3 questions:

- Pourquoi cette fonction doit être remplie?
- Comment ?
- Quand?

2-1- Représentation graphique: Le système est représenté à l'aide d'un diagramme comportant trois régions R délimitées par des traits interrompus verticaux :

- la partie centrale correspond au domaine fonctionnel couvert par le système,
- dans la partie de gauche on trouve les fonctions de services du système,
- dans la partie de droite on trouve les ressources extérieures au système: ressources qui, si elles n'existaient pas, ne modifieraient pas la capacité du système à satisfaire les fonctions.
- dans la partie centrale, on passe d'une fonction à une autre en se posant les questions: Pourquoi ? Comment? Quand?

Les fonctions sont ordonnées et représentées dans des boîtes rectangulaires.

La construction d'un diagramme commence en plaçant à gauche la fonction de service principale (cf. norme AFNOR). Il est admis que toute fonction située à gauche d'une autre est de rang supérieur car elle répond à la question Pourquoi ? C'est-à-dire qu'elle va dans le sens de la fonction supérieure du produit.

Toute fonction située à droite d'une autre est de rang inférieur, ce sont les fonctions que l'on doit réaliser pour satisfaire les fonctions principales.

Le graphe se construit progressivement sur une ligne baptisée «chemin critique » (initialement appelé « chemin fondamental des fonctions ») (Figure 1).

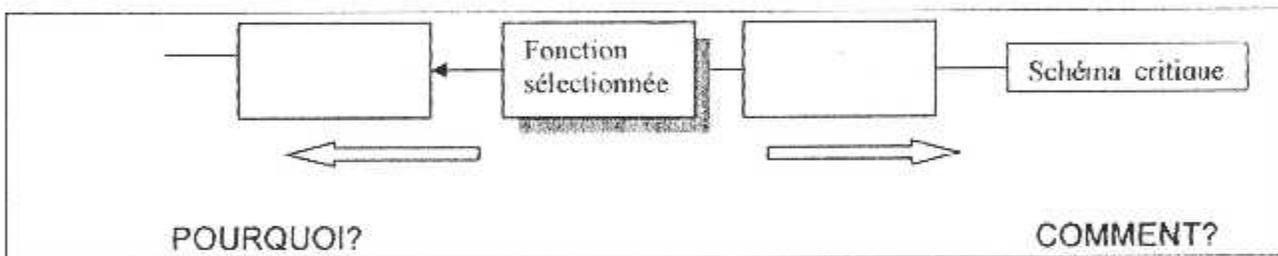


Figure IV.1: Représentation graphique

Au-dessus ou au-dessous d'une fonction, on placera les fonctions qui se produisent dans le temps, ou en même temps (on se pose la question Quand ?) (Figure 2).

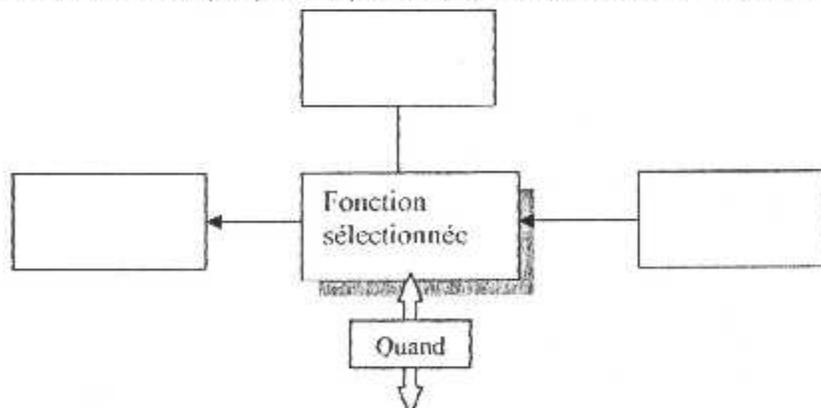
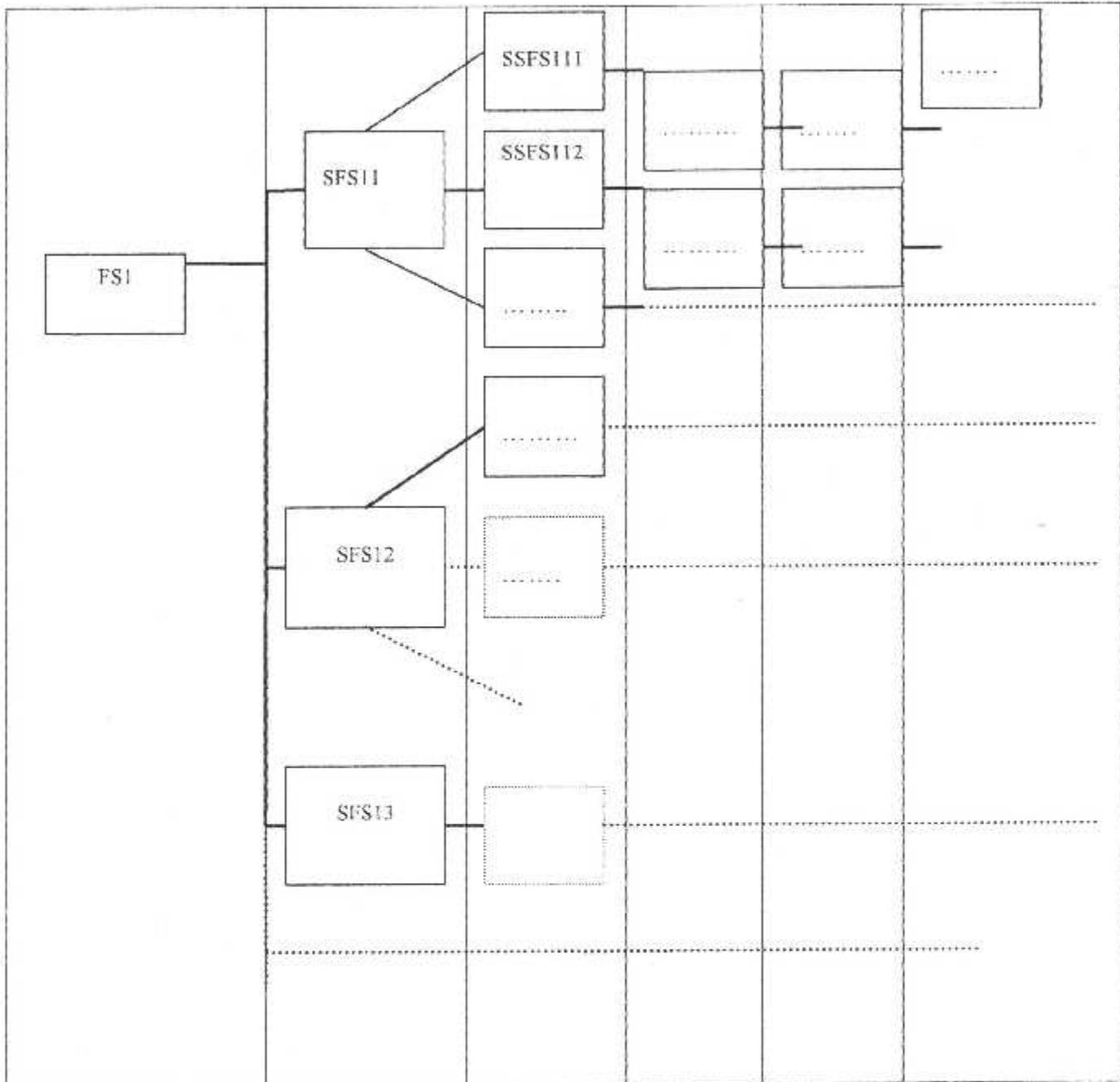


Figure IV.2 : Fonctions simultanées gérées par Quand?

2-2- Diagramme FAST : Pour une solution technologique donnée, ce diagramme permet de représenter de façon synthétique un enchaînement hiérarchisé des fonctions techniques.

Très souvent donné sous la forme d'une arborescence hiérarchisée, à plusieurs niveaux, de chacune des fonction de service, présentée dans un tableau (Tableau du diagramme FAST).

Extérieur du système	Intérieur du système				Extérieur du système
Fonction de service	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Elément du milieu environnant



IV.2.2. AMDEC

IV.2.2.1. Présentation : C'est une technique d'analyse qualitative de la Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels par l'analyse des risques de défaillances.

- L'AMDEC est une méthode d'analyse inductive, systématique et prévisionnelle des -défaillances d'un système,
- de leurs origines et de leurs conséquences, et permettant
 - la mise en évidence des points critiques,

-la définition d'actions correctives adaptées.

IV.2.2.2. Méthodologie : Pour chaque élément constitutif du système et pour chacune des fonctions à assurer (dans la phase de fonctionnement considérée), il s'agit d'identifier les modes de défaillance potentiels.

Pour chaque mode de défaillance identifié, il faut

- rechercher les causes possibles (→ Identification des causes primaires),
- puis les effets sur la machine et sur l'utilisateur (→ Identification des effets les plus graves),
- et enfin recenser les détections préventives possibles (→ Identification des détections les plus probables).

Il faut ensuite évaluer la criticité dans le but d'affecter à chaque défaillance un niveau de criticité C évalué à partir de 3 critères de cotation indépendants :

F : la fréquence d'apparition de la défaillance,

G : la gravité des effets de la défaillance sur la machine ou sur l'utilisateur,

D : la probabilité de non détection de la défaillance,

$$C = F \cdot G \cdot D$$

Pour évaluer la criticité, il est nécessaire, pour chaque combinaison cause-mode-effet, d'évaluer F, G et D à l'aide des grilles de cotation prédéfinies. Il s'agit ensuite de calculer la criticité. Il est dès lors possible de proposer des actions correctives dont le but est de diminuer la criticité C des défaillances en agissant sur un ou plusieurs des critères F, G et D.

Pour y parvenir, il faut, et ce pour chaque association cause-mode-effet, rechercher les actions de détection de la cause, les actions de prévention de la défaillance et les actions de réduction des effets ; ensuite il suffit d'évaluer la nouvelle criticité.

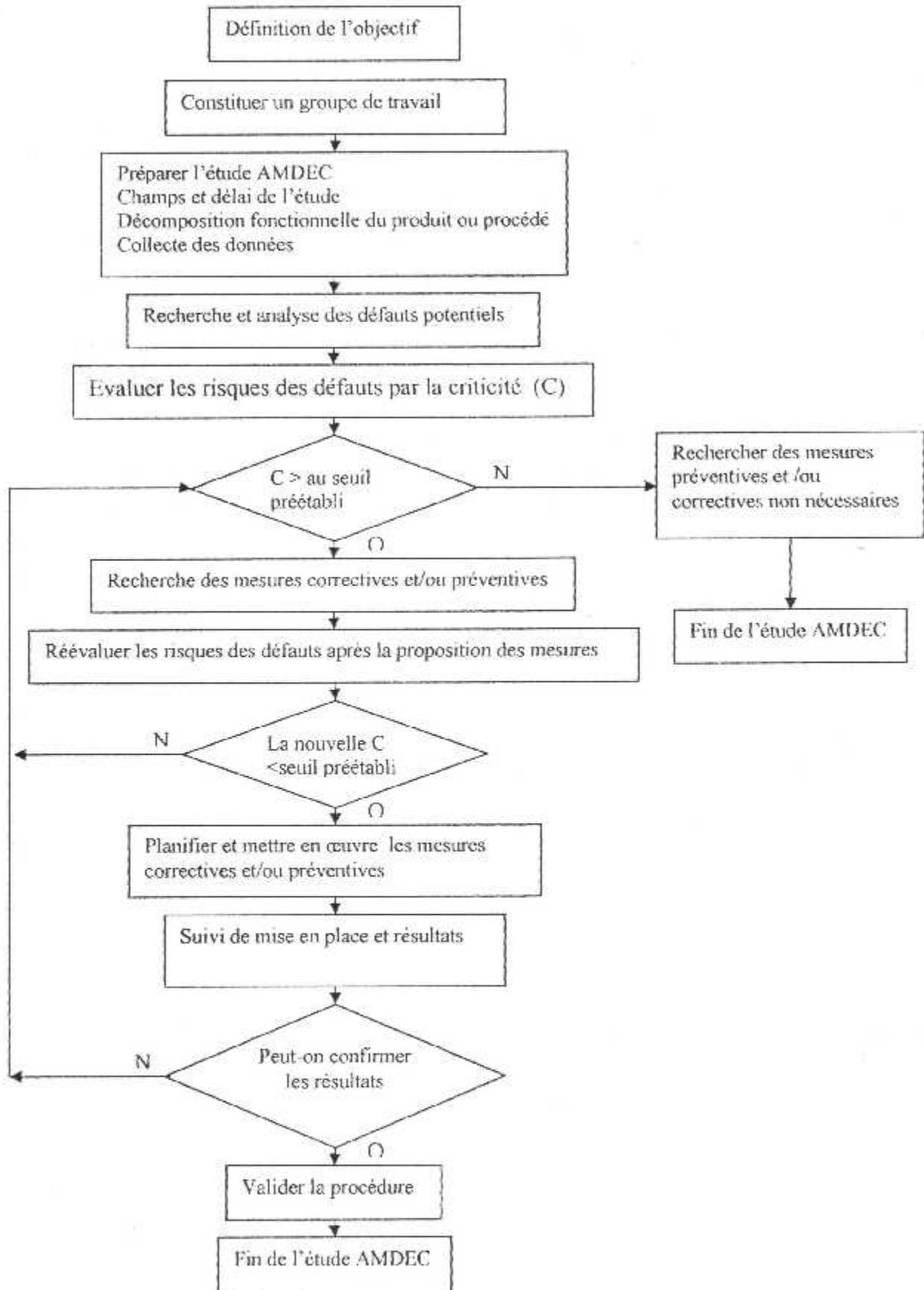


Figure IV.3 : Méthodologie AMDEC

IV.2.2.3. Grilles de cotation

1- Fréquences

Niveau	valeur	définition
très faible	1	défaillance rare : moins de une défaillance par année
faible	2	défaillance possible : moins de une défaillance par trimestre
Moyen	3	défaillance occasionnelle : moins de une défaillance par semaine
Elevé	4	défaillance fréquente : plus de une défaillance par semaine

2- Gravité

Niveau	valeur	définition
Mineure	1	- arrêt de production : moins de 15 minutes - aucune ou peu pièce de rechange nécessaire
moyenne	2	- arrêt de production : de 15 minutes à une heure - pièces en stock
Majeure	3	- arrêt de production : 1 heure à 2 heures - pièces en stock ou livraison ultra-rapide
Grave	4	- arrêt de production : 2 heures et plus - long délai de livraison ou back-order

3- La non détection

Niveau	valeur	définition
Evident	1	détection certaine, sirène, moyens automatiques, signes évidents
Possible	2	déTECTABLE par l'opérateur, par des routes d'inspections, vibrations
improbable	3	difficilement détectable, moyens complexes (démontages, appareils)
impossible	4	indétectable, aucun signes

4- Criticité

Valeurs	définition
1-6	négligeable
8-18	moyenne
24-36	élevée
48-64	interdit

IV.3. Approche du programme de maintenance

IV.3.1 Généralités

Le programme de maintenance MBF est l'ensemble des tâches qui résultent d'une analyse MBF. Les programmes de maintenance sont généralement composés d'un programme initial et d'un programme évolutif, «dynamique», tel que cela est présenté dans la figure (IV.4). Cette figure présente les principaux facteurs à prendre en considération lors de la phase de développement, c'est-à-dire avant l'exploitation, ainsi que les facteurs utilisés pour mettre à jour le programme, basés sur l'expérience en exploitation, une fois que le produit est en service.

Le programme de maintenance initial, qui est souvent le résultat d'une collaboration entre le fournisseur et l'utilisateur, est défini, préalablement à l'exploitation, sur la base d'une méthodologie MBF.

Le programme de maintenance évolutif, qui est un développement du programme initial, est initialisé aussi tôt que possible par l'utilisateur dès le début de l'exploitation et il convient qu'il soit fondé sur les données réelles de dégradation, ou les données concernant les défaillances, ainsi que sur les progrès effectués sur la technologie des matériaux et les données relatives aux techniques et outils de maintenance.

Remarque : Un programme initial de MBF peut être entrepris lorsque le produit est en service pour rénover et continuer à améliorer un programme de maintenance existant qui a été préparé sur la base de l'expérience ou de recommandations du fabricant, sans bénéficier d'une approche structurée telle que l'approche MBF.

Afin d'élaborer un programme de maintenance efficace, il est nécessaire de définir les éléments suivants:

- a) les objectifs d'un programme de maintenance;
- b) la méthode à utiliser pour élaborer un programme de maintenance;
- c) le contenu d'un programme de maintenance.

IV.3. 2. Objectifs du programme de maintenance

En tant que partie d'une philosophie de maintenance, les objectifs d'un programme de maintenance préventive efficace sont les suivants:

- disposer d'une méthode d'élaboration de tâches de maintenance rigoureuse et documentée (C'est l'objectif principale de l'introduction de la MBF) ;
- obtenir des informations nécessaires à l'établissement d'un programme de maintenance évolutif, plus performant que le programme initial, par une évaluation systématique et permanente de l'efficacité et des coûts des tâches de maintenance (Premier but de notre thèse) ;
- structurer le retour d'expérience sur les modes d défaillances (Deuxième but);
- utiliser de façon qualitative et/ou quantitative le retour d'expérience pour déterminer la criticité des défaillances(Troisième but)
- maintenir la fonction du système en termes d'exigences de sécurité (la maintenabilité);
- fournir les justifications pour chaque décision prise ;

- maintenir les niveaux intrinsèques de sécurité et de fiabilité;
 - optimiser la disponibilité;
 - obtenir les informations nécessaires pour améliorer la conception des entités dont la fiabilité intrinsèque s'avère inadéquate;
 - atteindre ces objectifs pour un coût total du cycle de vie minimal, incluant les coûts relatifs à la maintenance ainsi que les coûts relatifs aux défaillances résiduelles.
- Il convient que la surveillance de l'état de composants, critiques pour la sécurité ou coûteux, joue un rôle important dans le développement d'un programme dynamique.

Remarque : Ces objectifs tiennent compte du fait que les programmes de maintenance, en tant que tels, ne peuvent corriger les déficiences des niveaux intrinsèques de sécurité et de fiabilité des équipements et des structures.
 Le programme de maintenance ne peut qu'empêcher la dégradation de tels niveaux intrinsèques et rétablir les niveaux de sécurité et de fiabilité à leurs valeurs intrinsèques. Si les niveaux intrinsèques se révèlent insatisfaisants, une modification de la conception ou des modifications en exploitation ou des changements de procédure peut être nécessaires pour obtenir une amélioration.

