



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'INGENIEURS
DE
CONSTRUCTIONS AERONAUTIQUES
TOULOUSE

COUT TOTAL DE MAINTENANCE
POUR UN HELICOPTERE

- Constitution d'un modèle de calcul
- Application à la boîte de transmission principale du Super Puma

PAR

Dilek TETIK
ANADOLU UNIVERSITESI
TURQUIE

DECEMBRE 1991



aerospatiale

DIVISION HELICOPTERES
Etablissement de Marignane

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier en premier lieu M. Jacques ANDRES, Directeur du Bureau d'Etudes Coopération Aérospatiale Marignane, pour son aide précieuse sur la réalisation de ce travail.

Je voudrais remercier aussi M. PERROT et M. BARTHOLOMEI pour le soutien qu'ils m'ont témoigné et l'expérience qu'ils m'ont apportée pour la rédaction de ma thèse.

Enfin je remercie Mme BRUNEL pour sa gentillesse et son hospitalité.

Marignane, le 13 décembre 1991

RESUME

La connaissance des coûts et surtout la prévision des coûts est un facteur déterminant pour la réussite de toute entreprise, industrielle principalement.

Cette thèse expose, à l'aide d'exemples pratiques pris sur l'hélicoptère AS 332 Super Puma Mark II de la Division Hélicoptères Aérospatiale de Marignane, deux types de méthodes de calculs de coûts de maintenance :

La première s'appuie sur des hypothèses tirées des expériences antérieures mais vue d'un strict point de vue comptable.

La deuxième s'appuie sur des analyses de fonctionnement, de fiabilité et de maintenance des ensembles constitutifs de l'hélicoptère.

Le but de cette thèse est de mettre en évidence la complémentarité et la cohérence des deux méthodes dans le but de cerner d'une façon toujours plus complète et plus précise les divers coûts, et propose un modèle qui pourra servir de support aux évaluations futures.

Enfin elle situe dans le contexte réel de l'AS 332, l'importance de la connaissance des coûts dans la politique de produit, vue d'une part du constructeur, d'autre part de l'utilisateur.

ABSTRACT

The acknowledgement of the cost and above all the assessment of the costs is a major factor for the success of any undertaking, mainly industrial.

This thesis shows, with practical examples, the helicopters AS 332 Super Puma Mark I and Mark II, of Aérospatiale Helicopter Division, Marignane, two methods of maintenance cost calculations.

The first one is based on hypothesis obtained from previous experiences from a strict financial point of view.

The second one is based on operation, reliability and maintenance analysis of helicopter assemblies.

The aim of this theory is to highlight both the complementarity and the coherency of the 2 methods in order to determine in a more complete accurate way the various costs involved, and provides a model to be used as a support to future assessments.

Finally it confirms, from the practical aspect of the AS 332, the importance of knowing the costs in the product definition from the manufacturer's and the user's point of view

TABLE DES MATIERES

Page

RESUME

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

1.	<u>COUT GLOBAL</u>	1
1.1	Description	1
1.2	But du coût global	1
1.3	Décomposition du coût global	1
1.3.1	Coût d'acquisition	2
1.3.2	Coût total d'exploitation	2
1.3.3	Coût de fin de programme	5

CHAPITRE 2

2	<u>MODELE GLOBAL</u>	6
2.1	Coût d'opération	6
2.2	Coût de maintenance	7

CHAPITRE 3

3	<u>BOITE DE TRANSMISSION PRINCIPALE</u>	11
3.1	Description	11
3.2	Diverses fonctions	11
3.2.1	Fonctions principales	11
3.2.2	Les composants de la B.T.P.	13

CHAPITRE 4

4	<u>ANALYSE DE FIABILITE</u>	19
4.1	Description	19
4.2	Temps moyen de bon fonctionnement (MTBF)	20
4.3	Taux de défaillance	20
4.4	Types de comportement en fiabilité des matériels	21
4.5	Maintenance préventive - MTBUR - MTBR	22
4.6	Le modèle de Weibull	24
4.7	Estimation graphique des paramètres d'une loi de Weibull : technique de dépouillement d'ALAIN PLAIT	25
4.8	L'essai suspendu avec remplacement : méthode de JOHNSON	26

CHAPITRE 5

5	<u>EXEMPLE D'APPLICATION A 1 CAS CONCRET : LA B.T.P. MK1.</u> <u>CALCUL DU COUT DE MAINTENANCE</u>	29
---	---	----

CHAPITRE 6

6	<u>MODES DE DEFAILLANCE</u>	38
6.1	Définition de base	38
6.2	Types de maintenance	38
6.3	Procédures de maintenance	39
6.4	Niveaux de maintenance	40
6.5	Programme de maintenance	41
6.6	Analyse de pannes	43
6.7	Analyse des modes de défaillances	45

<u>CONCLUSION</u>	46
-------------------	----

<u>ANNEXES</u>	47
----------------	----

<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	64
------------------------------------	----

INTRODUCTION

1. DEFINITION

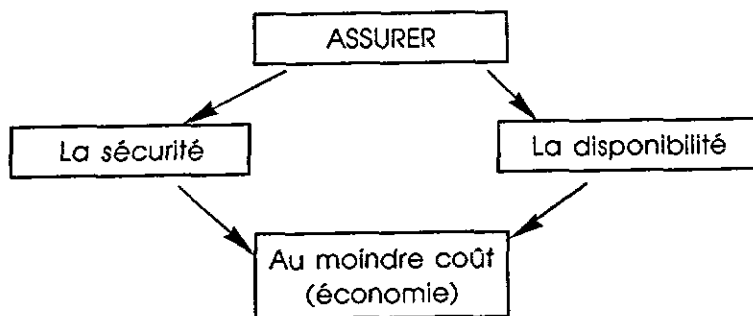
La maintenance d'un aéronef peut être définie comme l'ensemble des actions destinées à maintenir, ou à remettre l'aéronef ou certains de ses éléments, en état d'être exploités normalement (notion d'aptitude au vol) : vérifications, réparations, modifications, révisions, inspections, etc.

2. OBJECTIFS

La sécurité : c'est une exigence réglementaire, et aussi commerciale. L'aéronef doit, au cours du temps, conserver les caractéristiques de navigabilité.

La disponibilité : un aéronef représente un investissement coûteux. Il faut donc rechercher des taux d'utilisation élevés. Pour cela, un aéronef doit être en état d'accomplir sa mission au moment voulu.

L'économie : Il faut trouver le meilleur compromis économique possible entre les deux premiers objectifs et le troisième.



3. ASPECTS ECONOMIQUES

Les choix techniques et d'organisation qui sont faits au début d'un grand programme (aéronautique, naval...) engagent à plus de 90 % le coût total de possession du système étudié. L'enjeu devient alors, d'être capable de critiquer et influencer la définition dès le début des études pour réussir à construire un système dont la rentabilité soit bonne et dont l'efficacité à remplir la mission soit aussi grande que possible.

L'objectif de cette étude est de donner les principes avec lesquels on pourra construire un outil qui permettra d'analyser rapidement l'influence d'un choix technique ou d'une organisation de maintenance sur le coût de possession.

Cet outil devra proposer les paramètres à prendre en compte et vérifier dans quelle mesure on peut les quantifier pour faire l'analyse du coût de possession.

CHAPITRE 1

1 COÛT GLOBAL

1.1 Description

Le coût global d'un aéronef englobe tous les coûts directs et indirects liés à l'acquisition, au fonctionnement, au soutien et à la fin de programme d'un aéronef.