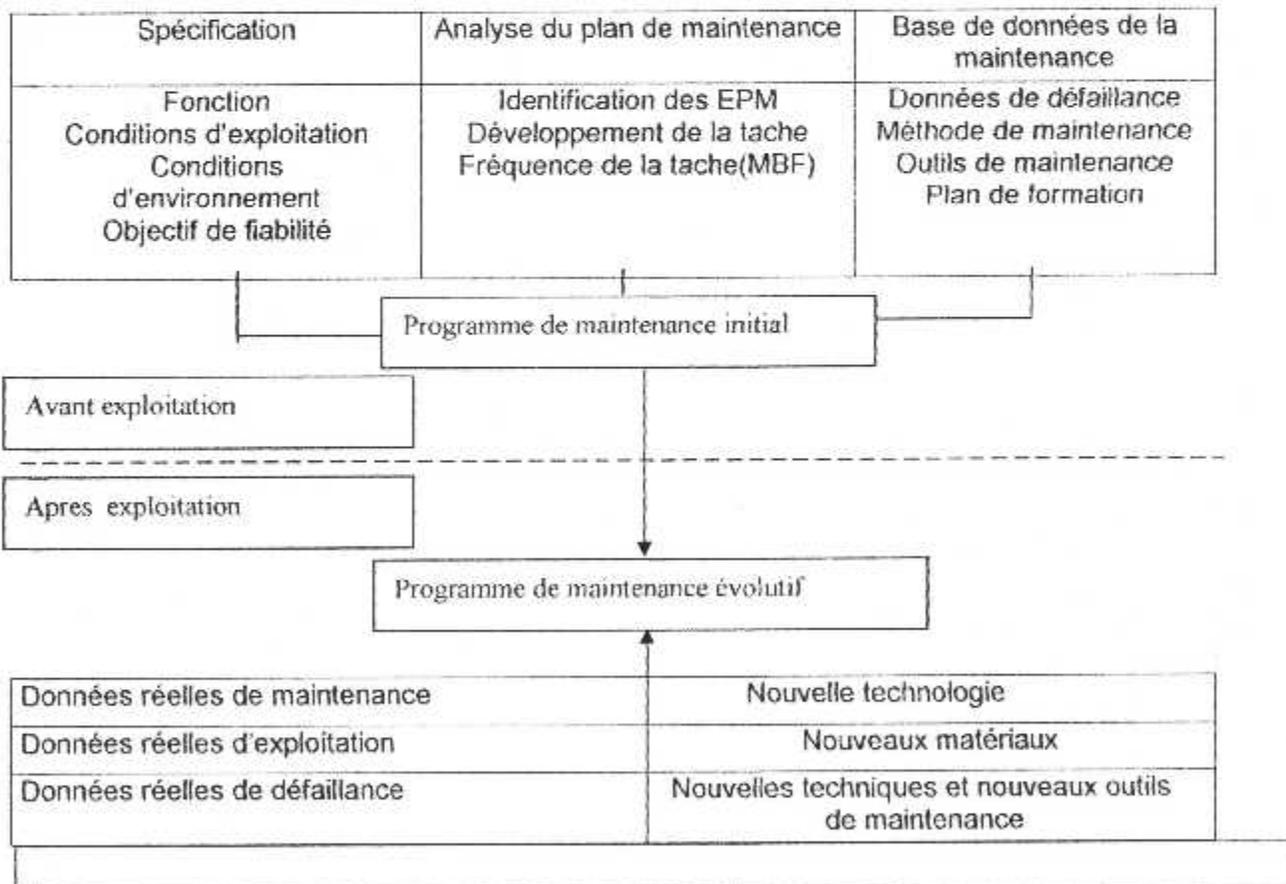


Figure IV.4 : Evolution d'un programme de maintenance dynamique

IV.3.3. Méthode d'élaboration de programmes de maintenance préventive basé sur la MBF

Le programme est élaboré par l'utilisation d'une approche logique guidée et est articulé autour des tâches plutôt qu'autour du processus de maintenance. Cela permet d'éliminer la confusion associée aux différentes interprétations, dans différents secteurs de l'industrie, de termes tels que surveillance conditionnelle, en fonctionnement, retrait de service, etc.

En utilisant un concept articulé autour des tâches, il est possible de considérer l'ensemble du programme de maintenance élaboré pour une entité donnée.

Un arbre logique de décision (figures (IV.6) et (IV.7)) est utilisé pour identifier les tâches de maintenance applicables. L'entretien et le graissage sont inclus en tant que partie du diagramme logique pour assurer qu'une catégorie importante de tâches est considérée chaque fois qu'une entité est analysée.

IV.3.4. Contenu du programme de maintenance

Le contenu du programme de maintenance proprement dit se compose de deux groupes de tâches :

a) Un groupe de tâches de maintenance préventive : y compris les tâches concernant la localisation des défaillances, prévues pour être exécutées à des intervalles spécifiés ou dans certaines conditions. L'objectif de ces tâches est d'identifier et de prévenir la détérioration au-dessous des niveaux intrinsèques de sécurité et de fiabilité, en employant un ou plusieurs des moyens suivants:

- 1) graissage/entretien;
- 2) vérification opérationnelle/visuelle/automatique;
- 3) inspection/essai fonctionnel/surveillance conditionnelle;
- 4) remise en état;
- 5) mise au rebut.

Il s'agit du groupe de tâches défini par l'analyse MBF, c'est-à-dire qu'il comprend le programme de maintenance préventive basé sur la MBF.

b) Un groupe de tâches de maintenance non programmée : qui découlent de ce qui suit:

- 1) conséquences des tâches programmées exécutées à intervalles de temps spécifiés ou selon l'usage;
- 2) les comptes rendus relatifs aux défaillances ou indications de défaillances imminentes (y compris par détection automatique).

L'objectif de ce deuxième groupe de tâches est de conserver ou de rétablir l'équipement dans un état acceptable afin qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu.

Remarque : Un programme efficace est un programme qui planifie uniquement les tâches nécessaires pour atteindre les objectifs prévus. Il ne planifie pas de tâches

supplémentaires susceptibles d'entraîner une augmentation des coûts de maintenance, sans accroître en même temps la protection du niveau intrinsèque de fiabilité. L'expérience a démontré clairement que la fiabilité décroît lorsque l'on accomplit des tâches de maintenance non appropriées ou non nécessaires, en raison de l'incidence croissante de pannes induites par l'opérateur de maintenance.

IV.4. Programme de maintenance préventive basé sur la MBF

IV.4.1. Généralités

Ce paragraphe décrit les tâches (figure (IV.5)) requises pour l'élaboration d'un programme de maintenance préventive basée sur la MBF, applicable aussi bien à des équipements neufs qu'à des équipements en service. Lors de l'élaboration d'un programme MBF, le diagramme logique progressif illustré aux figures (IV.6) et (IV.7), ainsi que les critères de sélection des tâches exposés au tableau 1 sont les principaux outils. Ce diagramme logique progressif constitue la base d'une technique d'évaluation appliquée à chaque élément prépondérant de maintenance (EPM) et utilisant les informations techniques disponibles.

En règle générale, l'évaluation est fondée sur la défaillance fonctionnelle des entités et sur les causes de ces défaillances.

L'élaboration d'un programme MBF est fondée sur les éléments suivants:

- a) identification des éléments prépondérants de maintenance (EPM);
- b) identification des tâches de maintenance préventive applicables et efficaces par utilisation de l'arbre de décision logique.

Un élément prépondérant de maintenance est une entité dont la défaillance pourrait affecter la sécurité dans un contexte particulier en exploitation ou en maintenance, ou encore pourrait avoir un effet important en exploitation, ou un effet économique. Le processus d'identification des EPM est fondé sur les conséquences prévisibles des défaillances en utilisant une approche analytique et un bon jugement d'ingénierie ainsi les données du retour d'expérience.

Le processus d'identification des EPM utilise une approche descendante et est conduit, en premier lieu, au niveau du système, puis au niveau du sous-système et, si opportun, au niveau composant.

Il convient de suivre un processus itératif pour identifier les EPM. Les limites et les fonctions des systèmes et des sous-systèmes sont identifiées en premier lieu. Cela permet de déterminer les systèmes critiques en vue d'une analyse plus approfondie, ce qui implique une définition du système, de ses fonctions et de ses défaillances fonctionnelles plus complète et plus détaillée.

La procédure ci-dessous décrit un ensemble complet de tâches du processus d'identification des EPM. Il convient que toutes ces tâches soient appliquées dans le cas d'équipements complexes ou nouveaux.

Cependant, dans le cas d'équipements bien connus ou simples, dont les fonctions et les dégradations/défaillances fonctionnelles sont bien établies, les tâches figurant sous le titre «analyse du système» peuvent être accomplies très rapidement. Il convient

toutefois que ces tâches soient accompagnées des pièces justificatives de leurs prises en considération.

La profondeur et la rigueur utilisées lors de l'application de ces tâches varient également avec la complexité et la nouveauté de l'équipement. La description détaillée des tâches applicables est donnée de 1.1 à 1.3.

IV.4.1.1. Recueil des informations

L'information sur l'équipement fournit la base de l'évaluation et il convient de la réunir avant le début de l'analyse, et de la compléter lorsque le besoin s'en fait sentir. Il convient qu'elle comprenne :

- a) les exigences applicables à l'équipement et à ses systèmes associés, y compris les exigences réglementaires;
- b) les documentations de conception et de maintenance;
- c) le retour d'expérience, y compris les données relatives à la maintenance et aux défaillances.

Enfin, dans le but de garantir l'exhaustivité et d'éviter les recouvrements, il convient que l'évaluation soit fondée sur une décomposition appropriée et logique de l'équipement.

IV.4.1.2. Analyse du système

IV.4.1.2.1. Généralités

Les tâches décrites en 5.1.2 définissent la procédure d'identification des éléments prépondérants de maintenance ainsi que le choix et la mise en oeuvre des tâches de maintenance qui s'y rapportent. Il convient de noter que ces tâches peuvent être adaptées pour remplir les exigences d'industries particulières et que l'importance donnée à chaque tâche dépend de la nature de cette industrie.

V.4.1.2.2. Identification des systèmes

L'objectif de cette tâche est de diviser l'équipement en systèmes, par regroupement des éléments qui contribuent à la réalisation de fonctions bien identifiées et par l'identification des limites du système. Quelquefois, il est nécessaire de poursuivre la division en sous-systèmes qui effectuent des fonctions critiques vis-à-vis de la performance du système. Les limites du système ne sont pas réduites aux limites physiques des sous-systèmes, puisqu'il peut exister des recouvrements.

Fréquemment, l'équipement est déjà divisé en systèmes selon des schémas de répartition spécifiques à chaque industrie. Il convient que ce partitionnement soit revu et ajusté pour s'assurer qu'il est organisé fonctionnellement.

Le résultat de cette division de l'équipement soit référencé dans un index général du système qui identifie les systèmes, les éléments et les limites.

IV.4.1.2.3. Identification des fonctions du système

L'objectif de cette tâche est de déterminer les fonctions principales et auxiliaires accomplies par les systèmes et les sous-systèmes. L'utilisation de diagrammes fonctionnels apporte une aide à l'identification des fonctions du système.

La définition de chaque fonction décrit les actions ou exigences qu'il convient que le système ou le sous-système accomplisse ou remplisse, quelquefois en termes d'aptitude à la fonction dans les limites spécifiées. Il convient que les fonctions soient identifiées dans tous les modes d'exploitation.

Les fonctions principales et auxiliaires peuvent être déterminées en réexaminant les spécifications de conception, les descriptions de la conception et les procédures d'exploitation, y compris les instructions relatives à la sécurité, à l'exploitation anormale et les instructions en cas d'urgence. Les fonctions telles que les essais ou la préparation à la maintenance peuvent être omises si elles ne sont pas considérées comme importantes. La raison de ces omissions doit être fournie.

Le résultat de cette tâche est une liste des fonctions du système.

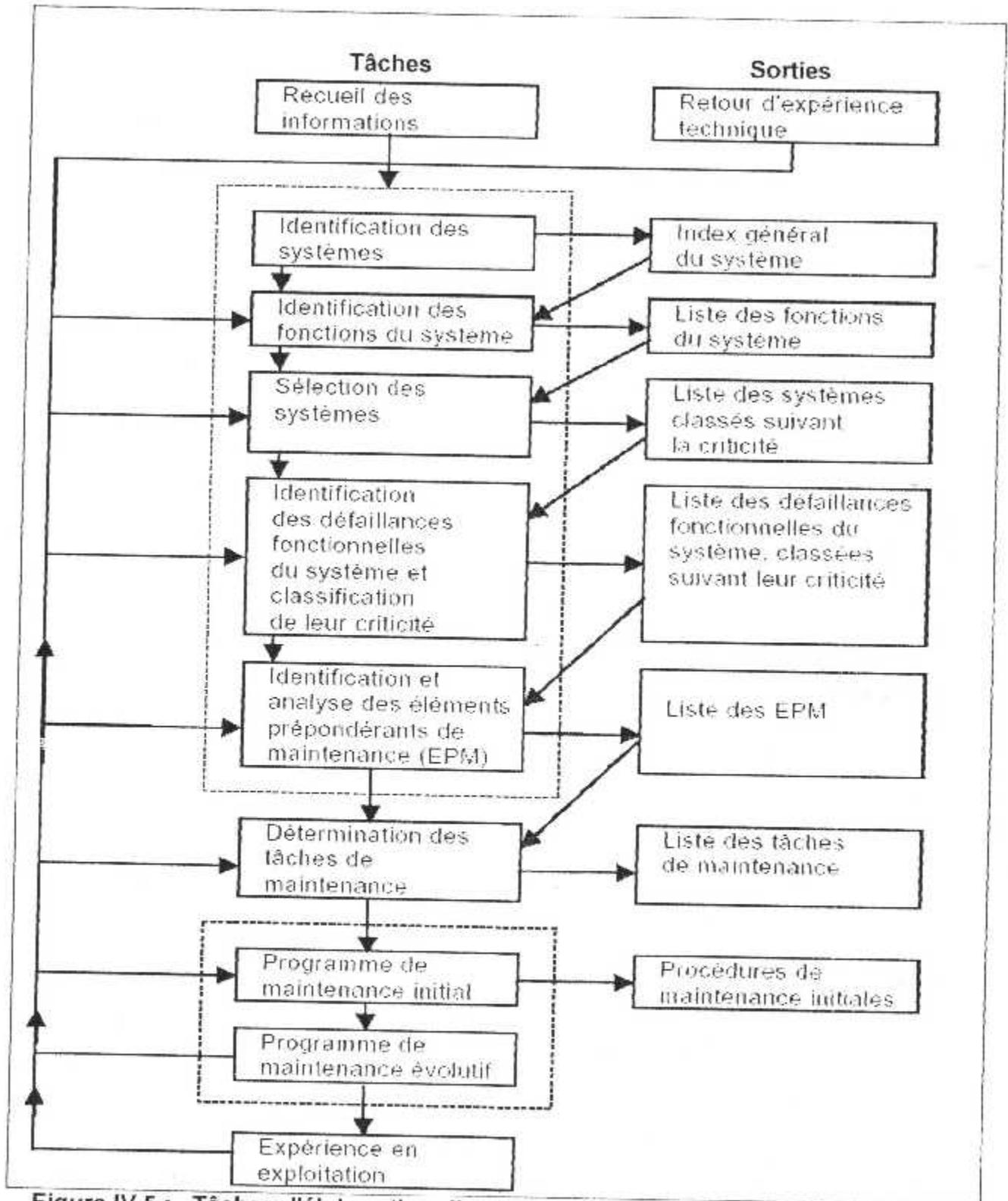


Figure IV.5 : Tâches d'élaboration d'un programme de maintenance basé sur la MBF

IV.4.1.2.4. Sélection des systèmes

L'objectif de cette tâche est de sélectionner et de hiérarchiser les systèmes, qui doivent être inclus dans le programme MBF en raison de leur importance pour la sécurité de l'équipement, pour sa disponibilité ou pour les aspects économiques.

Parmi les méthodes utilisées pour sélectionner ces systèmes et les hiérarchiser, on peut distinguer

- a) les méthodes qualitatives fondées sur l'historique et un jugement d'ingénierie collectif;
- b) les méthodes quantitatives, fondées sur des critères quantitatifs tels qu'une évaluation de la criticité, des facteurs de sécurité, la probabilité de défaillance, le taux de défaillance, le coût du cycle de vie, etc. utilisées pour évaluer l'importance de la dégradation/défaillance du système sur la sécurité de l'équipement, les performances et les coûts. La mise en œuvre de cette approche est facilitée lorsque des modèles et des bases de données appropriés existent;
- c) les méthodes qui sont une combinaison de méthodes quantitatives et qualitatives.

Le résultat de cette tâche est la liste ordonnée des systèmes suivant leur criticité. Il convient que les systèmes, ainsi que les procédures, les critères utilisés et les résultats soient accompagnés de leurs pièces justificatives.

IV.4.1.2.5. Identification des défaillances fonctionnelles du système et classification de leur criticité

L'objectif de cette tâche est d'identifier les dégradations/défaillances fonctionnelles du système et de les classer. Il convient que les dégradations/défaillances fonctionnelles d'un système soient identifiées pour chaque fonction, classées selon leur criticité et documentées. Puisque chaque défaillance fonctionnelle du système peut avoir différents effets sur la sécurité, la disponibilité ou le coût de maintenance, il est nécessaire de les classer et de leur donner une priorité. La classification prend en compte la probabilité d'occurrence et les conséquences d'une défaillance. Les méthodes qualitatives fondées sur un jugement d'ingénierie collectif et fondées sur l'analyse de l'expérience en exploitation peuvent être utilisées. Il est également possible d'utiliser les méthodes quantitatives telles que l'AMDE ou l'analyse de risque (voir chapitre III). Cette classification correspond à l'une des tâches les plus importantes de l'analyse MBF. Une classification trop conservatrice peut conduire à un programme de maintenance préventive excessif et, inversement, une sous-estimation lors de cette classification peut entraîner des défaillances trop nombreuses et un effet potentiel sur la sécurité. Dans les deux cas, il en résulte un programme de maintenance non optimisé.

Les résultats de cette tâche sont

- a) une liste des dégradations/défaillances fonctionnelles du système, avec leurs caractéristiques;
- b) une classification des dégradations/défaillances fonctionnelles du système.

IV.4.1.3. Identification des éléments prépondérants de maintenance (EPM)

En se fondant sur l'identification des fonctions du système, des dégradations/défaillances fonctionnelles et leurs effets, ainsi que sur le jugement d'ingénierie collectif, il est maintenant possible d'élaborer une liste de candidats EPM. Rappelons, une fois de plus, que ces entités sont celles dont les défaillances pourraient :

- affecter la sécurité;
- être indétectables en fonctionnement normal;
- avoir un impact en exploitation important;
- avoir un impact économique important.

Le résultat de cette tâche est une liste de candidats EPM.

IV.4.2. Analyse des défaillances des éléments prépondérants de maintenance

Lorsqu'une nomenclature EPM a été établie, il convient d'utiliser une méthode telle qu'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) (voir chapitre III) pour identifier les informations suivantes, nécessaires à l'évaluation de chaque EPM par la méthode de l'arbre logique :

- a) **fonction**: les actions caractéristiques normales de l'élément;
- b) **défaillance fonctionnelle**: comment un élément ne parvient plus à remplir sa fonction;
- c) **cause de la défaillance**: la raison pour laquelle le mode de défaillance fonctionnelle se produit;
- d) **effet de la défaillance**: effet immédiat et sa conséquence la plus étendue pour chaque défaillance fonctionnelle.

L'analyse des défaillances des EPM est destinée à identifier les défaillances fonctionnelles ainsi que les causes de défaillance. Il convient de noter les défaillances qui ne sont pas considérées comme crédibles, telles que celles résultant exclusivement de vices de fabrication, les mécanismes de défaillances improbables ou les événements externes improbables, afin de mettre en évidence qu'elles ont été prises en considération; par ailleurs, il convient de spécifier les facteurs qui ont conduit à estimer ces défaillances comme non crédibles.

Avant d'appliquer l'analyse par arbre logique de décision à chaque EPM, il est d'abord nécessaire de remplir des fiches de travail qui définissent clairement l'entité EPM, ses fonctions, ses défaillances fonctionnelles, ses causes de défaillance, les effets de ses défaillances ainsi que tout renseignement pertinent se rapportant à l'entité (par exemple la référence du fabricant, une description succincte de l'entité, le taux de défaillance prévu ou mesuré, les fonctions cachées, la redondance, etc.). Il convient que ces fiches de travail soient conçues de manière à satisfaire aux exigences des utilisateurs. (L'annexe B comporte des exemples typiques des fiches de travail). A partir de cette analyse, les EPM critiques (c'est-à-dire ceux qui ont à la fois des effets fonctionnels significatifs et une forte probabilité de défaillance, ou qui ont une probabilité moyenne

de défaillance mais sont jugées critiques, ou qui font l'objet d'un volume important de maintenance corrective) peuvent être identifiés.

IV.4.3. Détermination des tâches de maintenance (analyse par arbre logique de décision)

IV.4.3.1. Généralités

L'approche utilisée afin d'identifier les tâches de maintenance préventive applicables et efficaces fournit un cheminement logique pour prendre en compte chaque défaillance fonctionnelle de l'EPM. L'arbre logique de décision (figures (4.3) et (4.4)) utilise un groupe de questions séquentielles «OUI/NON» afin de classer ou caractériser chaque défaillance fonctionnelle. Les réponses aux questions «OUI/NON» déterminent la direction dans l'organigramme d'analyse et aident à déterminer les conséquences de la défaillance fonctionnelle de l'EPM qui peuvent être différentes pour chaque cause de défaillance. Une analyse plus poussée permet de déterminer s'il existe une tâche de maintenance applicable et efficace, qui permettrait d'empêcher ou d'atténuer ces conséquences. Les tâches résultantes et les intervalles associés constitueront le programme initial de maintenance programmée.

IV.4.3.2. Niveaux d'analyse

Deux niveaux sont mis en évidence dans la logique de décision.

- a) Le premier niveau (questions 1, 2, 3 et 4) nécessite une évaluation de chaque dégradation/défaillance fonctionnelle afin de définir la catégorie de leur conséquence: effet évident sur la sécurité, effet évident sur l'exploitation, effet évident sur le coût direct, effet d'une panne cachée sur la sécurité ou effet d'une panne cachée n'affectant pas la sécurité, ou aucun effet.
- b) Le second niveau (questions 5, 6, 7, 8 et 9, A jusqu'à F, selon le cas applicable) prend en compte les causes de dégradation/défaillance pour chaque défaillance fonctionnelle, de manière à sélectionner le type de tâche spécifique.

IV.4.3.3. Analyse de premier niveau (détermination des effets)

La conséquence d'une défaillance (qui peut éventuellement inclure les dégradations) est évaluée au premier niveau en utilisant quatre questions fondamentales (figure (4.3)).

Remarque : Il convient de ne pas entreprendre l'analyse de premier niveau tant que la compréhension complète et totale des défaillances fonctionnelles spécifiques n'a pas été établie.

Question 1 - Défaillance fonctionnelle évidente ou cachée ?

Le but de cette question est de séparer les défaillances fonctionnelles évidentes de celles qui sont cachées et il convient qu'elle soit posée pour chaque défaillance fonctionnelle.

Question 2 – Effet défavorable direct sur la sécurité en exploitation ?

Pour être directe, il convient que la défaillance fonctionnelle ou le dommage qui en résulte aient un effet par eux-mêmes et non par combinaison avec d'autres défaillances fonctionnelles. Un effet défavorable sur la sécurité en exploitation signifie des dommages ou la perte de l'équipement, un préjudice humain ou la mort d'homme ou qu'une combinaison de ces événements est une conséquence de la défaillance ou du dommage qui en résulte.

Question 3 – Effet sur la sécurité de défaillances fonctionnelles cachées ?

Ce point précis prend en compte des défaillances pour lesquelles la perte d'une fonction cachée (dont la défaillance est inconnue de l'équipe d'exploitation) n'affecte pas par elle-même la sécurité mais qui cependant combinée à une défaillance fonctionnelle supplémentaire entraîne un effet défavorable sur la sécurité opérationnelle.

Remarque : Le personnel d'exploitation comprend toutes les équipes qualifiées, en service, qui sont directement impliquées dans l'utilisation de l'équipement.

Question 4 – Effet défavorable direct sur l'aptitude à l'exploitation ?

Ce point pose la question de savoir si la défaillance fonctionnelle peut avoir un effet néfaste sur l'aptitude à l'exploitation:

- a) en nécessitant soit l'application de restrictions opérationnelles, soit une remise en état avant de poursuivre l'exploitation; ou
- b) en demandant à l'équipe d'exploitation d'utiliser des procédures incidentelles ou d'urgence.

IV.4.3.4. Second niveau d'analyse (catégories d'effets)

L'application de la logique de décision des questions du premier niveau à chaque défaillance fonctionnelle conduit vers une catégorie d'effets appartenant à un groupe de cinq catégories décrites ci-dessous:

– Effets évidents sur la sécurité – Questions 5A à 5E

Il convient que cette catégorie soit abordée en admettant qu'une ou des tâches sont nécessaires pour assurer la sécurité de l'exploitation. Toutes les questions appartenant à cette catégorie doivent être posées. Si cette analyse montre qu'il n'existe aucune action applicable et efficace, il faut obligatoirement procéder à une redéfinition de la conception.

– Effets évidents en exploitation – Questions 6A à 6D

Une tâche est souhaitable si elle réduit le risque de défaillance à un niveau acceptable.

Si au sein du processus logique toutes les réponses sont «NON», aucune tâche de maintenance préventive n'est créée. Si les pénalités en exploitation sont importantes, une redéfinition de la conception est souhaitable.

– Effets évidents sur les coûts directs – Questions 7A à 7D

Une tâche est souhaitable à condition que le coût de la tâche soit inférieur au coût de la réparation. Si, dans le processus logique, toutes les réponses sont «NON», aucune tâche de maintenance préventive n'est créée. Si les pénalités économiques sont importantes, une redéfinition de la conception peut être souhaitable.

– Effets des fonctions cachées sur la sécurité – Questions 8A à 8F

Les effets d'une fonction cachée sur la sécurité nécessitent une tâche destinée à assurer la disponibilité nécessaire pour supprimer l'effet de défaillances multiples sur la sécurité. Il convient que toutes les questions soient posées. S'il n'existe pas de tâche efficace, alors une redéfinition de la conception est obligatoire.

– Effets des fonctions cachées n'affectant pas la sécurité – Questions 9A à 9E

Cette catégorie montre qu'une tâche peut être souhaitable pour assurer la disponibilité nécessaire pour éviter les effets sur les coûts directs résultant de défaillances multiples. Si, au sein du processus logique, toutes les réponses sont «NON», aucune tâche de maintenance préventive n'est créée. Si les pénalités économiques sont fortes, une reprise de la conception est souhaitable.

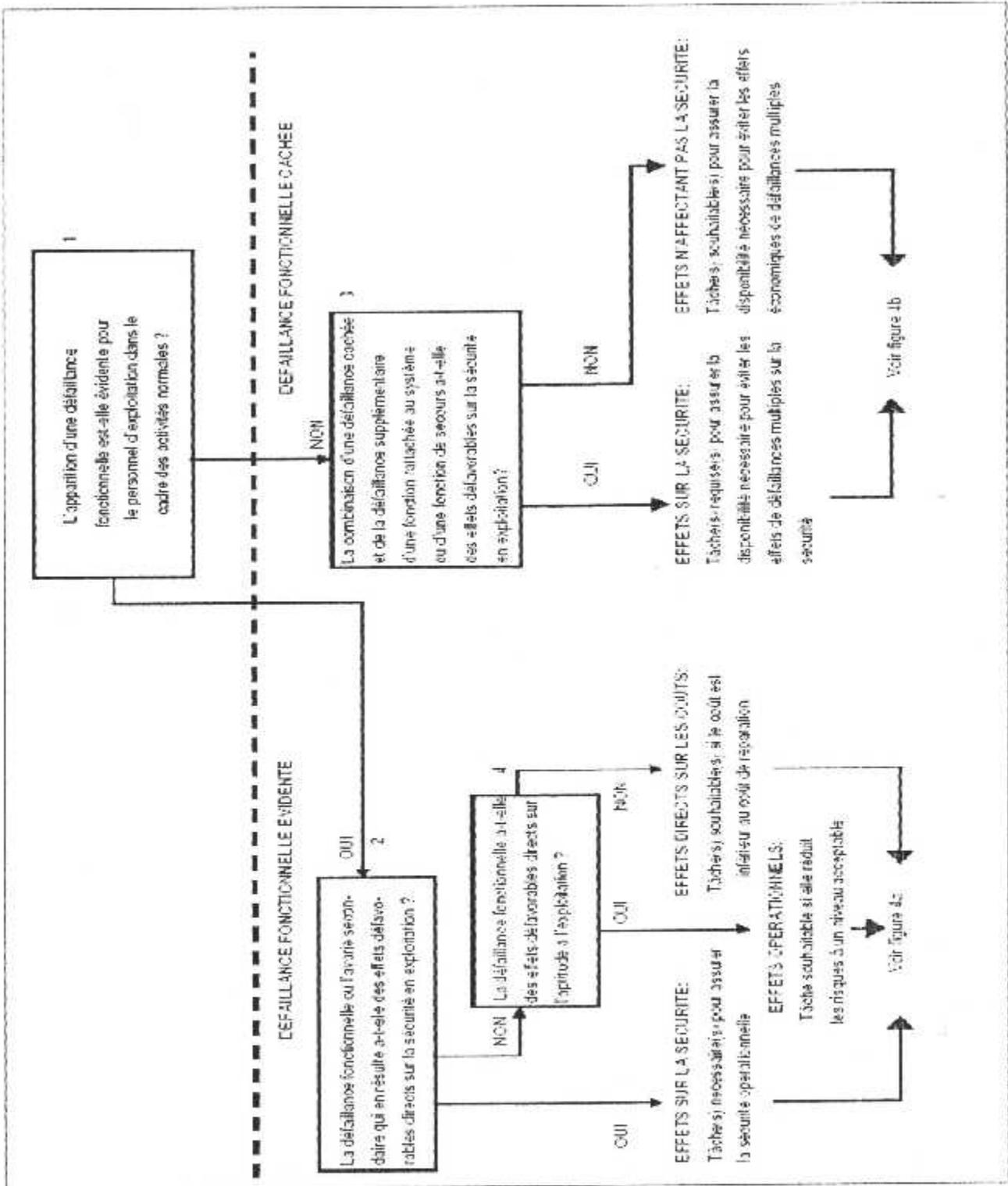


Figure IV.6 : Arbre de décision logique MBF-Niveau1-Effets de défaillances fonctionnelles

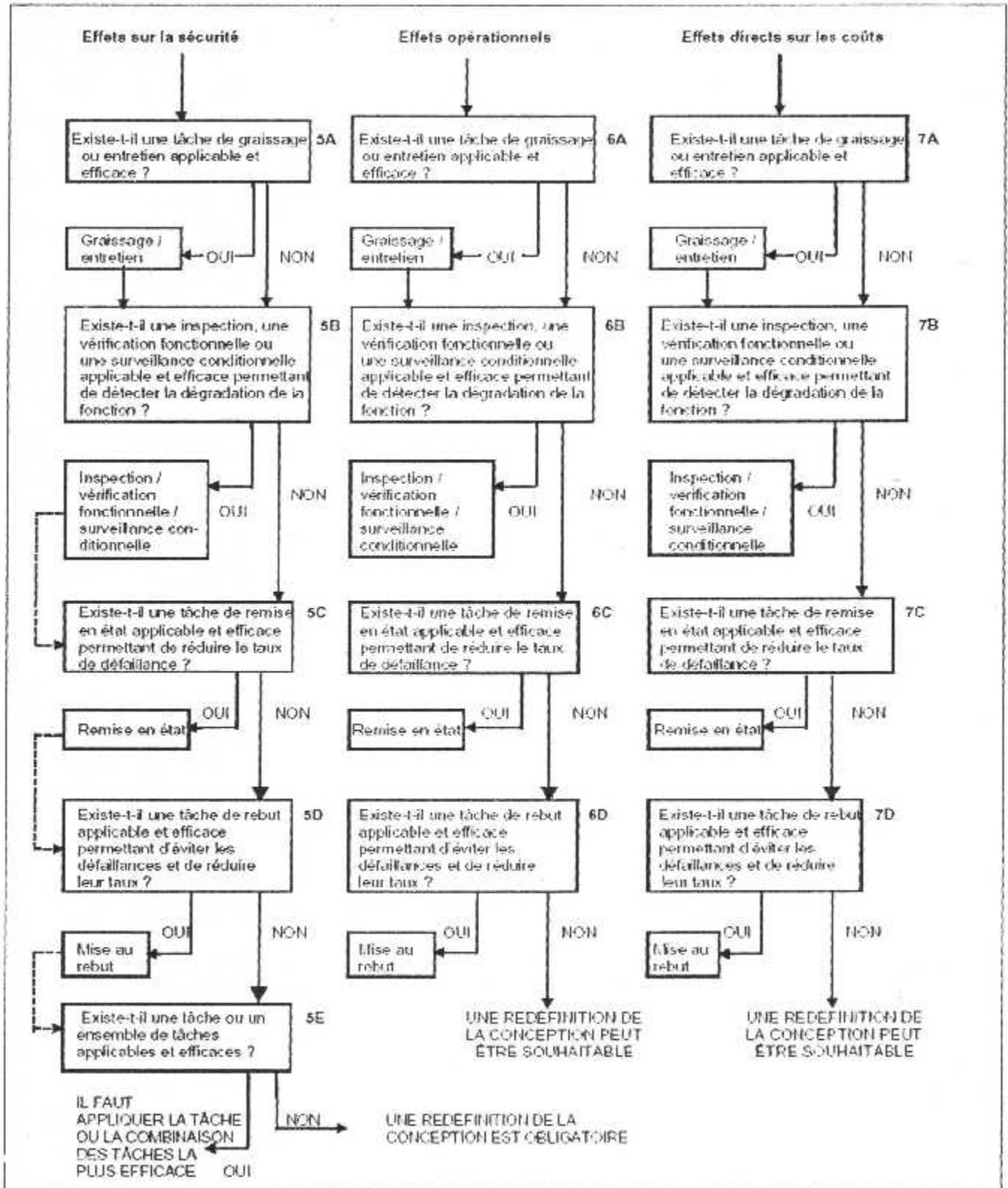


Figure IV.6a : Arbre de décision logique MBF-Niveau2- catégories d'effets et détermination des tâches

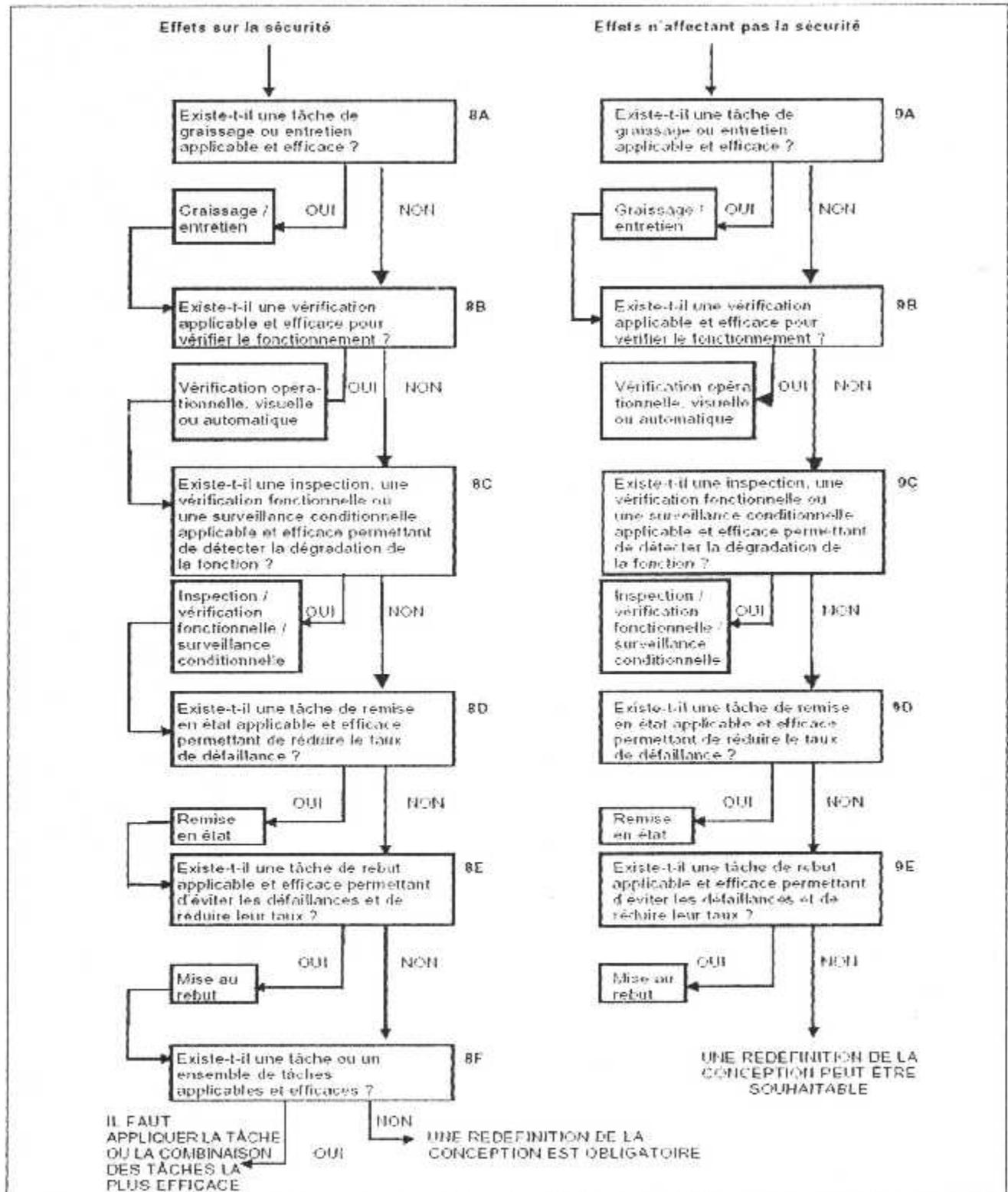


Figure IV.6b: Arbre de décision logique MBF-Niveau2- catégories d'effets et détermination des tâches

IV.4.3.5. Détermination des tâches

IV.4.3.5.1. Généralités

La détermination des tâches est conduite de façon similaire pour chacune des cinq catégories d'effets. Il est nécessaire, pour la détermination des tâches, d'appliquer les causes des défaillances fonctionnelles au second niveau de l'organigramme logique. Il a été identifié sept questions relatives aux catégories d'effets qui débouchent sur des tâches, bien que des tâches supplémentaires, des tâches modifiées ou qu'une modification de la définition d'une tâche puissent être justifiées, en fonction des besoins de chaque industrie.