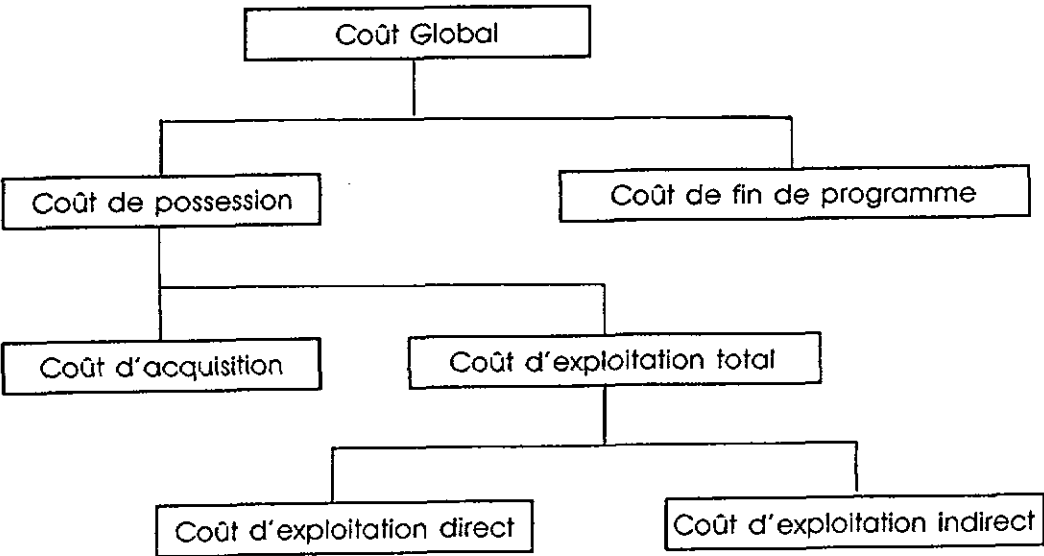
1.2 But du Coût Global

- Aider les concepteurs dès le début de la phase de développement d'un aéronef dans le choix de ses principaux constituants (meilleur compromis coût - performances - sécurité - confort - nuisance, etc...). Les réponses des équipementiers et des motoristes sont analysées dans la même optique.
- Aider les vendeurs à orienter le choix des compagnies aériennes en leur présentant, sous forme d'études comparatives, des simulations complètes du coût global d'acquisition et d'exploitation, durant un même nombre d'années, des aéronefs qu'ils proposent et de leurs concurrents et du coût résiduel à l'issue de cette période.

1.3 Décomposition du Coût Global

Le tableau 1 présente la décomposition du coût global

Tableau 1 : Décomposition du coût global



1.3.1 Coûts d'Acquisition

Tous les coûts supportés par le client du début de la phase de conception jusqu'à la fin de la phase de production, sont généralement considérés comme des coûts d'acquisition.

Les coûts d'acquisition sont divisés en :

- Coûts de recherche et développement.
- Coûts d'investissement.

1.3.1.1 Coûts de Recherche et Développement

Les coûts des phases de définition, démonstration et validation, et de développement à l'échelle d'un processus d'acquisition sont définis par les coûts de recherche et développement.

1.3.1.2 Coûts d'Investissement

Les coûts du soutien initial nécessaire, et, d'établissement d'une capacité initiale de fonctionnement, du développement, de la production réelle de l'aéronef sont considérés comme coûts d'investissement. Cela inclut le coût :

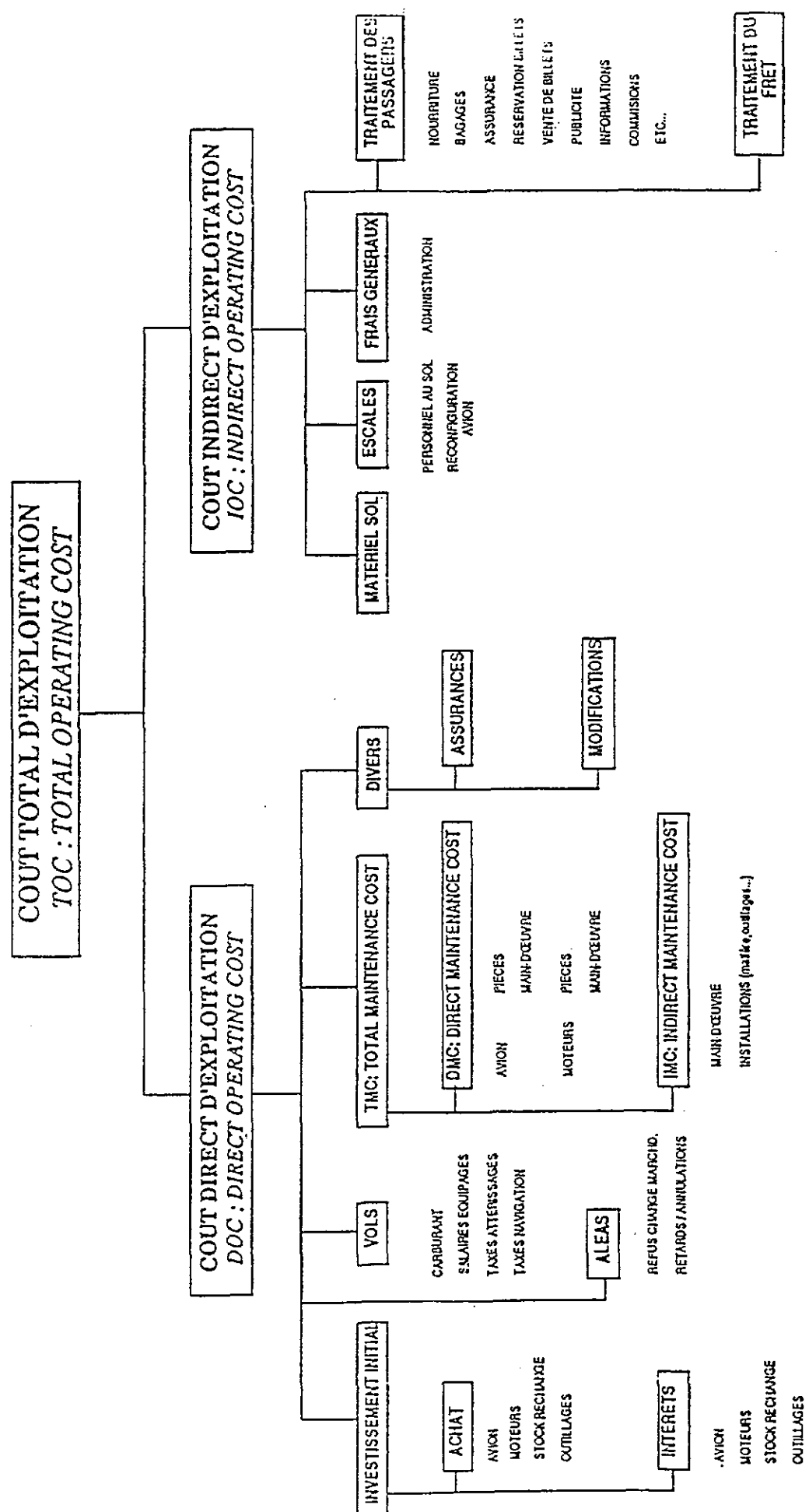
- de fabrication de l'aéronef,
- de l'assemblage et du montage,
- des pièces initiales de rechange,
- des outillages de réparation,
- d'instruction,
- de personnel de maintenance,
- des équipements de soutien,
- de documentation,
- des installations de maintenance,
- de manutention,
- de stockage,
- de transport.

1.3.2 Coût Total d'Exploitation (TOC : Total Operating Cost)

1.3.2.1 Coût Direct d'Exploitation (DOC : Direct Operating Cost)

- Investissement initial
 - Prix d'achat total
 - Prix d'achat total = Achat de l'avion + Moteur + Pièces rechanges
 - Intérêts
 - Intérêts du financement de l'achat total.
- Vols
 - Frais d'équipages techniques et commerciaux
 - Coût du carburant
 - Taxes de navigation et d'aéroports
- Aléas
 - Retards / Annulations consécutifs aux pannes.