IV.4.3.5.2. Cheminement en parallèle et logique des défauts

Le cheminement en parallèle et la logique des défauts jouent un rôle essentiel au niveau 2.

Indépendamment de la réponse à la première question concernant la rubrique «Graissage/Entretien», il convient que la question suivante relative à la sélection des tâches soit posée dans tous les cas. Lorsque l'on suit le cheminement concernant les effets des défauts évidents ou cachés sur la sécurité, il convient que toutes les questions suivantes soient posées. Pour les catégories restantes, une réponse par «OUI» à la première question permettra de quitter la structure logique. (L'utilisateur peut, s'il le souhaite, poser les questions suivantes après une réponse par «OUI», si cela est autorisé, mais à la condition expresse que le coût de la tâche soit égal au coût de la défaillance évitée).

– Logique des défauts

La logique des défauts se traduit, pour les cheminements situés en dehors des domaines ayant des effets sur la sécurité, par l'agencement de la logique de sélection des tâches. En l'absence d'informations adéquates permettant de répondre par «OUI» ou par «NON» à des questions situées dans le second niveau, la logique des défauts veut que la réponse soit «NON» et que les questions suivantes soient posées. Au fur et à mesure que des réponses «NON» sont données, le seul choix disponible réside dans la question suivante, qui prévoit, dans la plupart des cas, un cheminement plus prudent, plus rigoureux et/ou plus coûteux.

– Nouvelle conception

Une nouvelle conception est obligatoire pour des défaillances qui tombent dans la catégorie des «effets sur la sécurité» (évidents ou cachés) et pour lesquels il n'existe aucune tâche applicable et efficace.

IV.4.3.5.3. Tâches de maintenance

Les explications relatives aux termes utilisés dans les tâches de maintenance possibles sont données ci-dessous:

a) Graissage/entretien (toutes les catégories)

Cette tâche comprend toute opération de graissage ou d'entretien effectuée dans le but de préserver les aptitudes intrinsèques de la conception.

b) Vérification opérationnelle/visuelle/automatique (uniquement pour la catégorie de défaillances fonctionnelles cachées)

Une vérification opérationnelle est une tâche dont le but est de s'assurer qu'un élément remplit la fonction pour laquelle il a été prévu. Les vérifications quantitatives ne sont pas exigées, mais il s'agit d'une tâche de détection de défaillances. Une vérification visuelle est une observation servant à déterminer si l'élément remplit la fonction pour laquelle il a été conçu. Les tolérances quantitatives ne sont pas exigées, mais il s'agit également d'une tâche de détection de pannes. La vérification visuelle peut également comprendre la consultation de dispositifs électroniques qui enregistrent les données relatives aux défaillances.

c) Inspection/vérification fonctionnelle/surveillance conditionnelle (toutes catégories)

Une inspection est un examen de l'élément par rapport à un standard donné. Une vérification fonctionnelle est une vérification quantitative effectuée dans le but de déterminer si une ou plusieurs fonctions d'un élément se trouvent à l'intérieur des limites spécifiées. Une surveillance conditionnelle est une tâche, effectuée de façon permanente ou périodique, qui consiste à surveiller l'état d'un élément en fonctionnement, par rapport à des paramètres prédéfinis.

d) Remise en état (toutes les catégories)

Une remise en état consiste à exécuter les travaux nécessaires pour ramener l'élément à un standard donné. Puisque la remise en état peut aller du simple nettoyage ou remplacement d'une pièce unique, jusqu'à une révision générale complète, il est nécessaire de spécifier le contenu de chaque tâche de remise en état.

e) Mise au rebut (toutes les catégories)

Une mise au rebut consiste à retirer du service un élément, lorsque sa limite spécifiée de durée de vie est atteinte. Les tâches de mise au rebut s'appliquent généralement à des pièces dites consommables ou «d'un seul bloc» tels que des cartouches, des boîtes métalliques, des vérins, des disques de turbines, des éléments structuraux à durée de vie sûre, etc.

f) Combinaison (catégories affectant la sécurité)

Etant donné que la question concerne une catégorie de pannes liées à la sécurité, il convient que toutes les solutions possibles soient examinées. Pour cela, il est nécessaire de se livrer à un examen des tâches applicables. Il convient de choisir, à partir de cet examen, les tâches les plus efficaces.

g) Pas de tâche (toutes catégories)

En fonction des conséquences possibles, il peut être décidé qu'aucune tâche n'est spécifiée dans certaines situations.

La mise en oeuvre de chacune des tâches possibles définies ci-dessus repose sur ses propres critères d'applicabilité et d'efficacité.

Le tableau 1 résume ces critères de sélection des tâches.

Tableau 1 : Critères de sélection des tâches

TÂCHE	CRITÈRE D'APPLICABILITÉ	CRITÈRE D'EFFICACITÉ		
		SÉCURITÉ	OPÉRATIONNEL	ÉCONOMIE
GRAISSAGE OU ENTRETIEN	Le remplissage de produit consommable doit réduire la cadence d'évolution de la détérioration.	La tâche doit réduire le risque de défaillance.	La tâche doit réduire le risque de défaillance à un niveau acceptable.	La tâche doit être économiquement rentable.
VÉRIFICATION OPÉRATIONNELLE VISUELLE OU AUTOMATIQUE	L'identification de la défaillance doit être possible.	La tâche doit assurer une disponibilité suffisante de la fonction cachée pour réduire le risque de défaillance multiple.	Sans objet.	La tâche doit assurer une disponibilité suffisante de la fonction cachée pour éviter les effets économiques des défaillances multiples et avoir un rapport efficacité/ coût favorable.
INSPECTION OU VÉRIFICATION FONCTIONNELLE OU SURVEILLANCE CONDITIONNELLE	La réduction de la résistance à la défaillance doit être décelable et le taux d'évolution de cette réduction doit être prévisible.	La tâche doit réduire le risque de défaillance afin d'assurer la sécurité du fonctionnement.	La tâche doit réduire le risque de défaillance à un niveau acceptable.	La tâche doit présenter un rapport efficacité/coût intéressant; cela veut dire que son coût doit être inférieur à celui de la défaillance évitée.
REMISE EN ÉTAT	L'âge auquel l'élément manifeste des caractéristiques de dégradation fonctionnelle doit être connu et un grand pourcentage de ces éléments doit survivre à cet âge. Il doit pouvoir être possible de ramener l'article à un standard donné de résistance à la défaillance.	La tâche doit réduire le risque de défaillance afin d'assurer la sécurité du fonctionnement.	La tâche doit réduire le risque de défaillance à un niveau acceptable.	La tâche doit présenter un rapport efficacité/coût intéressant; cela veut dire que son coût doit être inférieur à celui de la défaillance évitée.
MISE AU REBUT	L'âge auquel l'élément manifeste des caractéristiques de dégradation fonctionnelle doit être connu et un grand pourcentage de ces éléments doit survivre à cet âge.	Une limite de durée de vie sûre doit réduire le risque de défaillance afin d'assurer la sécurité du fonctionnement.	La tâche doit réduire le risque de défaillance à un niveau acceptable.	Une limite de durée de vie économique doit présenter un rapport efficacité/ coût intéressant; cela veut dire que son coût doit être inférieur aux coûts des défaillances qu'elle permet d'éviter.

III.4.3.6 Fréquences/périodicités des tâches

De manière à fixer la périodicité des tâches, il est nécessaire de déterminer s'il existe des données de retour d'expérience applicables qui suggèrent une périodicité efficace pour l'exécution des tâches. L'information appropriée peut consister en un (ou plusieurs) des éléments suivants:

- a) expérience préalablement acquise sur d'autres systèmes et démontrant qu'une tâche de maintenance programmée a apporté une preuve suffisante de son efficacité, de sa faisabilité et de son intérêt économique;
- b) des résultats d'essais en provenance du fabricant/constructeur, indiquant qu'une tâche de maintenance programmée sera applicable et efficace pour l'élément concerné;
- c) des données de fiabilité et des prévisions de fiabilité.

Lors de la définition des périodicités de maintenance, il est nécessaire de prendre en considération les aspects de sécurité et de coût. Il convient que les inspections programmées et les périodicités de remplacement coïncident chaque fois que cela est possible et il convient que les tâches soient regroupées pour en réduire l'effet sur l'exploitation.

Les périodicités de remplacement liées à la sécurité peuvent être établies à partir de la fonction de répartition des défaillances de l'entité en choisissant une périodicité de remplacement qui implique une très faible probabilité de défaillance avant les interventions de remplacement. Lorsqu'une défaillance ne provoque pas de danger impliquant la sécurité, mais seulement une perte de la disponibilité, la périodicité de remplacement est établie selon un processus d'analyse de compromis entre le coût du remplacement de l'élément, le coût de la défaillance et l'exigence de disponibilité de l'équipement.

Il existe des modèles mathématiques pour déterminer la fréquence et la périodicité des tâches, mais ces modèles dépendent de la disponibilité de l'information appropriée. Ces informations sont spécifiques des industries particulières et il convient que ces normes industrielles et les relevés de données correspondantes soient consultés de manière appropriée.

Si les données de fiabilité sont insuffisantes, ou qu'il n'y a pas de connaissance préalable relative à un équipement similaire, ou si la similarité est insuffisante entre l'ancien et le nouveau système, la périodicité des tâches peut seulement être établie initialement par du personnel qualifié ayant un bon jugement et une bonne expérience en exploitation joints aux meilleures données d'exploitation disponibles et aux données économiques adéquates.

CHAPITRE V

APPLICATION

V.1. Introduction

Après avoir présenté dans les chapitres précédents la méthodologie de la MBF et les outils indispensables à leur mise en place, nous allons essayer d'appliquer cette méthode pour le turbofan de GE CF6-80 A3.

Or le programme de maintenance (initial) de ce réacteur est développé selon la norme MSG-3 (la démarche MBF) sans bénéficier des données réelles de dégradations ou de défaillances. Pour cette raison, notre application consiste à fournir les informations nécessaires pour l'amélioration du programme initial (optimiser le programme de maintenance initial). Autrement dit utiliser le retour d'expérience pour améliorer le programme de maintenance initial.

Les objectifs de cette application sont :

- 1-Obtenir des informations nécessaires à l'établissement d'un programme de maintenance évolutif, plus performant que le programme initial.
- 2-Structurer le retour d'expérience sur les modes de défaillances.
- 3-Utiliser de façon qualitative et/ou quantitative le retour d'expérience pour déterminer la criticité des défaillances.

La démarche utilisée repose sur cinq tâches principales en respectant la procédure MBF:

- 1- *Collecte de la documentation (Recueil des informations);*
- 2- *Analyse du système ;*
- 3- *Analyse du retour d'expérience ;*
- 4- *Analyse des défaillances des matériels critiques ;*
- 5- *Sélection des tâches de maintenance.*

Remarque :

Avant d'entreprendre cette analyse, il est indispensable d'avoir défini les niveaux de décomposition matérielle et fonctionnelle et les niveaux de maintenance de ce turbofan.

En effet, il ne sert à rien de collecter des données de retour d'expérience sur une pièce sur laquelle l'organisation de maintenance sur site n'effectuera aucune action de maintenance préventive et sera confiée à un sous-traitant. Pour cette raison notre étude s'arrête au deuxième niveau de décomposition.

-1^{er} niveau représente les modules ;

-2^{ème} niveau représente les sous modules.

V.2. Collecte de la documentation (Recueil des informations)

V.2.1. Les exigences applicables au réacteur :

-Les exigences des autorités réglementant le transport aérien FAR25/JAR25 (règlements de certification).

-Les informations nécessaires à l'entretien citées dans les manuels plus le programme d'entretien initial.

V.2.2. Les documents de conception et de maintenance :

- Toute la documentation technique disponibles sur site (AMM, EM, IPC,...) ;
- Ouvrages spécialisés et études réalisées sur le sujet....

V.2.3. Les données du retour d'expérience :

Basé sur les documents (données) disponibles au sein du service turboréacteurs GE/CFMI département de propulsion sous direction engineering, H400 et service fiabilité à la direction technique d'AIR ALGERIE :

- Fiches avion (Chapitre ATA 72 = ENGINE).
- Historique des pannes des moteurs.
- Les rapports de fiabilité.
- Les rapports des sous-traitants.
- Les SB (Service bulletin).

V.3. Analyse du système

V.3.1. Description générale du CF6-80-A3

Le CF6-80-A3 (Figure V.1) est un moteur double corps double flux, turbofan à écoulement axial avec un taux de dilution élevé. De plus, il est d'une conception entièrement modulaire pour faciliter sa maintenance, développé à partir d'un programme de GE (Général- Electric).

Son rôle est de fournir :

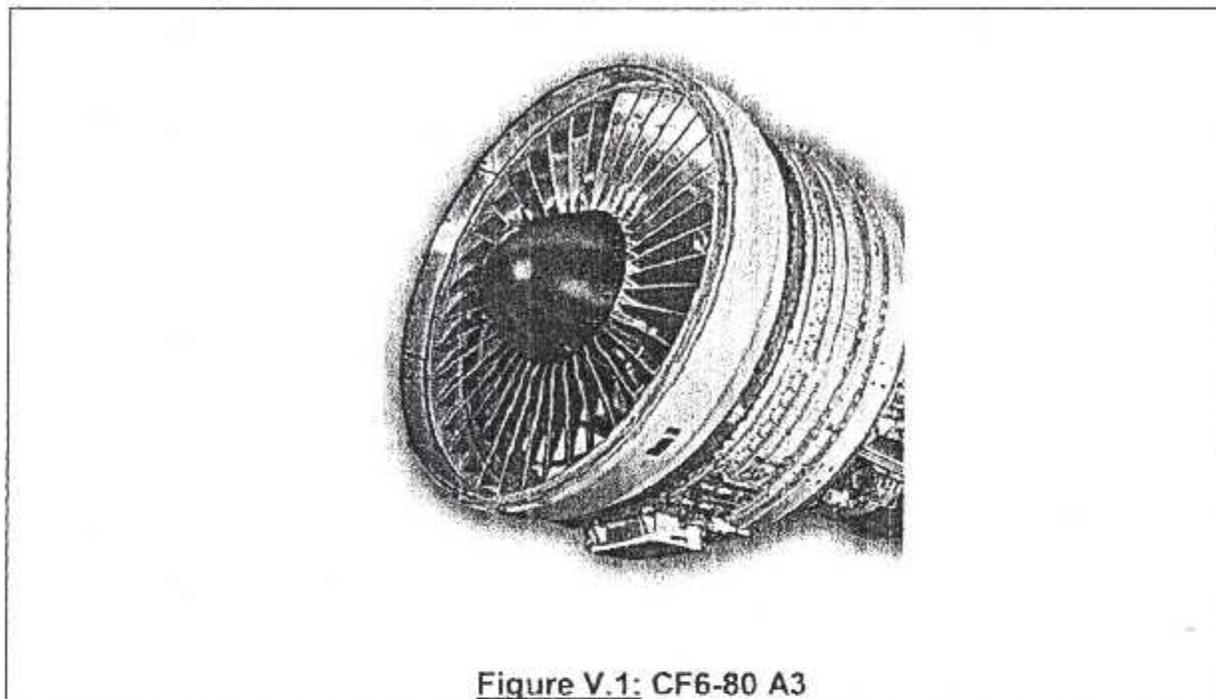
- La force de poussée nécessaire au vol ;
- La force de poussée inverse à l'atterrissage pour assister le freinage de l'avion ;
- Les puissances pneumatiques et hydrauliques nécessaires à bord de l'avion. Les puissances électriques et hydrauliques sont fournies par des accessoires (alternateurs, pompe hydraulique) entraînés mécaniquement par le moteur.

V.3.2. Les caractéristiques du CF6-80 A3

Le CF6-80-A3 est caractérisé par :

□	Poussée (Nominal Thrust Class)	48,000 lbs (213.6 kN)
□	Diamètre du fan (Nominal Engine Diameter)	98 inches (2489 mm)
□	Poids à vide (Nominal Engine Weight)	8500 lbs (3855 kg)
□	Masse de la nacelle	3300 kg
□	Longueur (Nominal engine length)	167 inches (4240 mm)
□	Mach	0,8
□	N1 Max	55380RPM (104%)
□	N2 Max	15183RPM (105%)
□	Taux de compression	32
□	Débit d'air au décollage	385kg/ s
□	Vitesse moyenne d'éjection des gaz	295kg/h
□	Consommation spécifique	0,355à0.357
□	Taux de dilution	5,6
□	Générateur électrique	90 kVa
□	Générateur hydraulique	3000 psi
□	Limite de démarrage	725°C
□	EGT Max	950°C

Tableau 1



V.3.3. Description matérielle du CF6-80 A3 (Découpage modulaires du moteur)

Cette description fournit tous les éléments constitutifs sans se préoccuper de leurs fonctions ; elle correspond à une logique de démontage/remontage, elle donne une représentation physique et externe. Cette décomposition matérielle comprend des descripteurs matériels tels que pièces, organes, mécanismes, dispositifs...

Le réacteur est conçu suivant des principes tels qu'il est possible de remplacer plusieurs éléments principaux sans entraîner de modifications importantes des performances de l'ensemble propulseur dont la conception modulaire.

Remarque :

On a suivi comme décomposition matérielle la décomposition modulaire donnée dans le chapitre 72 = ENGINE des chapitres ATA100 (Figures 2et3).

Les modules du réacteur sont : Fan, Core, HPT, LPT et la Boite d'accessoire (accessory drive).

CF6-80A Complete Restoration Maintenance



MODULE OR ASSEMBLY	COMPLETE RESTORATION MAINTENANCE		
FAN MODULE	72 - 00 - 01		
FAN ROTOR	72 - 21 - 00		
FAN STATOR	72 - 25 - 00		
FWD FAN CASE	72 - 22 - 00		
FAN FRAME & CASE	72 - 23 - 00		
FAN MID SHAFT	72 - 24 - 00		
RADIAL DRIVE SHAFT	72 - 62 - 00		
INLET GEAR BOX	72 - 61 - 00		
ACCESSORY DRIVE MODULE	72 - 00 - 05		
ACCESSORY GEARBOX	72 - 65 - 00		
HORIZONTAL DRIVE SHAFT	72 - 64 - 00		
TRANSFER GEARBOX	72 - 63 - 00		
CORE ENGINE MODULE	72 - 00 - 02		
COMPRESSOR ROTOR	72 - 31 - 00		
COMPRESSOR STATOR	72 - 32 - 00		
COMPRESSOR REAR FRAME	72 - 34 - 00		
COMBUSTION LINER	72 - 41 - 00		
STG 1 HPT NOZZLE	72 - 51 - 00		
HIGH PRESSURE TURBINE MODULE	72 - 00 - 03		
STG 2 HPT NOZZLE	72 - 52 - 00		
HPT ROTOR	72 - 53 - 00		
LOW PRESSURE TURBINE MODULE	72 - 00 - 04		
STG 1 LPT NOZZLE	72 - 55 - 00		
LPT STATOR	72 - 56 - 00		
LPT ROTOR	72 - 57 - 00		
LPT REAR FRAME	72 - 58 - 00		

Figure V.2 : Maintenance complète d'après l'ATA 100

CF6-80A Condition Maintenance

 Aircraft Engines

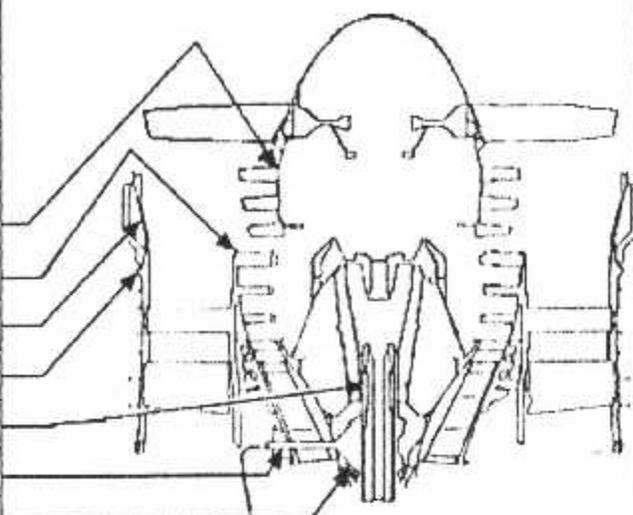
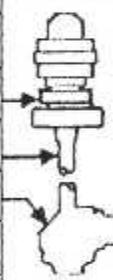
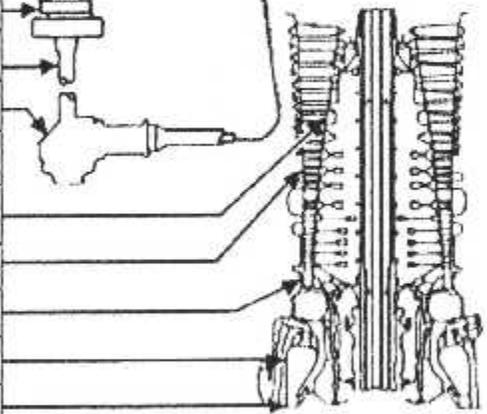
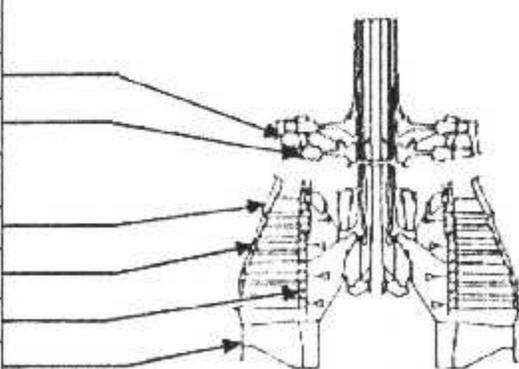
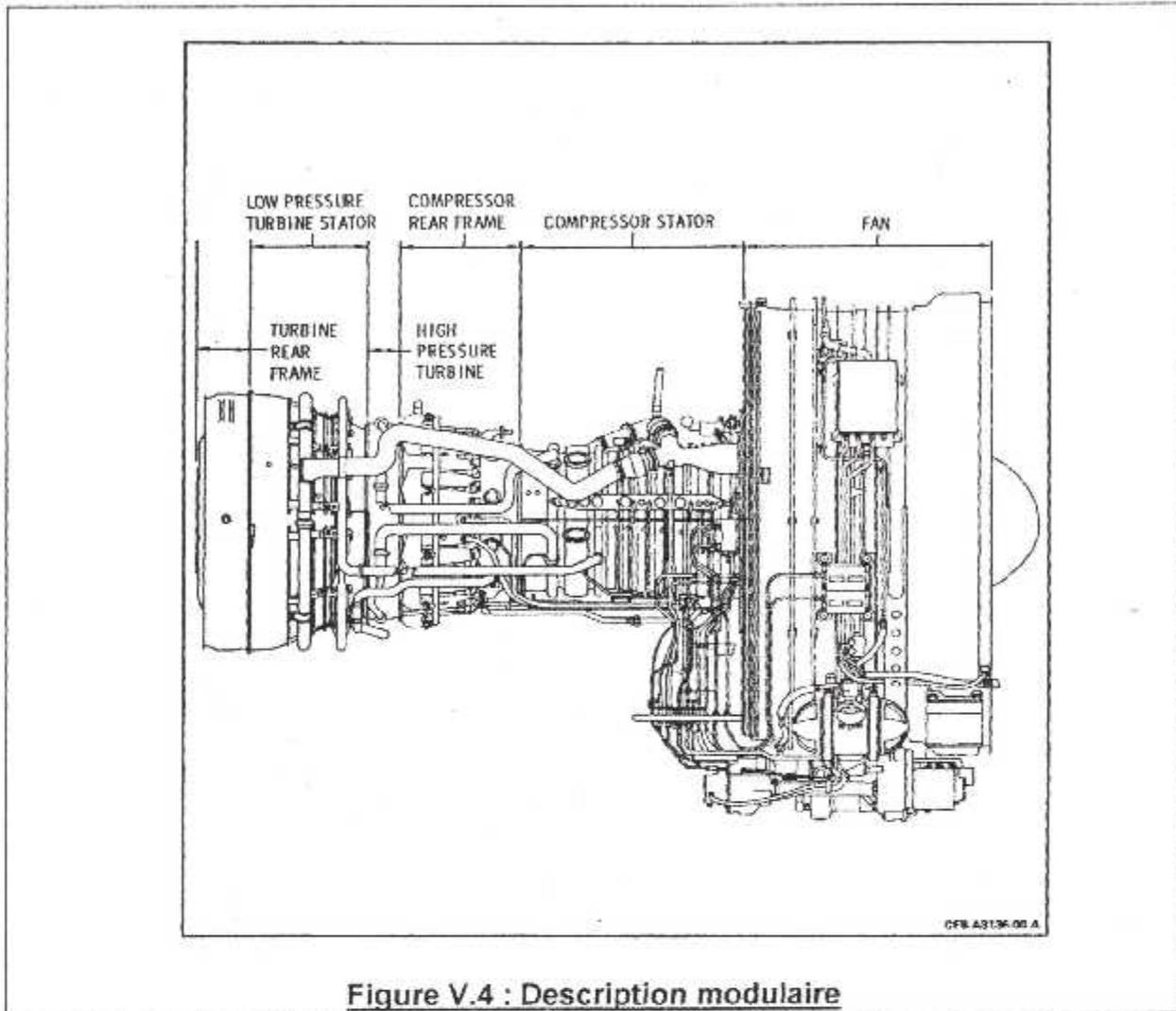
MODULE OR ASSEMBLY	CONDITION MAINTENANCE		
FAN MODULE	72 - 00 - 01		
FAN ROTOR	72 - 00 - 21		
FAN STATOR	72 - 00 - 25		
FWD FAN CASE	72 - 00 - 22		
FAN FRAME & CASE	72 - 00 - 23		
FAN MID SHAFT	72 - 00 - 24		
RADIAL DRIVE SHAFT	72 - 00 - 62		
INLET GEAR BOX	72 - 00 - 61		
ACCESSORY DRIVE MODULE	72 - 00 - 05		
TRANSFER GEARBOX	72 - 00 - 63		
HORIZONTAL DRIVE SHAFT	72 - 00 - 64		
ACCESSORY GEARBOX	72 - 00 - 65		
CORE ENGINE MODULE	72 - 00 - 02		
COMPRESSOR ROTOR	72 - 00 - 31		
COMPRESSOR STATOR	72 - 00 - 32		
COMPRESSOR REAR FRAME	72 - 00 - 34		
COMBUSTION LINER	72 - 00 - 41		
STG 1 HPT NOZZLE	72 - 00 - 51		
HIGH PRESSURE TURBINE MODULE	72 - 00 - 03		
STG 2 HPT NOZZLE	72 - 00 - 52		
HPT ROTOR	72 - 00 - 53		
LOW PRESSURE TURBINE MODULE	72 - 00 - 04		
STG 1 LPT NOZZLE	72 - 00 - 55		
LPT STATOR	72 - 00 - 56		
LPT ROTOR	72 - 00 - 57		
LPT REAR FRAME	72 - 00 - 58		

Figure V.3 : Condition de maintenance d'après l'ATA 100



V.3.4. Description fonctionnelle du CF6-80

V.3.4.1. Fonctions du turbofan

On distingue deux types de fonction :

a/ Fonctions principales :

On a considéré qu'une seule fonction principale pour notre application :

« Fournir (ou générer) la force de poussée nécessaire au vol ».

b/ Fonctions secondaires :

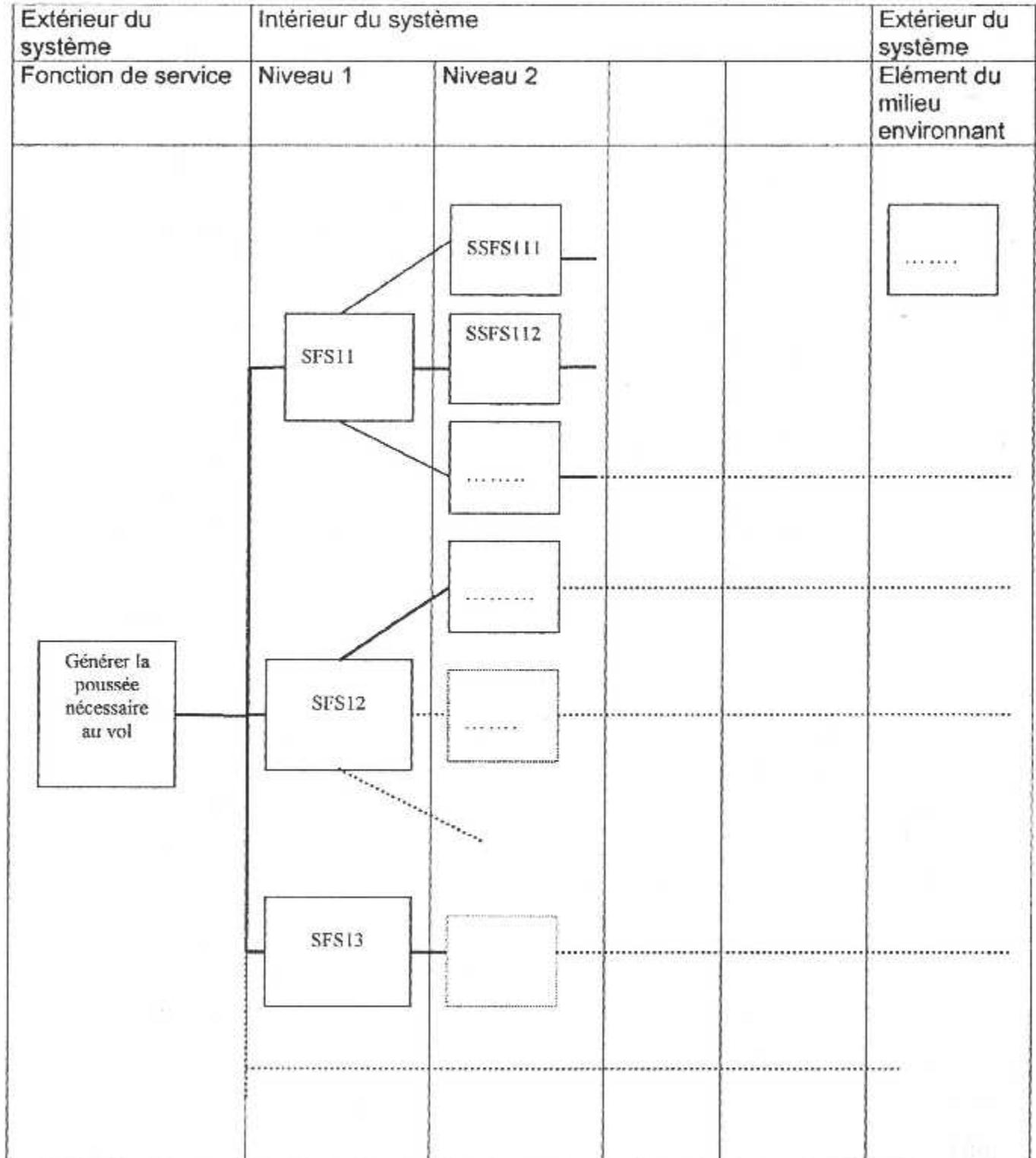
Toutes les autres fonctions :

- La force de poussée inverse à l'atterrissage pour assister le freinage de l'avion ;
- Les puissances pneumatiques et hydrauliques nécessaires à bord de l'avion. Les puissances électriques et hydrauliques sont fournies par des accessoires (alternateurs, pompe hydraulique) entraînés mécaniquement par le moteur.

V.3.4.2. Modélisation fonctionnelle par la méthode FAST

Le diagramme FAST du turbofan CF6-80 A3 pour la fonction principale est donné par tableau suivant :

Diagramme FAST



Extérieur du système	Intérieur du système		Niveau de maintenance		Extérieur du système
Fonction de service	Niveau 1	Niveau 2	Complete restoration maintenance	Condition maintenance	Elément du milieu environnant
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> Engine générer la poussée nécessaire au vol </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> Fan module 72-00-01 </div>	Fan rotor	72-21-01	72-00-21	
		Fan stator	72-25-00	72-00-25	
		Fwd Fan case	72-2200	72-00-22	
		Fan frame and case	72-23-00	72-00-23	
		Fan mid shaft	72-24-00	72-00-24	
		Radial drive shaft	72-62-00	72-00-62	
		Inlet gear box	72-61-00	72-00-61	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> Accessory drive module 72-00-05 </div>	Accessory gear box	72-65-00	72-00-65	
		Horizontal drive shaft	72-64-00	72-00-64	
		Transfer gear box	72-63-00	72-00-63	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> Core engine module 72-00-02 </div>	Compressor rotor	72-31-00	72-00-31	
		Compressor stator	72-32-00	72-00-32	
		Compressor rear frame	72-34-00	72-00-34	
		Combustion liner	72-41-00	72-00-41	
		Stage 1 HPT nozzle	72-51-00	72-00-51	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> High pressure turbine module 72-00-03 </div>	Stage2 HPT nozzle	72-52-00	72-00-52	
		HPT rotor	72-53-00	72-00-53	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;"> Low pressure turbine module 72-00-04 </div>	Stage 1 LPT nozzle	72-55-00	72-00-55	
		LPT stator	72-56-00	72-00-56	
		LPT rotor	72-57-00	72-00-57	
		LPT rear frame	72-58-00	72-00-58	

V.4. Analyse du retour d'expérience

Cette tâche est la plus importante pour toute étude MBF. Ce paragraphe expose les tâches à accomplir pour accéder aux informations utiles pour les études de MBF :

-La première tâche consiste à regrouper les sources de données d'exploitation et de maintenance.

-La deuxième tâche est dédiée à la recherche des lois de probabilité des défaillances à partir des données rassemblées pendant la première tâche.

V.4.1. Recherche des informations nécessaires de retour d'expérience :

V.4.1.1. Données sur les événements concernant le moteur :

-Fiches suivi / pannes / avion :

L'ATA a défini et standardisé les modalités de consignations des événements survenus pendant les vols des avions commerciaux des compagnies aériennes majeurs (Consultation sur site seulement).

Les données sur les événements concernant les moteurs sont structurées dans les fiches (*suivi / pannes / avion (TTVJC et TTVJD) / Chapitre 72*).

-Historique moteur G.E /CF6-80 A3 :

Voir les tableaux historiques moteur.

V.4.1.2. Données de fiabilité (Fiabilité intrinsèque) :

Les données de fiabilité concernant le CF6-80 A3 ne sont pas disponibles sur site (pour avoir accès à ces données il faut contacter le constructeur).

V.4.1.2. Estimation des caractéristiques statistiques associées aux défaillances

V.4.1.2.1. Les données de survie :

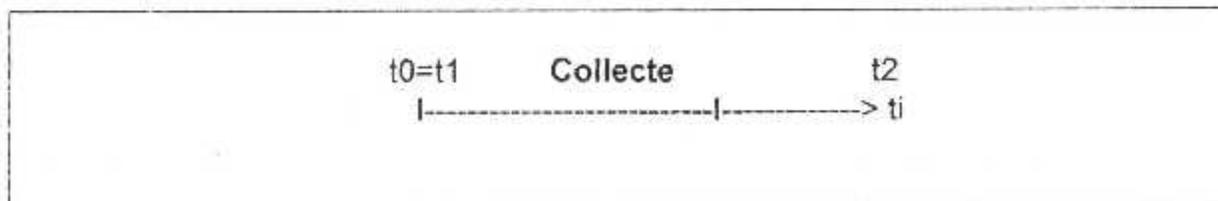
L'approche utilisée pour obtenir ces estimations correspond aux méthodes de la statistique classique ou l'approche fréquentielle.

Pour pouvoir déterminer la loi de fiabilité et ajuster ses paramètres, il faut constituer des échantillons de « temps » t concernant la population traitée (**Les 06 turboréacteurs (CF6-80 A3)**).

Pour faire cette étude on a choisi un seul turbofan, le premier mis en service : ESN 585148

Cette collecte est effectuée sur une période, notée de t_1 à t_2 concernant des matériels dont la mise en service est notée t_0 .

La collecte sur l'intervalle de temps (t_1, t_2) est schématisé ci-dessous.



Donc les données nécessaires pour établir un échantillon sont :

- l'origine : t_0 date d'installation du premier réacteur (ESN 585148) ;
- les dates des défaillances ;
- les dates de censure :

$t_1=t_0$: date d'installation du premier réacteur (ESN 585148):
10/10//1983 ;

t_2 : date de la fin de la collecte : 10/10/2003.

Pour ces plans d'essais tronqués à gauche et à droite (censurées sur intervalle), il existe deux types de méthodes de travail :

- méthodes non paramétriques ;
- méthode paramétrique.