Tableau 2 : Décomposition du Coût Total d'Exploitation



- Maintenance

Le coût total de maintenance (TMC : Total Maintenance Cost) est une partie du coût direct d'exploitation (DOC). Il comprend :

 - Le coût direct de maintenance (DMC : Direct Maintenance Cost)
 - Le coût indirect de maintenance (IMC : Indirect Maintenance Cost)
$$DMC + IMC = TMC$$
- Assurances

Frais d'assurances relatifs à l'aéronef, aux rechanges, aux outillages, etc...
- Modifications

Frais d'études, de fabrication, d'essais au sol et en vol, de certification liés à l'application après première livraison de modifications d'origine constructeur, motoriste, équipementiers ou utilisateur visant à améliorer la fiabilité, l'aptitude à la maintenance, les performances ou modifiant le type d'aéronef (remotorisation, changement de configuration, etc...)

Frais de l'assistance technique nécessaire à l'application de ces modifications.

1.3.2.2 Coût Indirect d'Exploitation (IOC : Indirect Operating Cost)

- Matériel au sol

Dépenses relatives au fonctionnement, entretien, location du matériel au sol.
- Escales

Dépenses relatives à la reconfiguration avion pendant l'immobilisation aux escales.

Frais de personnel non navigant
- Frais généraux

Dépenses administratives et générales, assurances et administration des biens, location, fonctionnement et entretien des locaux, frais d'escales.
- Passagers et fret

Dépenses relatives au service passagers et au fret :

Assurances des passagers et du fret, frais d'embarquement, de transit, de restauration et de distraction des passagers, dépenses relatives à la billetterie, frais d'agences et de publicité, frais dus aux vols retardés ou annulés (transport, hébergement des passagers).

1.3.2.2.1 Coût Direct de Maintenance (DMC)

Le coût direct de maintenance comprend :

- Les dépenses de main-d'oeuvre technique :

Les tâches de maintenance programmées, pour la remise en état ou la réparation de la cellule (structure et systèmes), des équipements et des moteurs.

L'application des modifications impératives pour des raisons de sécurité.

Les frais de l'assistance technique du constructeur, du motoriste et des équipementiers pour les travaux de maintenance et de réparation.

- Les dépenses en pièces de rechanges, et en éléments consommables, réparables et révisables effectivement utilisés pour l'entretien, les révisions et les réparations de la cellule (structure et systèmes), des équipements et des moteurs.

1.3.2.2.2 Coût Indirect de Maintenance (IMC)

Le coût indirect de maintenance comprend :

- Le coût du personnel (Ingénieurs, Dessinateurs, Magasiniers, Administratifs, etc...) et le coût d'instruction du personnel de maintenance.
- Les dépenses d'entretien, de réparation, des outillages, les dépenses de magasinage, énergie, télécommunication, frais de bureau...
- Les dépenses d'infrastructures, d'entretien des installations, des véhicules.
- Les dépenses administratives liées aux recours de garantie.
- Les frais de transport

1.3.3 Coût de Fin de Programme

Ce coût est souvent ignoré. Le coût de fin de programme est le coût d'un aéronef lorsque celui-ci est obsolète ou remplacé.

Dans certains cas, l'équipement peut avoir une valeur de récupération ou de revente qui peut modifier légèrement le coût de fin de programme.

Les coûts types intervenant dans le coût de fin de programme sont, par exemple :

- Inventaire,
- Conditionnement, manutention,
- Stockage et transport,
- Gestion des données
- Remise en état,
- Démilitarisation,
- Gestion des rebuts.

CHAPITRE 2

2 MODELE GLOBAL : Opération et maintenance

$$C_O = C_{OO} + C_{OM} + C_{ON} + C_{OP}$$

—————> retrait
—————> modification

C_O : Coût d'opération et de maintenance.
 C_{OO} : Coût d'opération.
 C_{OM} : Coût de maintenance.

2.1 COO : Coût d'opération

$$C_{OO} = C_{OOP} + C_{OOT} + C_{OOF} + C_{OOE}$$

C_{OOP} : Coût du personnel.
 C_{OOT} : Coût de la formation du personnel d'opération.
 C_{OOF} : Coût d'installation.
 C_{OOE} : Coût d'équipement et soutien et de manutention.

2.1.1 Détail de chaque paramètre

1. C_{OOP} : Coût du personnel.

$$C_{OOP} = T_O \cdot C_{PO} \cdot Q_{PO} \cdot N_{PO}$$

T_O : Durée d'opération.
 C_{PO} : Coût d'opération.
 Q_{PO} : Nombre d'opérateurs/systèmes.
 N_{PO} : Nombre d'opérations.

2. C_{OOT} : Coût de la formation du personnel d'opération.

$$C_{OOT} = Q_{SO} \cdot T_T \cdot C_{TOP}$$

Q_{SO} : Nombre d'étudiants.
 T_T : Durée du programme de formation (semaine).
 C_{TOP} : Coût de la formation (FF/étudiant-semaine).

3. COOF : Coût d'installation.

$$COOF = C_{PPF} \cdot NOS \cdot S_O$$

C_{PPF} : Coût par m² par site.

NOS : Nombre de sites.

S_O : Surface.

4. COOE : Coût d'équipement de soutien et de manutention.

$$COOE = COOU + COOS$$

$COOU$: Coût de l'équipement pour la maintenance corrective.

$COOS$: Coût de l'équipement pour la maintenance préventive.

$$COOU = (Q_{CA} \cdot M_{MHC} \cdot C_{OCP} + Q_{CA} \cdot C_{MHC} + Q_{CA} \cdot C_{DC}) \times NOS$$

Q_{CA} : Nombre d'actions correctives.

M_{MHC} : Maintenance corrective en "heures x hommes" par action de maintenance.

C_{OCP} : Coût du travail par action de maintenance corrective.

C_{DC} : Coût de la documentation par action de maintenance corrective.

NOS : Nombre de sites opérationnels.

Pour la maintenance préventive ;

$$COOS = (Q_{PA} \cdot M_{MHP} \cdot C_{OPP} + Q_{PA} \cdot C_{MHP} + Q_{PA} \cdot C_{DP}) \times NOS$$

2.2 COM : Coût de maintenance (Voir annexe 1)

$$COM = COMM + COMX + COMS + COMT + COMP + COMF + COMD$$

$COMM$: Coût du personnel de maintenance.

$COMX$: Coût des rechanges et de leur gestion.

$COMS$: Coût des moyens de test et outillages de maintenance.

$COMT$: Coût de transport et manutention.

$COMP$: Coût de la formation à la maintenance.

$COMF$: Coût d'installation.

$COMD$: Coût de gestion des données techniques.

2.2.1 Détail de chaque paramètre

1. COMM : Personnel de maintenance.

$$COMM = COOU + COOS$$

COOU : Coût du personnel pour la maintenance corrective.

COOS : Coût du personnel pour la maintenance préventive.

$$COOU = (QCA \cdot MMHC \cdot COCP + QCA \cdot CMHC + QCA \cdot CDC)NMS$$

QCA : Nombre d'actions correctives.

MMHC : Maintenance corrective en "heures x hommes" par action de maintenance.

COCP : Coût du travail par action de maintenance corrective.

CDC : Coût de la documentation par action de maintenance corrective.

NMS : Nombre de sites de maintenance.

Pour la maintenance préventive ;

$$COOS = (QPA \cdot MMHP \cdot COPP + QPA \cdot CMHP + QPA \cdot CDP) NMS$$

2. COMX : Coût des rechanges et de leur gestion

$$COMX = SCO + CSI + CSD + CSS + CSC$$

C_{SO} : Coût des rechanges au niveau "organisationnel".

C_{SI} : Coût des rechanges au niveau "intermédiaire".

C_{SD} : Coût des rechanges au niveau "dépôt".

C_{SS} : Coût des rechanges chez le fournisseur.

C_{SC} : Coûts des consommables.

$$C_{SO} = \sum_{NMS} \left[\sum_i C_{Mi} \cdot Q_{Mi} + \sum_i C_{Hi} \cdot Q_{Mi} \right]$$

C_{Mi} : Coût de la rechange élément i.

Q_{Mi} : Nombre d'éléments i demandés/commandés.

C_{Hi} : Coût de stockage de l'élément i.

Même formule pour les autres niveaux.

3. COMS : Coût des moyens de test et outillages de maintenance

$$COMS = C_{SEO} + C_{SEI} + C_{SED}$$

C_{SEO} : Coût des moyens de test de maintenance au niveau "organisationnel".

C_{SEI} : Coût des moyens de test de maintenance au niveau "intermédiaire".

C_{SED} : Coût des moyens de test de maintenance au niveau "dépôt".

$$C_{SEO} = C_{COU} + C_{COS}$$

C_{COU} : Coût des moyens de test pour la maintenance corrective.

C_{COS} : Coût des moyens de test pour la maintenance préventive.

$$C_{COU} = (Q_{CA} \cdot M_{MHC} \cdot C_{OCP} + Q_{CA} \cdot C_{MHC} + Q_{CA} \cdot C_{DC}) \cdot N_{MS}$$

Q_{CA} : Nombre d'actions correctives.

M_{MHC} : Maintenance corrective en "heures x hommes" par action de maintenance.

C_{PCP} : Coût du travail par action de maintenance.

C_{DC} : Coût de la documentation par action de maintenance corrective.

N_{MS} : Nombre de sites de maintenance.

Pour la maintenance préventive ;

$$C_{COS} = (Q_{PA} \cdot M_{MHP} \cdot C_{OPP} + Q_{PA} \cdot C_{MHP} + Q_{PA} \cdot C_{DP}) \cdot N_{MS}$$

C_{SEI} et C_{SED} sont déterminés de manière analogue

4. COMT : Coût de transport et manutention.

$$COMT = C_T \cdot Q_T + C_P \cdot Q_T$$

C_T : Coût de transport.

Q_T : Nombre d'aller simple.

C_P : Coût de l'emballage.

5. COMP : Coût de la formation à la maintenance.

$$COMP = Q_{SM} \cdot T_T \cdot C_{TOM}$$

Q_{SM} : Nombre d'étudiants (maintenance)

T_T : Durée du programme de formation (semaine).

C_{TOM} : Coût de la formation (FF/étudiant-semaine).

6. COMF : Coût d'installation.

$$\text{COMF} = \text{CPPO} \cdot \text{NMS} \cdot \text{SO}$$

CPPO : Coût du travail de maintenance.
NMS : Nombre de sites de maintenance.
SO : Surface.

7. COMD : Coût de gestion des données techniques.

$$\text{COMD} = (\text{COMP} + \text{COMS}) \cdot \text{NMS}$$

COMP : Coût d'opérateur par centre de maintenance.
COMS : Coût d'un ordinateur.
NMS : Nombre de sites de maintenance.

CHAPITRE 3

3. BOITE DE TRANSMISSION PRINCIPALE (B.T.P.)

3.1 Description

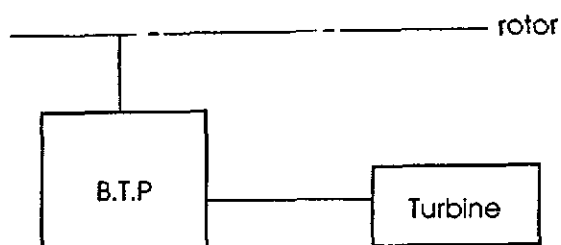
La puissance nécessaire de l'hélicoptère est transmise au moyeu rotor principal à partir de la boîte de transmission principale.

La B.T.P. Est installée entre les moteurs et le rotor

3.2 Diverses fonctions

3.2.1 Fonctions principales

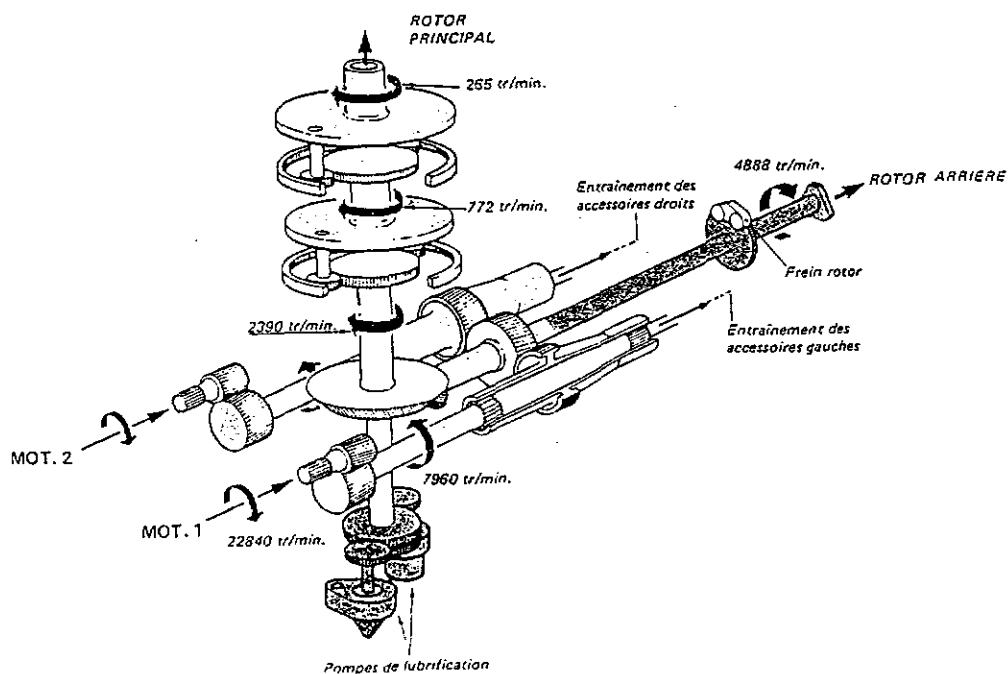
- Transmission de puissance



La B.T.P. transmet la puissance des moteurs aux rotors avec renvoi d'angle à $\frac{n}{2}$

- Réduction de vitesse

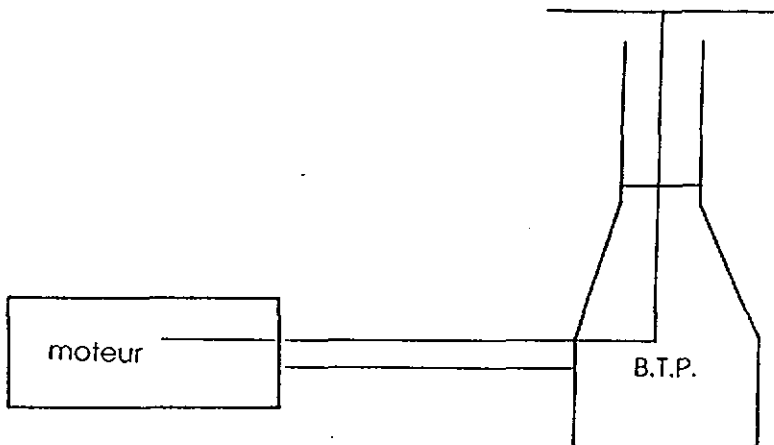
La figure ci-dessous présente la B.T.P. Du Super Puma MKI ; elle réduit la vitesse de rotation de 22840 tr/min (sortie turbine) à 265 tr/min (arbre rotor) - Les étages de réduction intermédiaire sont explicités sur le schéma ci-dessous :