Tableaux des historiques des pannes :

AIR ALGERIE
S/D ENGINEERING
DEPT. PROPULSION
SERVICE TURBOREACTEURS GEJCFMI

DEB Le: 10/02/2003

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
ESN : 585148

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TSI CSI	TRT	TSN CSN
TTVJC	1	10/10/1983	25,17 0	0	10/09/1985	3029,26 1463	OIL SMOKE IN CABIN	LH	3029,26 1463	*1,26	3054,43 1463
TTVJC	2	13/10/1985	3054,43 1463	6416,19 2869	08/02/1989	12387,54 5489	HPT DAMAGED	LH	5971,35 2620	*2,12	9026,18 4083
TTVJD	1	15/06/1990	9026,18 4083	14119,3 8379	18/02/1992	16870,14 7658	HPT STG2 BLADES CRACKED	LH	2750,44 1479	0	11777,02 5662
TTVJC	2	03/05/1993	11777,02 5662	20820,58 9706	23/05/1994	22947,28 10913	CONVENIENCE	AH	2126,3 1207	***	13903,32 6769
TTVJD	2	23/05/1994	13903,32 6769	20530,5 9973	17/07/1995	22630,46 11062	HIGHT EGT	AH	2099,66 1115	*	16003,28 7888
TTVJD	1	05/05/1996	16003,28 7888	24036,33 11862	14/09/1996	24687,07 12322	CONVENIENCE	AH	650,34 440	***	16554,02 8328
TTVJC	2	14/09/1996	16554,02 8328	26971,18 13282	08/10/1997	28113,21 14455	CONVENIENCE	KLM	2142,03 1173	**	18796,05 9501
TTVJC	2	20/01/2000	18796,05 9501	33730,7 15728	07/12/2002	38086 19004	CONVENIENCE	AH	4354,3 2276		23150,46 11777

Tableau 2

AIR ALGERIE
 S/D ENGINEERING
 DEPT. PROPULSION
 SERVICE TURBOREACTEURS GE/C/FMI

D.E.B. Le: 10/10/2003

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
 ESN : 585150

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL. DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TSI CSI	TRT	TSN CSN
TTVIC	2	01/08/1984	9.57 0	0 0	12/10/1986	9416.19 2896	CONVENIENCE	AH	6426.16 2896	0	6426.16 2896
TTVID	1	26/07/1987	6426.16 2899	6105.2 2748	07/04/1987	6424.5 2918	CHAMBE R COMBUSTION DETERIORATION	LH	329.3 170	14	6755.46 3039
TTVID	1	12/04/1988	6755.46 3039	9239.25 4138	15/08/1990	14119.3 6379	HPT BLADE DAMAGED	LH	4880.05 2241	.	11635.51 5280
TTVIC	1	24/06/1991	11635.51 5290	17878.51 9016	07/02/1993	20820.97 9706	MISSING INTLACKRACKS ON COMBUSTOR	KLM	2942.46 1690	0	14577.56 8970
TTVIC	1	25/05/1994	14577.56 8970	22712.46 10825	12/01/1995	23949.55 11514	MISSING INTLACKRACKS ON STG-2 HPT BLDE	AH	1137.09 589	***	15715.09 7659
TTVID	2	26/07/1995	15715.09 7659	22630.46 11092	04/08/1997	26164.23 13155	LIFE LIMITED PART	AH	3553.37 2063	.	19288.46 9722
TTVID	1	01/03/1998	19288.46 9722	27074.39 13709	26/04/2000	31530.15 15928	HPT SGT 1 BLADE DAMAGED	AH	4555.36 2219	.	23924.59 11941

Tableau 3

AIR ALGERIE
S/D ENGINEERING
DEPT. PROPULSION
SERVICE TURBOREACTEURS GE/CFM

D.E.P Le: 10/10/2003

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
ESN : 685152

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TSI CSL	TRT	TSN CSM
TTVID	1	08/06/1964	61,55 0	0 0	24/01/1967	6105,2 2786	STG1 HPT BLADES DAMAGED	LH	6105,2 2786	2,46	6167,15 2786
TTVID	2	03/05/1967	6170,01 2766	6713,16 3045	16/01/1968	10655,33 4737	NGV BOROSCO PLUG MISALIGNMENT	LH	3945,17 1692	3,42	10112,32 4458
TTVID	2	12/04/1969	10112,32 4458	11393,42 5068	27/08/1991	16273,14 7497	HPT BLADE FAILURE	LH	4679 2429	3,36	14992,04 6887
TTVID	2	19/05/1992	14992,04 6887	17286,57 8040	16/09/1993	19963,32 9686	CONVENIENCE	AH	2676,35 1626	***	17678,39 8513
TTVID	1	03/01/1994	17678,39 8513	19963,53 9666	11/03/1995	22056,28 10888	LIFE LIMITED PVL	AH	2092,35 1222	0	19761,25 6735
TTVID	1	08/04/1995	19761,25 6735	22056,47 10888	17/06/1995	22696,16 11062	LIFE LIMITED PVL		536,29 174	*****	20301,23 9609
TTVID	1	20/09/1995	20301,23 9609	25/06/1962 11216	06/06/1996	24036,33 11862	HPTR1-HPTR2 DAMAGED	KLM	12140,33 666	0	21515,31 10575
TTVID	1	24/02/1997	21515,31 10575	25/295,36 12676	12/01/1998	27074,39 13709	CONVENIENCE	AH	1779,03 1033	*	23294,34 11608
TTVAC	1	15/01/1998	23294,34 11608	29752,55 14792	15/12/1998	31516,28 15620	CRACK ON HPT BLADE	AH	1763,33 828	*	25056,07 12436
TTVID	2	24/08/1999	25056,07 12436	29741,35 15005	23/09/2001	33895,5 17169	LIFE LIMITED PVL	AH	4154,15 2163	*	29212,36 14599

Tableau 4

AIR ALGERIE
S/D ENGINEERING
DEPT. PROPULSION
SERVICE TURBOREACTEURS GE/C/FMI

D.E.9 Le : 10/10/2003

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
ESN : 585185

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TBI CSI	TRT	TBN CSN
TTVJD	2	02/09/1986	13.55 0	5229.35 2322	01/06/1987	6713.16 3045	COMBUSTOR DAMAGED	LH	1483.41 723	1.59	1497.36 723
TTVJC	1	16/06/1987	1497.36 723	8135.38 3631	13/12/1988	11978.15 5314	NGV BROCOPE PLUG MISALIGNEMENT	LH	3842.42 1693	2.33	5342.17 2406
TTVJC	1	12/12/1989	5342.17 2406	14641.31 6551	18/06/1991	17878.51 8016	HPT BLADES DAMAGED	LH	3237.2 1465	2.3	8579.37 3871
TTVD	1	23/02/1992	8579.37 3871	16870.14 7856	16/09/1993	19563.32 5666	CONVENIENCE	KLM	3093.18 1806		11677.28 5679
TTVD	1	04/04/1995	11677.28 5679	22056.47 10898	05/04/1995	22056.47 10898	VIBRATION & JAMED N2	AH	1 0	0	11675.25 5679
TTVJC	1	06/04/1996	11675.25 5679	26091.01 12799	13/01/1998	29752.55 14792	MISSING METAL ON HPTTR BLADES	AH	3661.54 1993	4	15337.22 7672
TTVJC	1	24/12/1998	15337.22 7672	31516.28 15620	15/11/2000	34701.24 17285	LIFE LIMITED PVL	AH	3184.56 1985		18522.18 9337

Tableau 5

AIR ALGERIE
S/D ENGINEERING
DEPT. PROPULSION
SERVICE TURBOREACTEURS GEICFM

DEB Le: 10/10/2005

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
ESN : 585186

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TSI CSI	TRT	TSN CSN
TTVJC	1	09/09/1995	9,04 0	3029,28 1,463	15/09/1997	8135,33 363,1	COMBUSTOR CHAMBER DAMAGED	LH	5106,07 2166	2,11	5117,41 2169
TTVID	2	19/10/1999	5117,41 2166	10658,33 4737	29/01/1999	11393,42 5068	CONVENIENCE	AH	735,09 331	0	5950,2 2499
TTVJC	2	09/02/1999	5950,2 2499	12387,54 5486	11/11/1990	17117,37 7813	HPT BLADES CRACKED	LH	4729,43 2124	3,24	10580,09 4623
TTVID	2	14/12/1991	10580,09 4623	16273,14 7497	18/05/1992	17286,57 8040	HPTR STG1 NOZZLE CRACKED	KLM	1013,43 543	0	11593,46 5166
TTVJC	1	04/05/1993	11593,46 5166	20620,58 9706	18/05/1994	22712,46 10825	MISSING METAL ON STG 1 HPT BLADES	KLM	1891,49 1119	...	13465,34 6285
TTVJC	1	14/01/1995	13465,34 6285	23949,55 11514	06/04/1996	29091,01 12799	GLOGGED FILTER & JAMMED VZ	KLM	2241,06 1295	...	15728,4 7570
TTVID	1	20/10/1996	15728,4 7570	24697,07 12322	23/02/1997	25285,36 12676	METAL CHIPS IN SCAVENGE & PUMP	AH	808,29 364	...	16335,09 7524
TTVID	2	15/08/1998	16335,09 7524	26184,23 13155	27/04/1999	29741,21 15005	MISSING METAL HPTR1 BLADES & NGV	AH	3656,69 1850	...	19892,07 9774
TTVID	1	20/05/2000	19892,07 9774	31630,15 15928	25/07/2000	32036,47 19158	OIL LEAKAGE	SY	406,32 230	.	20299,39 10004

Tableau 6

AIR ALGERIE
S/D ENGINEERING
DEPT. PROPULSION
SERVICE TURBOREACTEURS GECFMI

DEB Le: 10/10/2003

*** HISTORIQUE MOTEUR G. E. / CF6-80A3 ***
ESN : 585161

A/C REGIST.	ENG POS	INSTAL DATE	T. ENG C. INSTAL	T. A/C C. INSTAL	REMOVAL DATE	T. A/C C. REMOV	REASON OF REMOVAL	REP SHOP	TSI CSI	TRT	TSN CSN
TTVJD	2	13/10/1993	5,24 0	0 0	02/09/1996	5229,35 2322	METAL CHIPS FWD B-SUMP	LH	5229,35 2322	2,45	5234,59 2322
TTVJD	1	09/04/1987	5234,59 2322	6434,5 2918	14/04/1989	9239,25 4138	SUSPECT BRG N°5 OUTER RACE	LH	2904,35 1220	*1,55	8042,19 3542
TTVJC	1	14/12/1988	8042,19 3542	11976,15 5314	11/12/1989	14641,31 6561	HPT BLADES CRACKS	LH	2663,16 1237	***	10705,35 4778
TTVJC	2	16/11/1990	10705,35 4779	17117,37 7613	04/06/1992	16499,19 8927	CRACKS HPT STG1 & MISSING METAL	AF	2381,42 1314		13087,17 8093
TTVJC	2	06/07/1992	13087,17 6093	19720,05 9034	07/02/1993	20820,97 9705	CONVENIENCE	AH	1092,92 672	***	14182,24 6765
TTVJD	2	06/01/1994	14182,24 6765	19983,53 9666	07/06/1994	20530,5 9873	HPT1 BLADE OUT OF LIMIT	KLM	566,57 307	***	14749,42 7072
TTVJC	2	19/07/1994	14749,42 7072	22947,28 10913	25/08/1996	26895,18 13229	N2 VIBRATION	KLM	3637,5 2316	***	18687,32 9386
TTVJC	2	07/10/1997	18687,32 9386	29113,21 14455	19/12/1999	30730,42 16728	LIFE LIMITED PART	AH	4817,21 2273	*	23304,53 11661
TTVJD	1	06/07/2000	23304,53 11661	33036,47 16198	08/08/1999	32081,27 16190	LIFE LIMITED PART	AH	44,4 32	*	23349,33 11683
TTVJD	2	22/09/2001	23349,33 11693	33995,5 17169	22/12/2001	34382,5 17430	METAL CHIPS A & B-SUMP	AH	487 282	*	23836,33 11855

Tableau 7

V.4.1.2.2. Méthodes non paramétriques

V.4.1.2.2.1. La méthodes de « Johnson » ou des rangs médians

Le comportement du turbofan CF6 -80 A3 a été observe sur le moteur d'ESN 585148 pendant 20 ans (10/10//1983 au 10/10/2003).

L'échantillon recueilli (pour le moteurs ESN 585148) est composé de 22 données dont 12 sont censurées et 08 dates de défaillances, l'unité de temps est le mois (voir tableau des données collectées).

Tableau des données collectées

Date		Pas (Mois)	Date d'installation		Date de défaillance		TBF (Mois)	Temps censurés à droite(Mois):t _c	Temps de défaillances (Mois):t _d	Temps collectés (Mois):t
Jour	Mois		Jour	Mois	Jour	Mois				
10	10	1983	0	10	10	1983	/	/	/	/
10	10	1984	12	/	/	/	12	/	/	12
10	10	1985	24	/	/	/	/	23	/	23
10	10	1986	36	13	10	1986	/	/	/	36
10	10	1987	48	/	/	/	48	/	/	48
10	10	1988	60	/	/	/	60	/	/	60
10	10	1989	72	/	/	/	/	64,06	/	64,06
10	10	1990	84	15	6	1990	/	/	/	84
10	10	1991	96	/	/	/	96	/	/	96
10	10	1992	108	/	/	/	/	99,48	/	99,48
10	10	1993	120	3	5	1993	120	/	/	120
10	10	1994	132	/	/	/	/	127,24	/	127,24
10	10	1994	132	23	6	1994	132	/	/	132
10	10	1995	144	/	/	/	/	140,47	/	140,47
10	10	1996	156	6	6	1996	/	155,5	/	155,5
10	10	1996	156	/	/	/	156	/	/	156
10	10	1996	156	14	9	1996	156	/	/	156
10	10	1997	168	/	/	/	/	167,6	/	167,6
10	10	1998	180	/	/	/	168	/	/	168
10	10	1999	192	/	/	/	180	/	/	180
10	10	2000	204	20	1	2000	192	/	/	192
10	10	2001	216	/	/	/	204	/	/	204
10	10	2002	228	/	/	/	/	220,42	/	220,42
10	10	2003	240	/	/	/	/	/	/	/

Tableau 8

Calcul de la fiabilité par la méthode des rangs médian :

Cette méthode programmée sous Excel donne le tableau suivant:

Rang	t	N	M	i	Ti	RN(t)
/	0	22	/	/	/	1
1er	23	22	/	0	1	0,968750000
2è	64,06	22	6	3,142857143	4,142857143	0,828443878
3è	99,48	22	6	2,693877551	6,836734694	0,708181487
4è	127,24	22	6	2,309037901	9,145772595	0,605099438
5è	140,47	22	6	1,979175344	11,124947938	0,516743396
6	155,5	22	6	1,696436009	12,821383947	0,441009645
7è	167,6	22	6	1,454088008	14,275471955	0,376095002
8è	220,42	22	6	1,246361149	15,521833104	0,320453879

Tableau 9

Estimation de la fonction de survie :

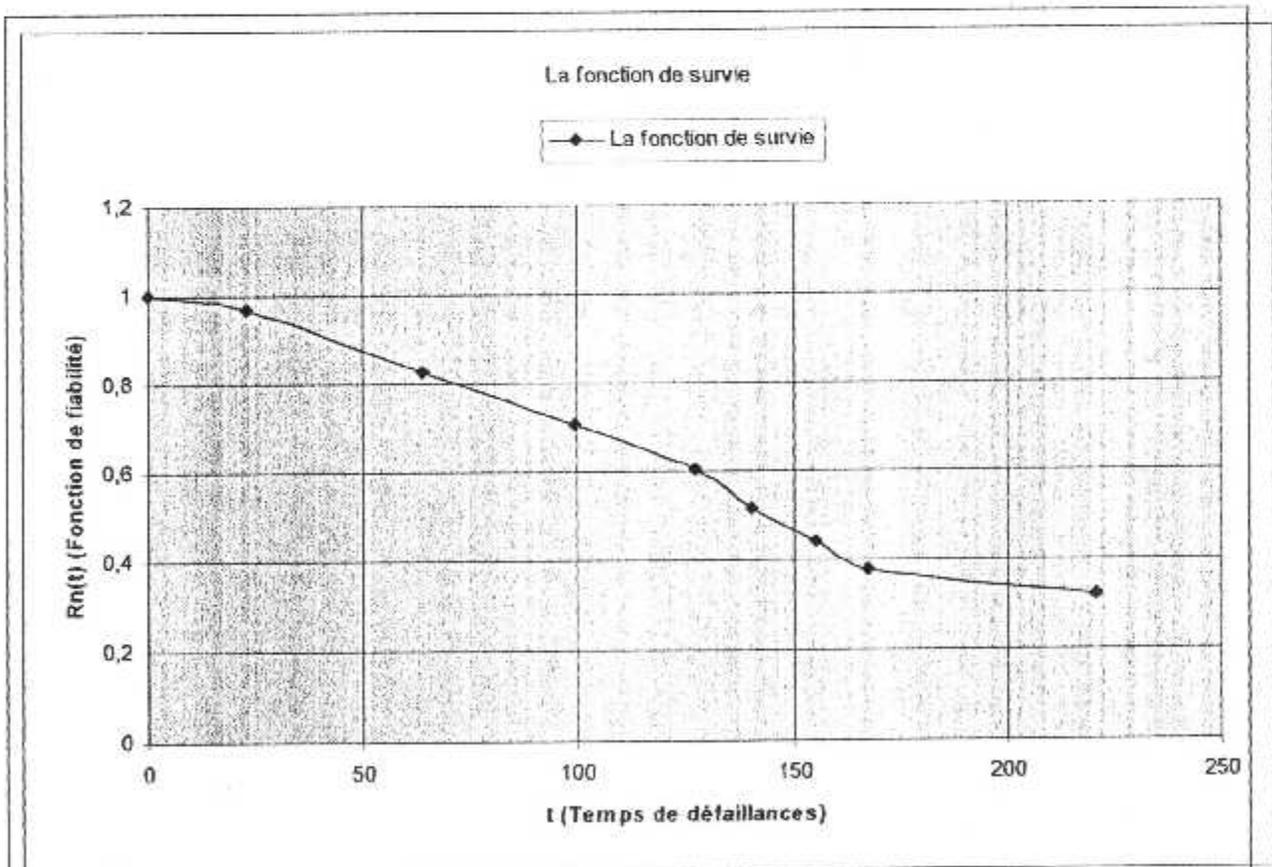


Figure 5 : La fonction de survie donnée par la méthode des rangs médians

2.4.1.2.2. Estimateur de Kaplan-Meier :

Calcul de la fiabilité : Pour les mêmes données collectées (Tableau 8) on obtient les résultats suivants (en utilisant le logiciel SPSS : logiciel d'analyse des données statistique) :

Survival Analysis for t	Temps collectés				
Time	Status	Cumulative Survival	Standard Error	Cumulative Events	Number Remaining
12,00	Temps de censure				21
23,00	Temps de défaillance	,9524	,0465	1	20
36,00	Temps de censure			1	19
48,00	Temps de censure			1	18
60,00	Temps de censure			1	17
64,06	Temps de défaillance	,8964	,0698	2	16
84,00	Temps de censure			2	15
96,00	Temps de censure			2	14
99,48	Temps de défaillance	,8323	,0895	3	13
120,00	Temps de censure			3	12
127,24	Temps de défaillance	,7630	,1055	4	11
132,00	Temps de censure			4	10
140,47	Temps de défaillance	,6867	,1194	5	9
155,50	Temps de défaillance	,6104	,1282	6	8
156,00	Temps de censure			6	7
156,00	Temps de censure			6	6
167,60	Temps de défaillance	,5086	,1416	7	5
168,00	Temps de censure			7	4
180,00	Temps de censure			7	3
192,00	Temps de censure			7	2
204,00	Temps de censure			7	1
220,42	Temps de défaillance	,0000	,0000	8	0