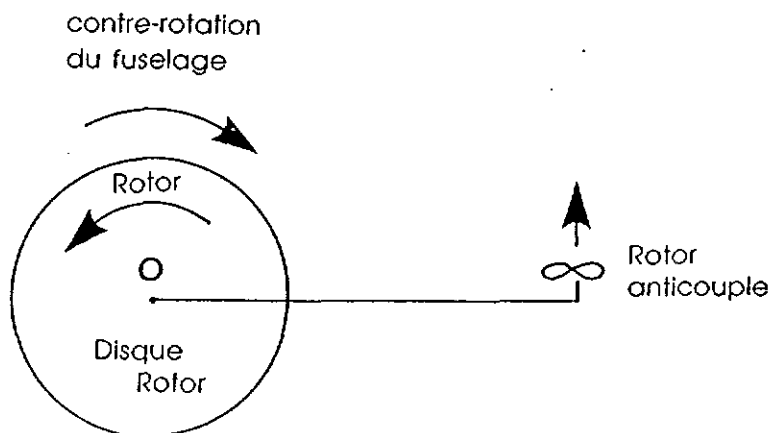
- Passage des efforts

Le moteur fixé sur la structure produit un couple moteur utilisé pour mettre en rotation le rotor, appliqué sur l'entrée de la B.T.P.

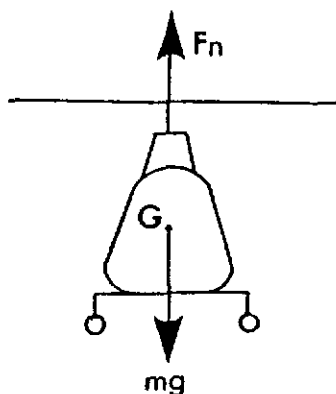
Le moyeu rotor principal reçoit de la B.T.P (boîte de transmission principale) un couple de rotation qu'il transmet aux pales, ce qui assure la sustentation de l'hélicoptère



La réaction du rotor produit un couple qui a tendance à faire tourner le fuselage en sens inverse de celui du rotor. En effet ce couple passe par le carter de la B.T.P., puis par le B.B.Q., puis par le fuselage jusqu'au rotor AR. Afin de compenser le couple rotor principal, les constructeurs installent généralement à l'arrière du fuselage un rotor anticouple (rotor arrière)



Les forces en présence sont le poids de l'appareil appliqué au centre de gravité et la portance du rotor qui est appliquée au centre du rotor.



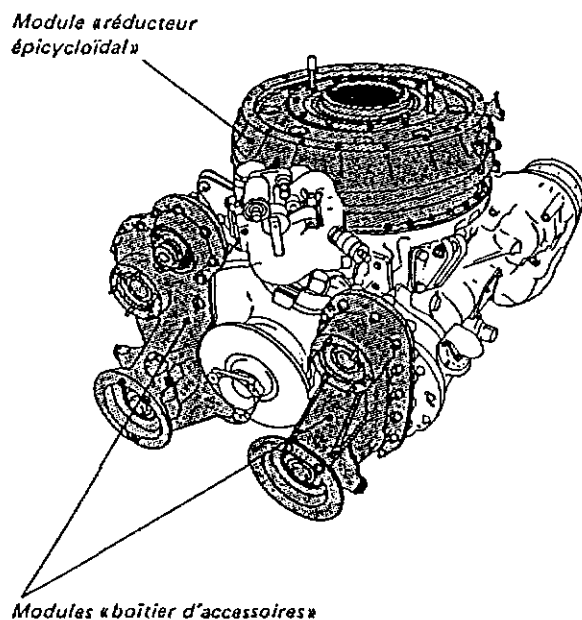
L'ensemble « B.T.P. - rotor principal » est attaché à la structure au niveau du mât rotor par trois barres rigides qui transmettent à la structure la portance du rotor.

3.2.2 Les composants de la B.T.P.

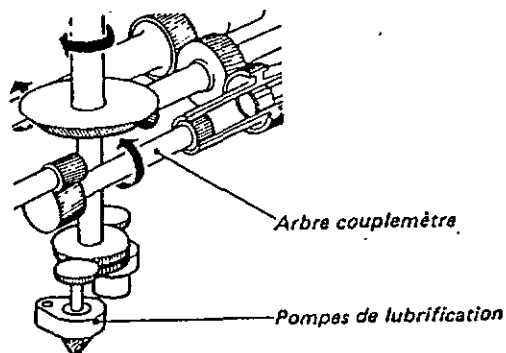
3.2.2.1 Les modules interchangeables de la B.T.P.

La B.T.P. Est de conception modulaire. On peut remplacer (sans réglage ni outillage spécial) certains sous-ensembles et éviter le retour en usine de l'ensemble de la boîte ce qui doit conduire à une réduction des coûts d'entretien et des temps d'immobilisation.

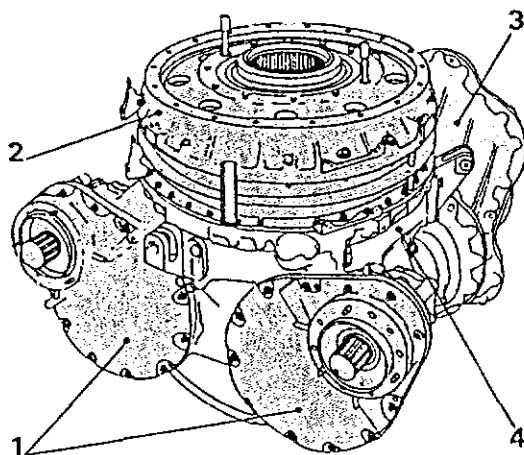
Ainsi on peut remplacer le module « Réducteur épicycloïdal » et les modules « boîtier d'accessoires ».



On peut, également, remplacer les pompes de lubrification et les arbres d'entrée des roues libres dits « arbres couplemètres » car c'est à leur niveau que se fait la mesure du couple moteur.



3.2.2.2 Cinématique des chaînes de puissance

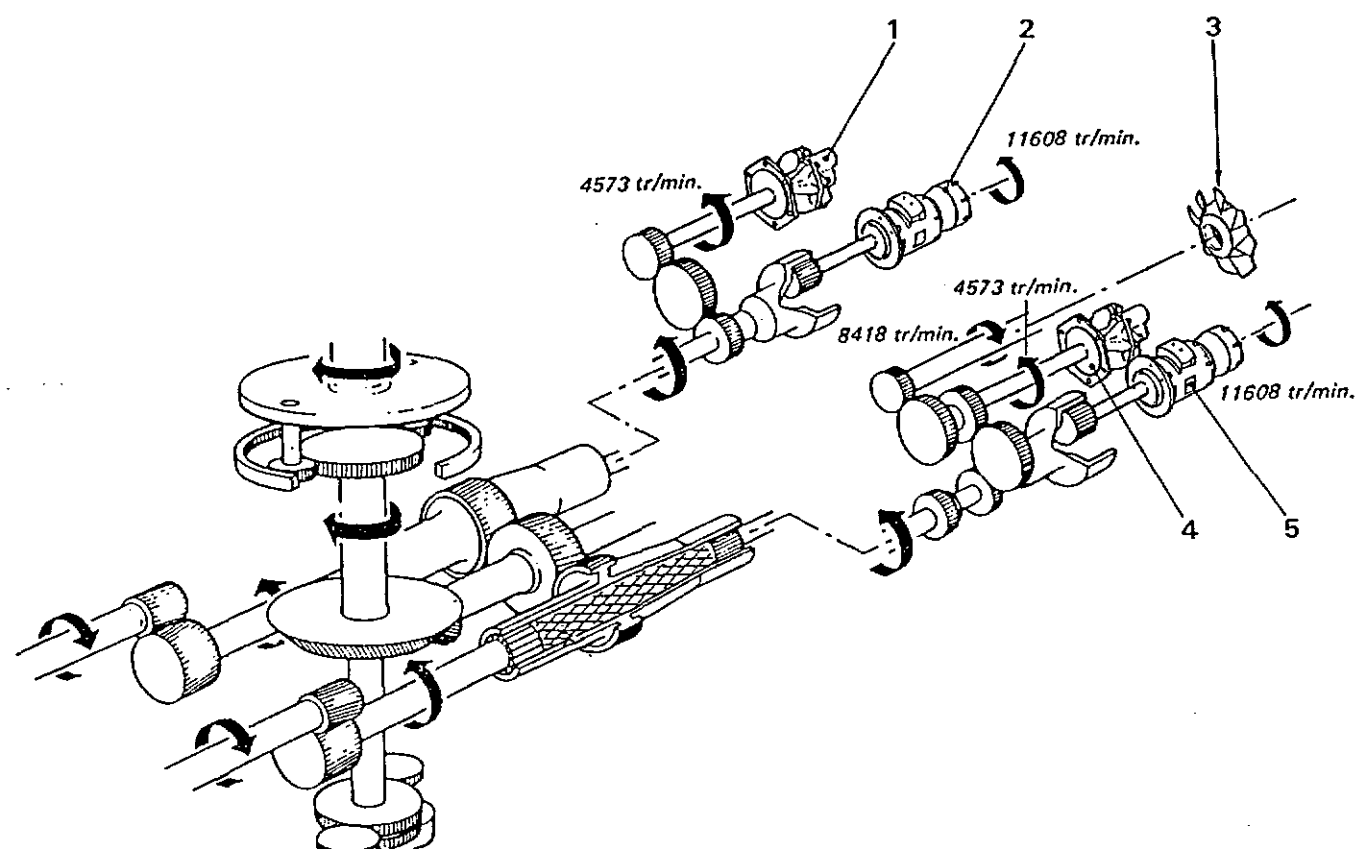


- 1 - Réducteurs avant droit et gauche
- 2 - Réducteur épicycloïdal (2 étages)
- 3 - Réducteur arrière
- 4 - Réducteur principal (couple conique principal)

3.2.2.3 Cinématique d'entraînement des accessoires

La B.T.P. entraîne également deux pompes qui assurent sa lubrification et des accessoires : deux alternateurs pour l'énergie électrique alternative, deux pompes hydrauliques pour l'énergie hydraulique circuit gauche et circuit droit qui sont indépendants, un ventilateur qui envoie l'air de refroidissement du radiateur pour refroidir l'huile de lubrification de la B.T.P.

La figure ci-dessous présente les accessoires de la B.T.P.



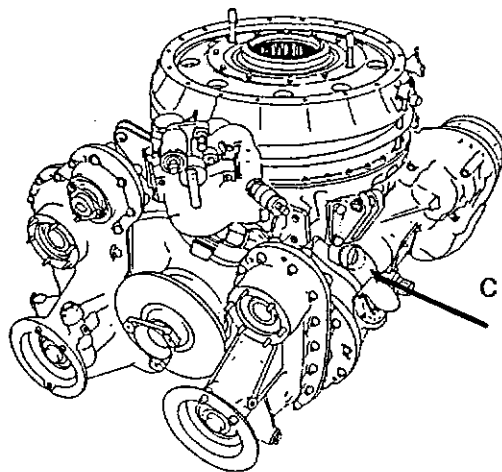
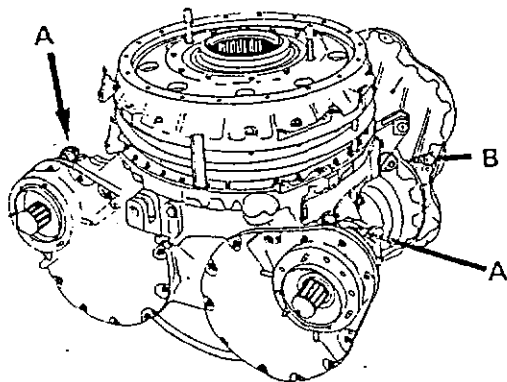
- 1 et 4 Pompes hydrauliques
- 2 et 5 Alternateurs
- 3 Ventilateurs

3.2.2.4 Points de surveillance des pignons de puissance

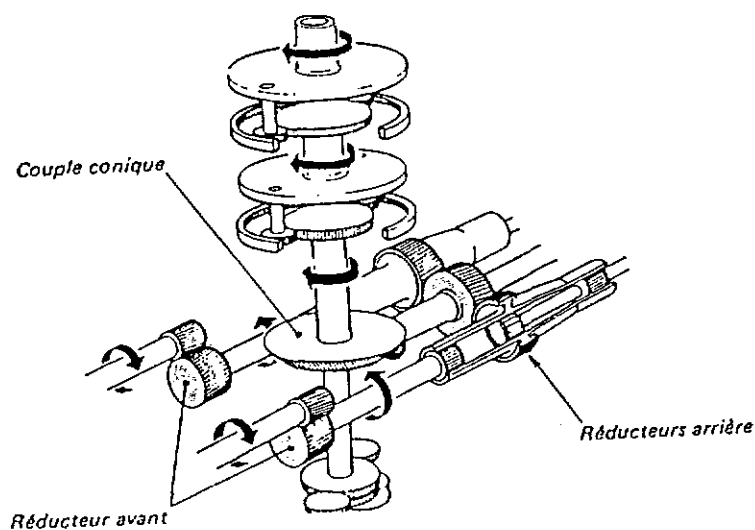
La B.T.P. Est équipée de bouchons de visite permettant d'examiner la denture des pignons de puissance à l'aide d'un endoscope.

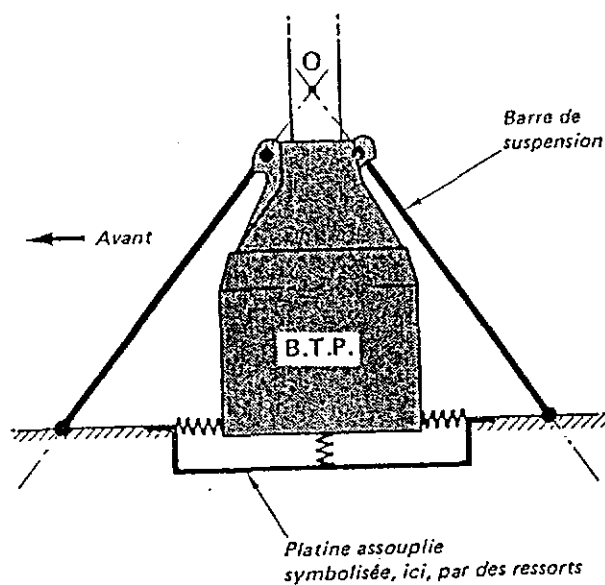
Cet examen peut, en particulier, lever le doute sur l'origine des particules découvertes dans l'huile et orienter les interventions de maintenance.

Les figures ci-dessous présentent les orifices de la B.T.P.



- Par les orifices A, on voit les réducteurs avant.
- Par l'orifice B, on voit le réducteur arrière.
- Par l'orifice C, on voit le couple conique principal.





La B.T.P. oscille longitudinalement autour du point O (point de concours des barres de suspension) grâce à la souplesse apportée par le B.B.Q.
 La raideur du B.B.Q. est définie de telle sorte que, les efforts d'inertie de la B.T.P. soient en opposition de phase par rapport aux efforts d'excitation du moyeu rotor principal. Donc le fuselage sera excité par la différence entre le moment d'excitation du rotor et le moment d'inertie de la B.T.P.

CHAPITRE 4

4 ANALYSE DE FIABILITE

4.1 Description

La fiabilité d'un matériel est la probabilité pour qu'il remplisse sa fonction pendant un temps donné dans des conditions d'utilisation spécifiées.