Number of Cases:	22	Censored:	14 (63,64%)	Events:	8
Survival Time		Standard Error		95% Confidence Interval	
Mean:	171,63	15,68	(140,90;	202,35)	
Median:	220,42	,00	(, ; ,)		

Percentiles			
	25,00	50,00	75,00
Value	220,42	220,42	140,47
Standard Error	220,42	220,42	33,60

Estimation de la fonction de survie

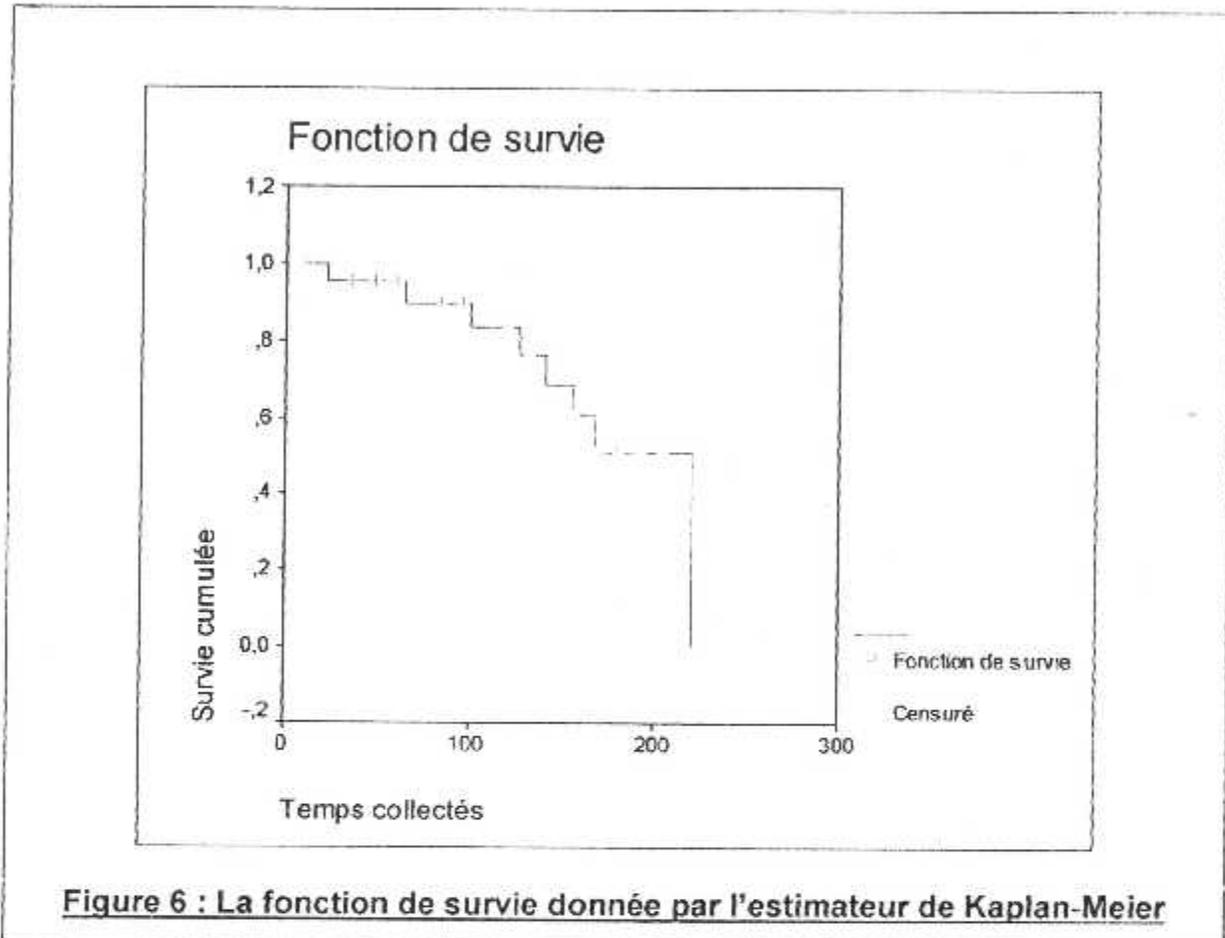


Figure 6 : La fonction de survie donnée par l'estimateur de Kaplan-Meier

V.4.1.2.3. Méthodes paramétriques (modélisation par la loi de Weibull)

V.4.1.2.3.1. Le choix priori d'un modèle

La loi de Weibull est généralement choisie car elle décrit alternativement les trois phases de la vie d'un matériel.

V.4.1.2.3.2 Estimation des paramètres de la loi de Weibull

Un des problèmes essentiels est l'estimation des paramètres de Weibull : β , η et γ de cette loi.

Pour cela nous disposons de deux méthodes :

-Une entièrement par le calcul, qui fait intervenir les équations différentielles difficile à résoudre, de ce fait elle est peu utilisée : c'est la méthode de maximum de vraisemblance (traitée dans le chapitre III).

-L'autre graphique, qui utilise un papier à échelle fonctionnelle dit papier de Weibull ou « d'Allen Plait ». Cette méthode la plus utilisée est développée ici de deux manières :

- .Calcul direct sur le papier de Weibull;
- .Calcul à partir d'un programme en FORTRAN.

1/ Graphe d'Allen Plait :

Cas $\gamma = 0$: Hypothèse que l'origine est bien connue et qu'il coïncide avec les données expérimentales.

Si les données correspondent à une loi de Weibull de paramètre $\gamma = 0$, elles doivent s'aligner suivant une droite dans le graphique d'Allen Plait de la forme :

$$y = Ax + B \quad (\text{Equation d'une droite})$$

Pour déterminer les paramètres β et η , on utilise le graphique d'Allen Plait (ou papier de Weibull).

-en ordonnée, on a :

$$\ln \ln \frac{1}{R(t)} \quad (\text{Logarithme népérien})$$

-en abscisse, on a :

$$\log t$$

1- Calcul de β :

β est le paramètre de forme, il représente la pente de la droite. Pour l'obtenir, on fait passer une droite parallèle à la droite réelle par le point 1 et on lit la valeur de β sur l'échelle β (voir graphique ci-après).

2- Calcul de η :

η est le paramètre d'échelle, il se lit à l'intersection de la droite tracée et de la ligne 63.2 % (voir graphique ci-après).

En effet pour l'ordonnée $\gamma = 0$, on a $F(t) = 63.2$.

3-Graphe d'une loi de Weibull :

Voir graphe.

$$\beta = 0.3$$

$$\eta = 132$$

Ensuite on peut calculer le MTBF :

$$E(t) = \text{MTBF} = \eta \Gamma(1 + 1/\beta) = 264$$

Graphique de $R(t)$ et $F(t)$

$R(t)$ $F(t)$

6,00E-01

5,00E-01

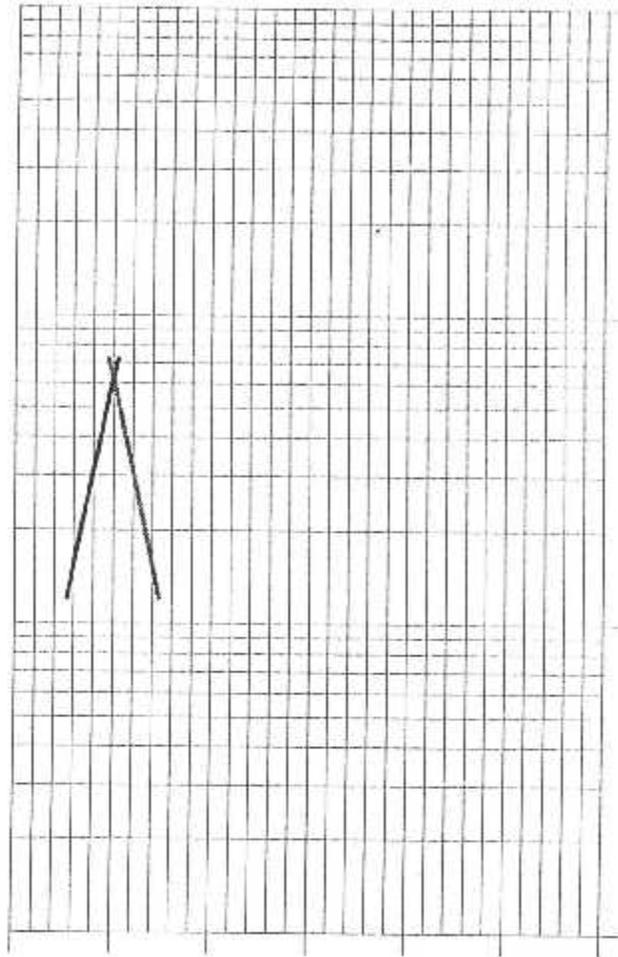
4,00E-01

3,00E-01

2,00E-01

1,00E-01

0,00E+00



1 10 100 1000

$t(\text{mois})$

— $R(t)$
- - $F(t)$

2/ Programme en FORTRAN :

On a fait un programme en FORTRAN de la recherche des paramètres de Weibull. Il permet à partir des temps de bon fonctionnement de calculer les paramètres de la loi de Weibull ainsi que la MTBF (voir le programme).

Soit TBF le temps de bon fonctionnement du moteur (ESN 585148), alors les données collectées sont données dans le tableau suivant :

Tableau des données collectées de TBF:

23 - 27.84 - 20.03 - 13.66 - 12.80 - 3.26 - 12.88 - 34.57
--

Organigramme : voir annexe I.

Programme:

```

real TBF(100)
open(1,file='TBF.txt',status='old')
open(2,file='F(T).txt')
open(3,file='R(T).txt')
open(4,file='MTBF.txt')

      ! ***** Chargement des TBF *****
      ! ***d'apres le fichier TBF.TXT ***

70    i=0
      i=i+1
      read(1,*)TBF(i)
      write(*,*)TBF(i)
      if(TBF(i).EQ.0)goto 120
      goto 70

      !***** initations *****

120   N=i
      i=0
      T=0
      F=0
      T2=0
      F2=0
      F5=0

      write(*,*)'nombre de TBF saisis ',N-1

```

```

do i=1,N-1
T=T+Log(TBF(i))
F1=1E0/(1E0-float(i)/float(N))
F3=LOG(F1)
F=F+LOG(F3)
T2=T2+LOG((TBF(i))**2)
F2=F2+LOG(F3**2)
F4=LOG(TBF(i))*LOG(F3)
F5=F5+F4
enddo
N=N-1
B=(F5-T*F/float(N))/(T2-T**2/float(N))
E=T/float(N)-F/float(N)/B
E1=EXP(E)
R1=F5-T*F/float(N)
R2=(T2-T**2/float(N))*(F2-F**2/float(N))
R3=SQRT(R2)
R=R1/R3
write(*,*)'BETA=',B
write(*,*)'ETA=',E1
write(*,*)'correlation lineaire R=',R
write(*,*)'calcul de la MTBF si oui entrer 0 sinon 20'
read(*,*)G
if(G.EQ.0)then
goto 490
else
goto 570
endif
! ***** calcul de MTBF *****
490  x=0
p=0.001
Puiss=1./B
do x=p,1.,p
G=G+(ABS(LOG(1./X))**Puiss)*p
enddo
X=E1*G
write(*,*)'MTBF=',X
! ***** calcul de R(T) et de F(T) *****
570  write(*,*)'calcul de R(T) et de F(T)'
write(*,*)'pour calculer R(T) et F(T) entrer t sinon 0'
read(*,*)T3
590  if(T3.EQ.0)goto 670
R1=(T3/E1)**B
R2=EXP(-R1)
write(*,*)'pour t=',T3,' R(T) est egal a ',R2
write(3,*)'pour t=',T3,' R(T) est egal a ',R2

```

```
write(3,*)T3,R2
R4=1-R2
write(*,*)'pour t=',T3,' F(T) est egal a ',R4
write(2,*)'pour t=',T3,' F(T) est egal a ',R4
write(2,*)T3,R4
write(*,*)'pour refaire le calcul entrer t sinon 0'
read(*,*)T3
if(T3.EQ.0)then
goto 670
else
goto 590
endif
                !*** Fin du Programme ***
670  continue
      stop
      end
```

V.4. Analyse des défaillances des matériels critiques

V.4.1. Méthode AMDEC

La méthode utilisée est l'AMDEC. Cette méthode consiste à identifier les risques de mauvais fonctionnement du moteur puis à en chercher les effets et les conséquences. Elle fait ressortir les points faibles d'un équipement et permet de poser des actions correctives justifiées. On peut aussi voir quels sont les équipements critiques de notre sur lesquelles on doit s'attarder de faire une bonne maintenance.

Le but premier de L'AMDEC est de maîtriser les défaillances, ce qui permet par la suite de garantir une fiabilité, une maintenabilité, une disponibilité et une sécurité convenable. L'étude AMDEC-machine vise à réduire le nombre de défaillances ainsi que le temps de non-disponibilité des machines tout en améliorant la sécurité.

La méthode se base sur la question suivante : comment notre machine ne peut-elle pas assurer correctement sa fonction ? Les réponses à cette question sont nos modes de défaillances pour la machine. On s'interroge ensuite : quels sont les causes probables, quels sont les effets d'une défaillance ?

La méthode AMDEC comporte 4 étapes successives pour un total de 21 opérations. La démarche est la suivante :

Étape 1 : initialisation (Traiter au début de ce chapitre)

- 1-définition du système à étudier
- 2-définition de la phase de fonctionnement
- 3-définition des objectifs à atteindre
- 4-constitution d'un groupe de travail
- 5-établissement du planning
- 6-mise au point des supports de l'étude

Étape 2 : décomposition fonctionnelle (Traiter au début de ce chapitre)

- 7-découpage du système
- 8-identification des fonctions des sous-ensembles
- 9-identification des fonctions des éléments

Étape 3 : analyse AMDEC (Voir tableau 9)

3a : analyse des mécanisme de défaillances

- 10-identification des modes de défaillances
- 11-recherche des causes
- 12-recherche des effets
- 13-recensement des détections

3b : évaluation de la criticité

- 14-estimation du temps d'intervention
- 15-évaluation des critères de cotation
- 16-calcul de la criticité

3c : proposition d'actions correctives

- 17-recherche des actions correctives
- 18-calcul de la nouvelle criticité

Étape 4 : synthèses

- 19-hiérarchisation des modes de défaillances
- 20-liste des points critiques
- 21-liste des recommandations

Détailances fonctionnelles de toutes les moteurs						
Moteur N°1	Moteur N°2	Moteur N°3	Moteur N°4	Moteur N°5	Moteur N°6	
585148	585150	585152	585195	585198	585151	
OIL SMOKE IN CABIN	CONVENIENCE	METAL CHIPS FWD B-SUMP	STG1 HPT BLADES DAMAGED	COMBUSTOR DAMAGED NGV BRCDPE PLUG	COMBUSTOR CHAMBER DAMAGED	
HPT DAMAGED	CHAMBER COMBUSTION	SUSPECT BRG N°5 OUTER RACE	NGV BRCDSCD PLUG MISALIGNEMENT	MISALIGNEMENT	CONVENIENCE	
HPT STG2	DETERIORATION	HPT BLADES CRACKS	HPT BLADE FAILURE	HPT BLADES DAMAGED	HPT BLADES CRACKED	
BLADES CRACKED	HPT BLADE DAMAGED	CRACKS HPT STG1 & MISSING METAL	CONVENIENCE	CONVENIENCE	MISSING METAL ON HPTR STG1 NOZZLE CRACKED	
CONVENIENCE	MISSING MTL&CRACKS ON COMBUSTOR	CONVENIENCE	LIFE LIMITED PVL	VIBRATION & JAMED N2	GLOGGED FILTER & JAMMED N2	
HIGHT EGT	ON STG-2 HPT BLDE	HPT1 BLADE OUT OF LIMIT N2 VIBRATION	HPTR1-HPTR2 DAMAGED	MISSING METAL ON HPTR BLADES	METAL CHIPS IN SCAVENGE & PUMP	
CONVENIENCE	LIFE LIMITED PART	LIFE LIMITED PART	CONVENIENCE	LIFE LIMITED PVL	MISSING METAL HPTR1 BLADES & NGV	
CONVENIENCE	HPT SGT 1 BLADE DAMAGED	METAL CHIPS A & B-SUMP	LIFE LIMITED PVL	LIFE LIMITED PVL	OIL LEAKAGE	

Tableau 9

V.4.1. Grilles de cotation (Données au Chapitre IV)

V.4.1. Résultat (Voir LES DEUX CD DE GE AMM, EM)

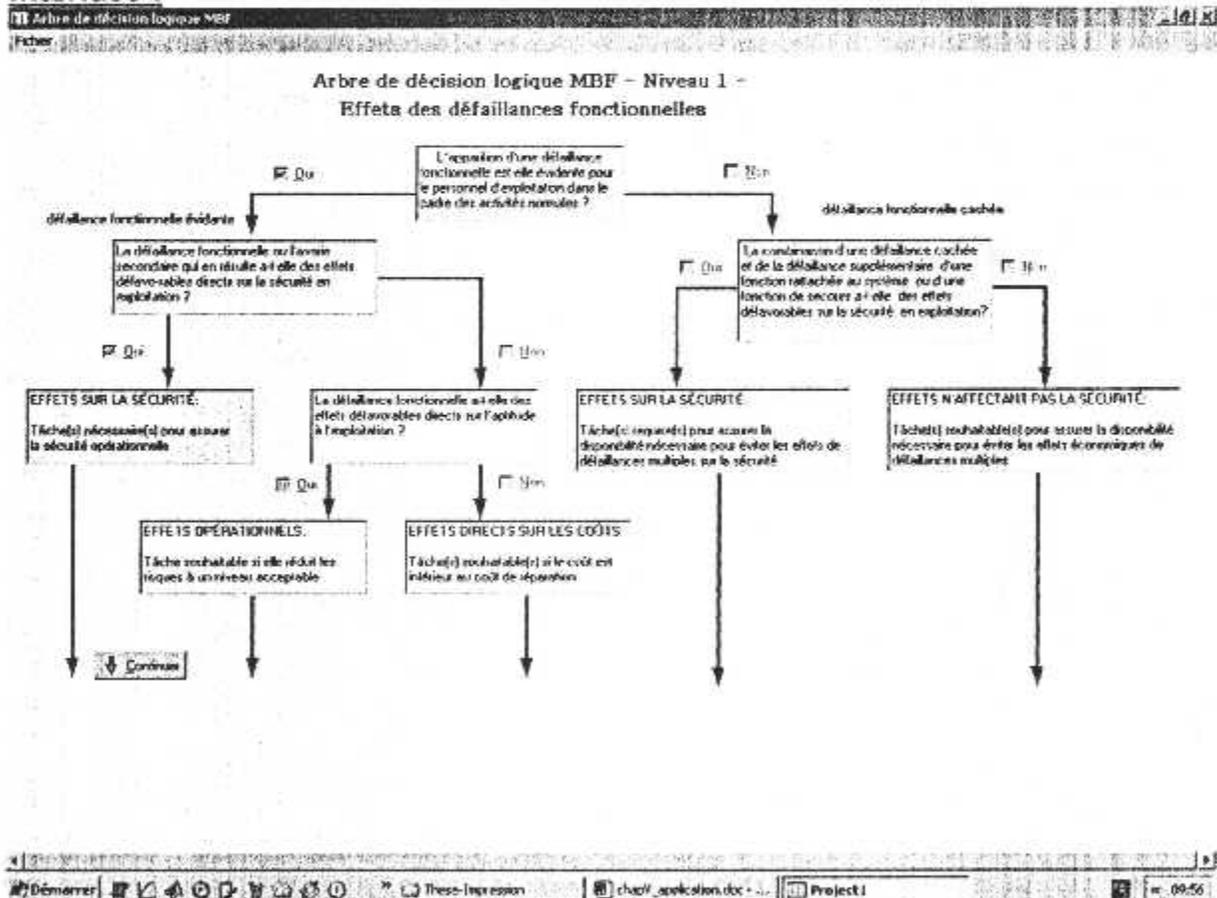
D'après les données du retour d'expérience (Historique des pannes et fiches avions) on a constaté que la partie la moins fiable et la plus critique est la partie haut pression :

- CORE ENGINE MODULE (72-00-02),
- HIGH PRESSURE TURBINE MODULE (72-00-03).