C'est en fait la probabilité de ne pas avoir de panne pendant un temps de fonctionnement t donné.

Cette définition de la fiabilité est une définition théorique. Pratiquement, dans le cas de la fiabilité, on ne prend pas en compte la restriction relative aux conditions d'utilisation, conditions d'utilisation qui englobent entre autres, des facteurs tels que :

- la qualité de la maintenance,
- le type de mission des appareils,
- les conditions climatiques.

On calcule en général une fiabilité "moyenne", toutes conditions d'utilisation confondues.

Le rapport

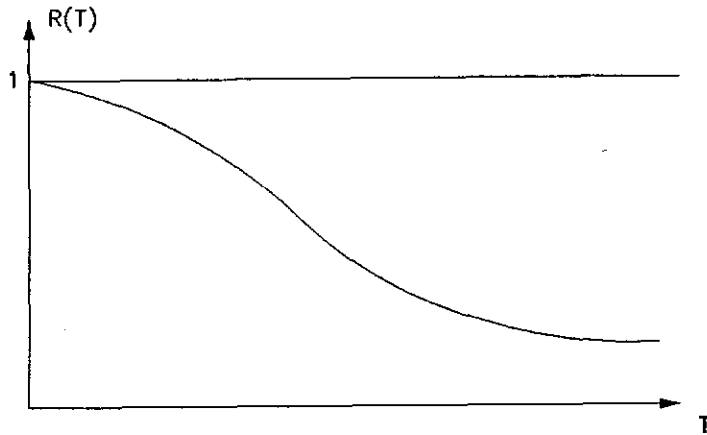
$$R(t) = \frac{N(t)}{N_0}$$

qui représente le pourcentage d'équipements encore en fonctionnement à l'instant t , avec

$N(t)$: le nombre d'équipements fonctionnant de manière satisfaisante.

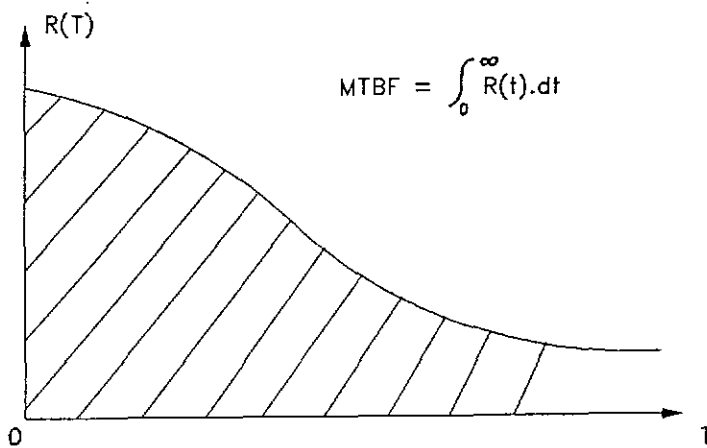
N_0 : le nombre initial de dispositifs mis en essai.

est un estimateur de la fiabilité à t . On le note $R(t)$. Sa fonction fiabilité $R(t)$ a pour allure,



4.2 Temps moyen de bon fonctionnement (MTBF)

Le temps moyen de bon fonctionnement ou MTBF (Mean Time Between Failure) représente le temps au bout duquel se produit la défaillance. On démontre que le MTBF est représenté par la surface située sous la courbe $R(t)$.



Dans le cas d'un essai complet où tous les équipements sont testés jusqu'à défaillance, le MTBF peut s'obtenir en faisant la moyenne des heures de défaillance.

$$MTBF = \frac{\sum \text{heures de défaillance}}{\text{NB de défaillances}}$$

4.3 Taux de défaillance

Une notion importante de la fiabilité est celle du taux de défaillance (Failure Rate)

Le taux de défaillance est la probabilité pour qu'un équipement qui est encore en fonctionnement à l'instant t , tombe en panne pendant la période de temps comprise entre t et $t + \Delta t$

Si $N(t)$ et $N(t + \Delta T)$ sont respectivement le nombre d'équipements encore en fonctionnement à t et $t + \Delta t$ le rapport,

$$\frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)} = \frac{\text{Nb de défaillances entre } t \text{ et } t + \Delta t}{N(t)}$$

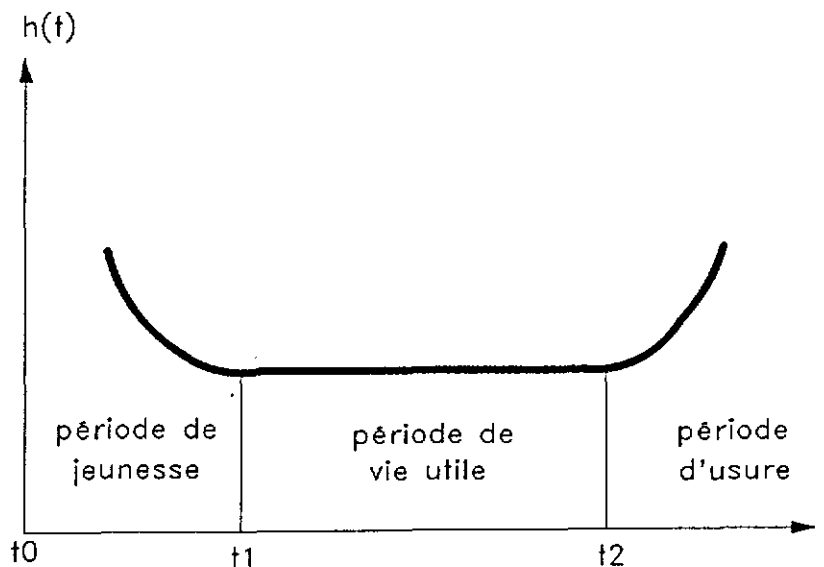
qui représente le pourcentage d'équipements encore vivants à t et qui sont tombés en panne entre t et $t + \Delta t$, est un estimateur du taux de défaillance sur l'intervalle $t, t + \Delta t$. On ramène toujours le taux de défaillance à l'unité de temps soit

$$\frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}$$

4.4 Types de comportement en fiabilité des matériels

L'intérêt du taux de défaillance est qu'il indique l'évolution de la probabilité de panne d'un équipement en fonction de son âge.

Des études expérimentales ont permis de montrer que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps était, dans sa forme la plus générale, donnée par la courbe ci-dessous dite "courbe en baignoire". On distingue sur cette courbe trois périodes caractéristiques.



La période de jeunesse (Early failure period, Infant mortality)

Une première période entre t_0 et t_1 où le taux de défaillance diminue. La probabilité de panne décroît avec le nombre d'heures de fonctionnement de l'équipement. C'est la période de jeunesse où les défaillances sont essentiellement dues à des problèmes de qualité : techniques de fabrication, contrôles insuffisants, pièces de qualité insuffisante. Pour éliminer les défaillances de jeunesse, pour des fabrications demandant une bonne fiabilité, on a recours au déverminage.

La période de vie utile (Product life)

Une seconde période entre t_1 et t_2 où le taux de défaillance est constant. La probabilité de panne est indépendante du nombre d'heures de fonctionnement de l'équipement (pannes aléatoires). Cette période appelée période de vie utile, est "longue" pour l'électronique mais quasiment inexistante pour la mécanique.

La période d'usure (Wearout failure period)

Une troisième période après t_2 où le taux de défaillance augmente avec le temps. C'est la période d'usure de l'équipement où la probabilité de panne augmente avec le nombre d'heures de fonctionnement. Autrement dit, plus l'équipement est vieux plus on a de chance d'avoir une panne. Ce type de comportement est caractéristique des mécaniques ou des matériels qui fonctionnent dans un environnement difficile (cas de l'hélicoptère où le niveau vibratoire est parfois important).