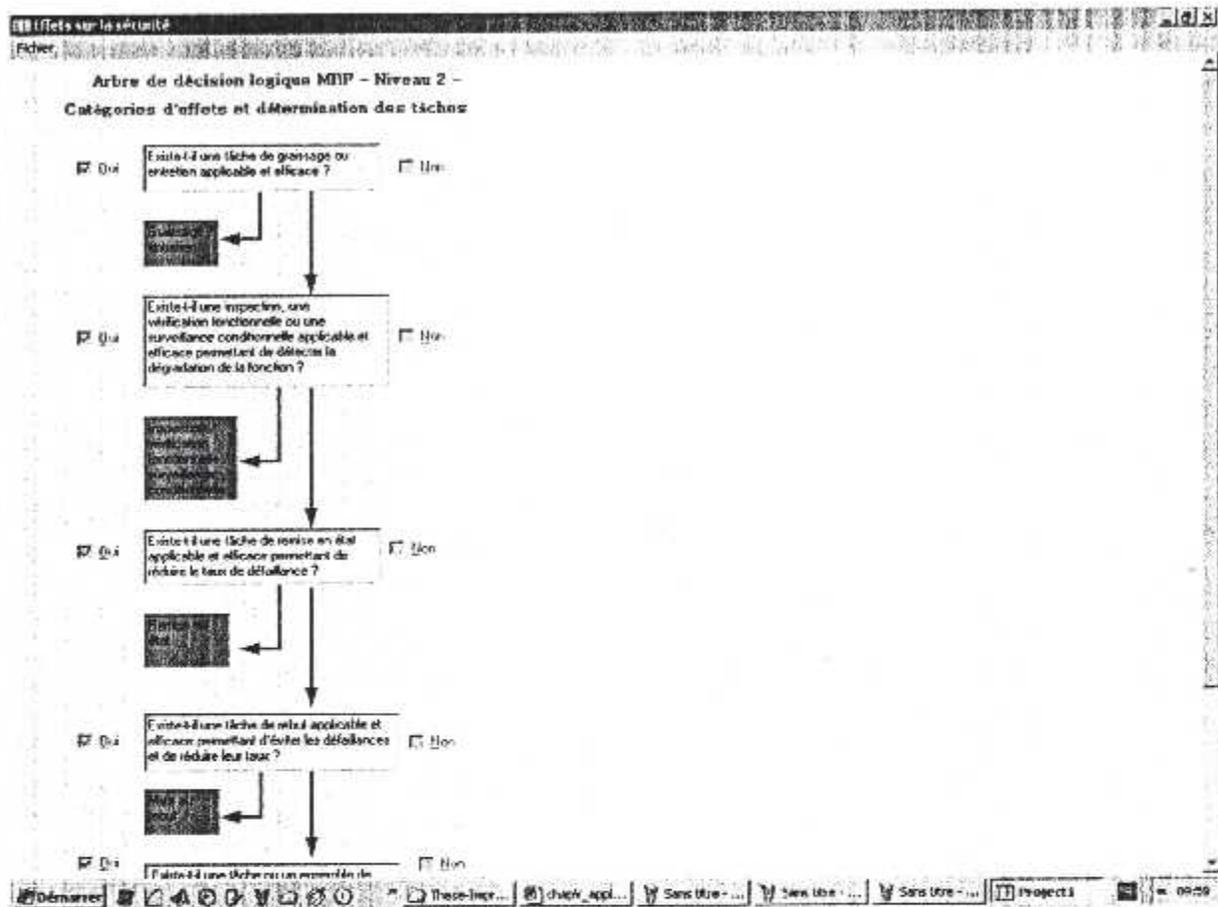
V. 5. Sélection des tâches de maintenance

Un arbre logique de décision (figures (IV.5), (IV.5.a) et (IV.5.b)) est utilisé pour identifier les tâches de maintenance. Dans notre application on a présenté cet arbre dans une interface (Environnement Delphi) qui nous permette de déterminer les tâches de maintenance pour chaque élément prépondérant de maintenance (voir l'interface).

Interface :



Arbre de décision logique - Niveau 1



Arbre de décision logique - Niveau 2

EPM	TACHES		TYPE DE DEFAILLANCE	REMARQUES
	N°	DESCRIPTION		
EPM N° 1	1	Graissage / entretien	Défaillance fonctionnelle évitante Effets sur la sécurité	Il faut appliquer la tâche ou la combinaison des tâches la plus efficace .
	2	Inspection / vérification fonctionnelle / surveillance conditionnelle		
	3	Remise en état		
	4	Mise au rebut		

Sélection des tâches de maintenance

CONCLUSION

CONCLUSION

Nous avons décrit d'une manière que nous avons souhaité précise, concise et complète la méthode MBF.

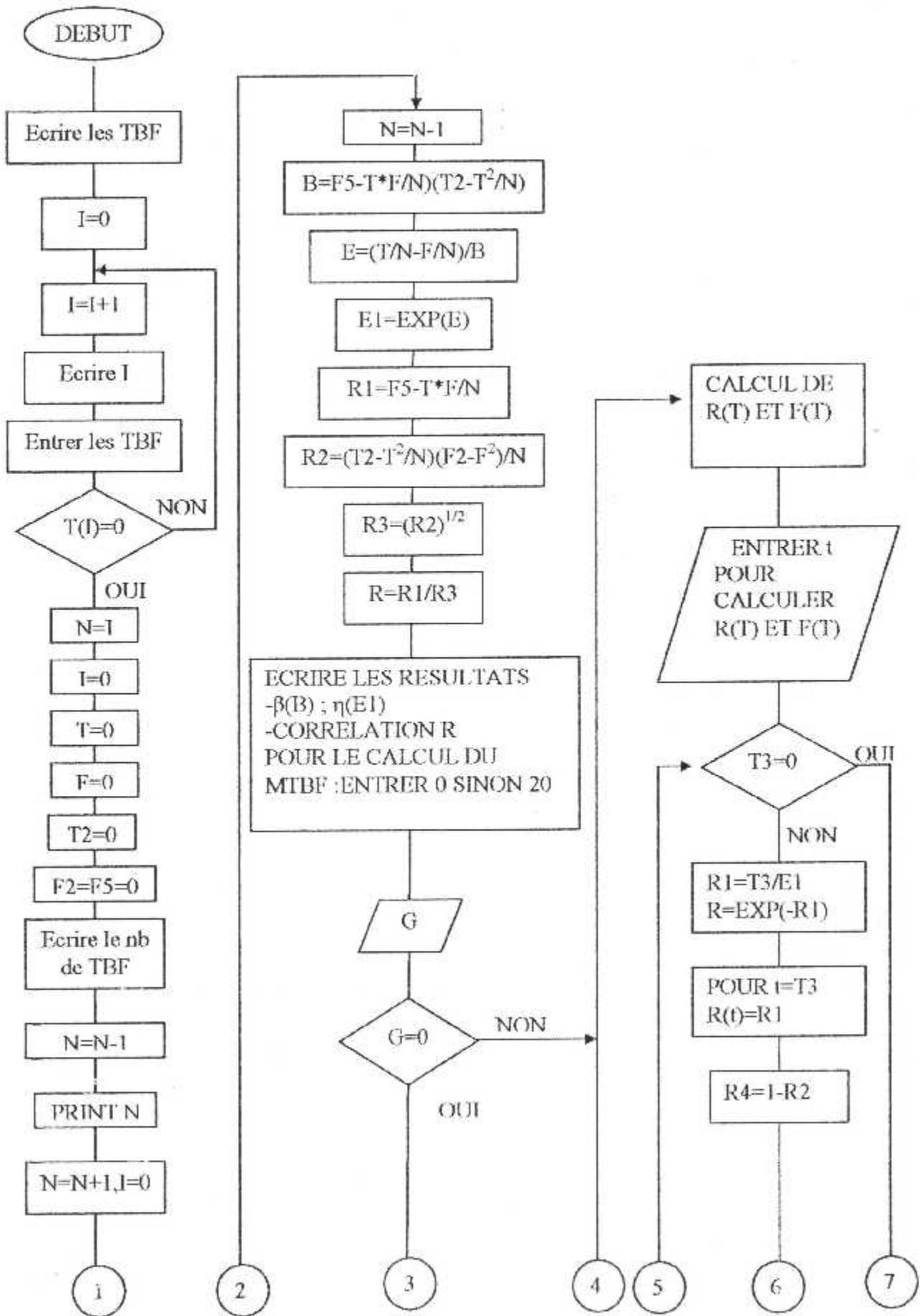
Cette étude nous l'avons nettement orientée dans le sens de l'utilisation qui est celui de l'ingénieur.

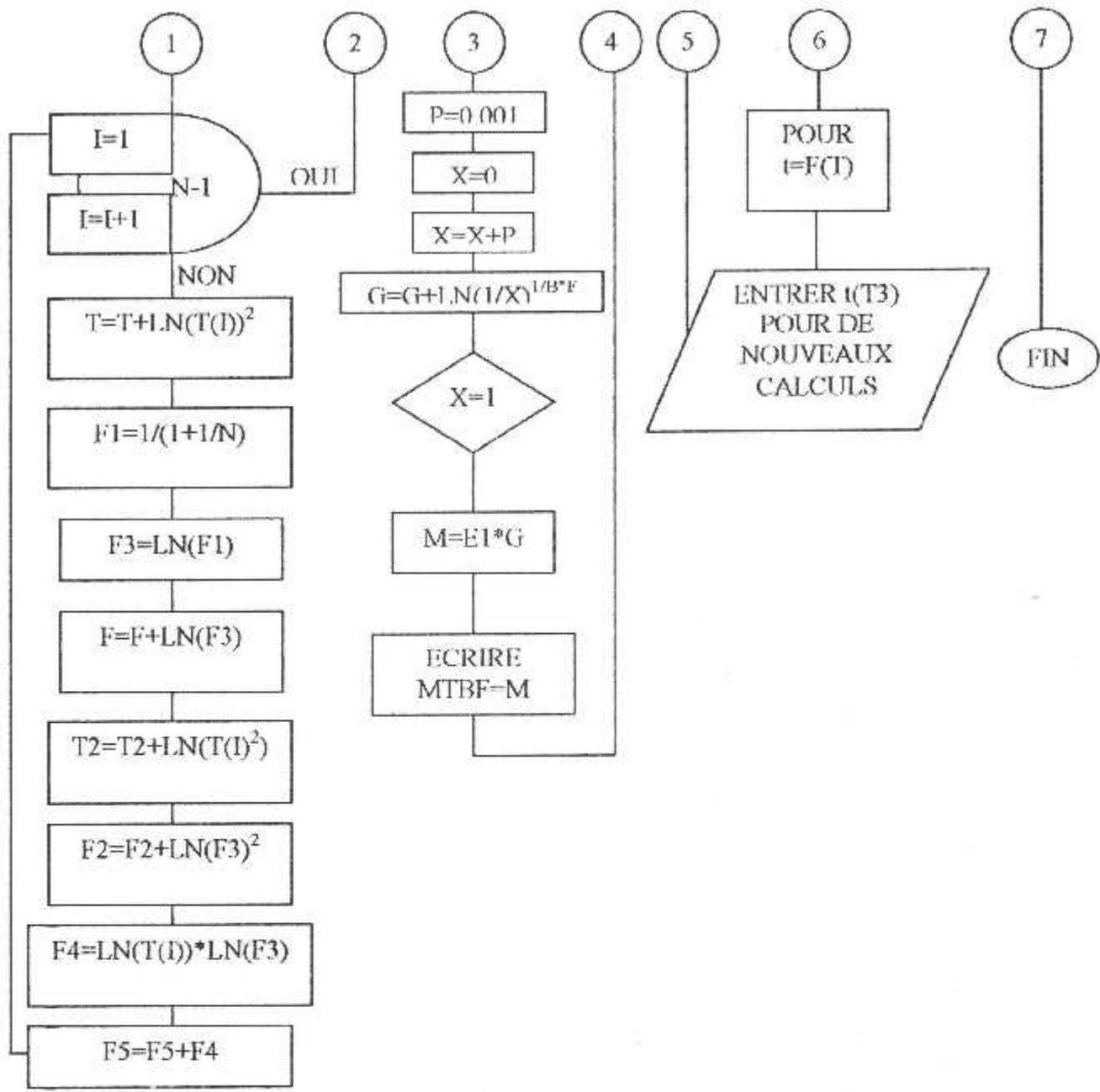
Nous ne sommes donc pas trop étendus sur l'aspect mathématique des différentes approches de fiabilité mais on a montré l'intérêt du retour d'expérience et on a essayé d'analyser cette tâche tout en basant sur les données réelles de dégradation.

Cette étude au sein de d'AIR ALGERIE nous a permis d'aborder quelques problèmes pratiques de fiabilité et savoir la manière de réagir.

ANNEXES

Annexe I : Organigramme pour le calcul des paramètres de Weibull





ANNEXE II : Durée de vie des différents composants du turbofan CF6-80 A3

LIFE LIMITED PARTS										
NOMENCLATURE	S/N	P/N	L.L.	INST. DATE	CSN/AT INST.	PCSN	RPC	REMARKS		
FAN DISK STG 1	MPOP7907	1703M65P03	20000	04/03/1998	9790	9888	10112	ORIGINE 585185		
FAN SPOOL STG 2-5	MPOB1896	9253M35G04	20000	20/09/1983	11777	11875	8126	/		
FAN FWD SHAFT	MPOP0694	9220M32G02	20000	20/09/1983	11777	11875	8126	/		
FAN FAN MID SHAFT	MPOP2017	9228M93P02	20000	20/09/1983	11777	11875	8125	/		
HPCR DISK STG 1	MPOP4185	9228M86P02	20000	20/09/1983	11777	11875	8126	/		
HPCR DISK STG 2	GWNC1170	9228M87P04	20000	20/09/1983	11777	11875	8125	/		
HPCR SPOOL STG 3-9	MPOP1647	9136M89G10	20000	20/09/1983	11777	11875	8126	/		
HPCR DISK STG 10	MPOP2465	9032M49P07	20000	20/09/1983	11777	11875	8126	/		
HPCR SPOOL SHFT11-14	GWNB5476	9225M37G22	20000	06/05/1999	2276	2374	17626	/		
HPCR CDP SEAL DISK	BEAE6097	9218M24P12	20000	20/09/1983	11777	11875	8125	/		
HPTR DISK STG 1	GWNJA019	9362M58G09	15000	06/05/1999	2276	2374	12626	/		
HPTR DISK STG 2	BTAC5442	9362M43P04	15000	15/11/1995	4269	4367	10633	ORIGINE 585152		
HPTR SPAC/IMPELLER	GFFP5917	1539M12P02	15000	15/11/1995	4269	4367	10633	ORIGINE 585152		
HPTR THERMAL SHIELD	MUNBC044	9315M41P20	ILLIM	06/11/1995	4269	4367	ILLIM	ORIGINE 585152		
HPTR DIFF. VANE-RING	SPK67835	9290M28P13	15000	15/11/1995	4269	4367	10633	ORIGINE 585152		
HPTR DIFF. FWD SEAL	PAMC2987	9272M21P08	15000	24/01/1984	14178	14276	724	ORIGINE 585152		
HPTR DIFF. AFT SEAL	PAMC2993	1778M32P03	15000	24/01/1984	14178	14276	724	ORIGINE 585152		
LPTR DISK STG 1	MPOP4698	9224M63P04	20000	28/09/1983	11998	12096	7904	ORIGINE 585150		
LPTR DISK STG 2	MPOP4996	9224M64P03	20000	28/09/1983	11998	12096	7904	ORIGINE 585150		
LPTR DISK STG 3	MPOP5444	9224M65P04	20000	28/09/1983	11998	12096	7904	ORIGINE 585150		
LPTR DISK STG 4	MPOP3782	9224M67P03	20000	28/09/1983	11998	12096	7904	ORIGINE 585150		
LPTR LPT SHAFT	GWNVW9071	9331M27P02	20000	28/09/1983	11998	12096	7904	ORIGINE 585150		
LEFT LINK REAR	138R	224-1608-509	80000	20/06/2003	0	98	79902	ORIGINE 585148		
RIGHT LINK REAR	225R	224-1609-509/511	80000	20/06/2003	0	98	79902	ORIGINE 585148		

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages :

- [1]. J. AUPIED « Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitation », Eyrolles, Paris, 1994.
- [2]. J-L BON, « Fiabilité des systèmes : Méthodes mathématiques », Masson, Paris, 1995
- [3]. A. CHEVALIER, « Guide du dessinateur industriel : Pour maîtriser la communication technique », Hachette technique, Paris, 1998
- [4]. A. LANNOY et H. PROCACCIA, « Méthodes avancées d'analyse des bases de données du retour d'expérience industriel », Eyrolles, Paris, 1994.
- [5]. A. LANNOY, « Analyse quantitative et utilité du retour d'expérience pour la maintenance des matériels et la sécurité », Eyrolles, Paris, 1996.
- [6]. LEHMANN et LEPOURRY, « Technologie des turboréacteurs », ENAC, 1988.
- [7]. P.LYONNET, « La maintenance : Mathématiques et Méthodes », Lavoisier TEC&DOC, Paris 1988.
- [8]. G. ZWINGELSTEIN, « Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels », série Diagnostic et Maintenance, Hermes, Paris, 1995.
- [9]. G. ZWINGELSTEIN, « La maintenance basée sur la fiabilité : guide pratique » série Diagnostic et Maintenance, Hermes, Paris, 1996.

Manuels :

- [1]. AMM, « Airbus Industry », France, 2003.
- [2]. EM, « Airbus Industry ». France, 2003.

Thèses :

- [11]. Conception d'un logiciel pour le suivi de fiabilité des accessoires aéronautiques, Mathématiques appliquées (R.O.), 1995.
- [12]. Etude et analyse statistique de la fiabilité dans la maintenance aéronautique, Mathématiques appliquées (R.O.), 1996.

Sites Internet :

www.geac.com.
www.Boeing.com.
www.cfm.com.
www.AFNOR.FR.
www.IEC.CH.