4.5 Maintenance préventive – MTBR – MTBUR

Lorsqu'une défaillance a des conséquences graves pour la sécurité de l'appareil, il est impératif que la probabilité pour que cette défaillance survienne soit faible. Pour que cette probabilité soit faible il faut déposer les équipements de manière préventive. On affecte à l'équipement un potentiel (TBO = Time Between Overhaul) ou une durée de vie (SLL = Service Life Limit).

En plus de ces impératifs de sécurité, souvent prépondérants, une maintenance préventive peut-être justifiée par des considérations économiques lorsque les deux conditions suivantes sont réunies :

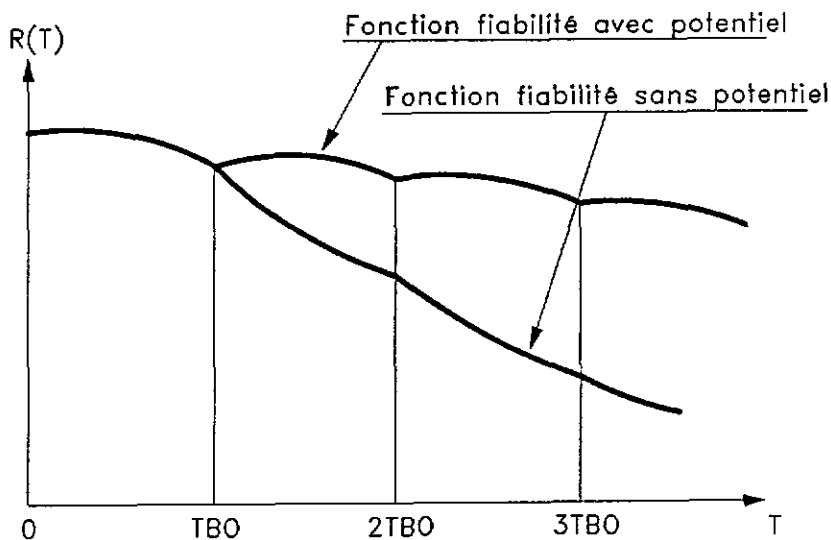
- Le remplacement préventif et planifié d'un dispositif réalisé à des dates bien déterminées doit coûter moins cher qu'un remplacement aléatoire qu'il faut quelquefois effectuer à un moment critique.
- Le taux de défaillance du dispositif sur lequel on veut programmer une maintenance préventive doit présenter un accroissement dû à l'usure.

4.5.1 MTBUR - MTBR

Si on affecte un potentiel à un équipement, cela signifie que les équipements sont déposés au plus tard au potentiel. On se trouve en présence de déposes programmées (Unscheduled Removals) correspondant au pourcentage d'équipements qui sont tombés en panne avant d'arriver au potentiel et en présence de déposes programmées (Scheduled Removals) correspondant au pourcentage d'équipement qui sont arrivés au potentiel. On introduit alors deux notions liées au potentiel : le MBUR et le MTBR

4.5.1.1 MTBUR (Mean Time Between Unscheduled Removal)

Le MBUR est le temps entre déposes non programmées. Si on fait un essai de fiabilité en appliquant un potentiel, à chaque TBO, les équipements encore en vie sont remplacés. On obtient alors une nouvelle fonction de fiabilité qui a l'allure définie ci-dessous



4.5.1.2 MTBR (Mean Time Between Removal)

Le MTBR est le temps moyen entre deux déposes, que ces déposes soient dues à une défaillance, ou pour fin de potentiel.

Au bout d'une durée d'essai égale au potentiel, tous les équipements ont été déposés soit pour défaillance soit pour fin de potentiel. On peut estimer dans le cas d'un essai complet le MTBR, par le rapport suivant :

$$MTBR = \frac{\Sigma \text{ heures pour défaillance et fin de potentiel}}{\text{Nombre d'équipements en essai}}$$

Remarque 1 :

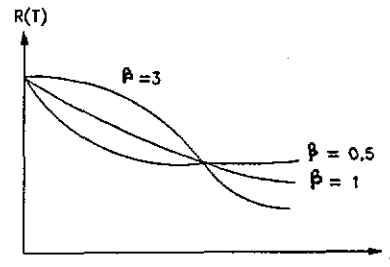
Le MTBR est toujours inférieur ou égal au MTBF. Ceci est intuitif, car on ne laisse pas les équipements aller jusqu'à la défaillance ; leur temps moyen d'utilisation est donc plus court. Pour la même raison, le MTBUR est toujours supérieur ou égal au MTBF.

4.6 Le modèle de Weibull

Il existe de nombreux modèles en fiabilité, mais l'un d'entre eux permet de couvrir la majorité des cas usuellement rencontrés. Il s'agit du modèle de Weibull à trois paramètres. La fonction fiabilité est alors modélisée par

$$R(T) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta}$$

avec $t \geq \delta$



- $\beta > 0$: Paramètre de forme (Shape parameter).
- $\eta > 0$: Paramètre d'échelle (Scale parameter, Characteristic life).
- $\delta \geq 0$: Décalage (Minimum life, Location parameter).

4.6.1 Paramètre de forme

Le paramètre de forme de la loi de Weibull caractérise le type de comportement en fiabilité de l'équipement.

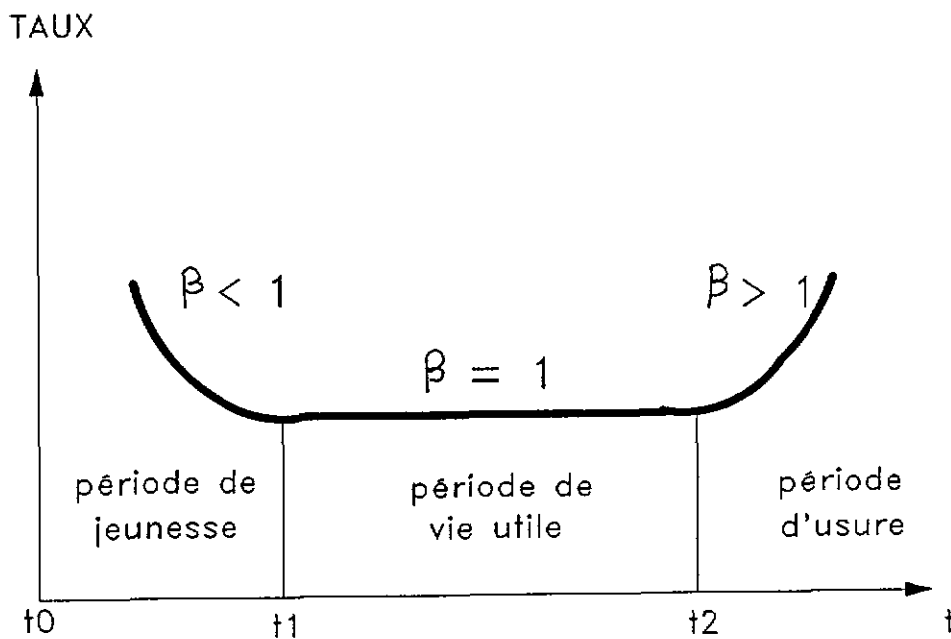
- $\beta < 1$: le taux de défaillance est décroissant, le matériel a des pannes de jeunesse.
- $\beta = 1$: le taux de défaillance est constant. Les pannes aléatoires.
- $\beta > 1$: le taux de défaillance est croissant. Le matériel a un comportement du type usure.

4.6.1.1 Paramètre d'échelle, MTBF

Le MTBF se déduit du paramètre d'échelle η à partir de la formule suivante.

$$MTBF = \delta + \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Les valeurs de $\Gamma(1 + 1/\beta)$ sont données dans le chapitre 5.



4.6.2 Décalage

En général le décalage est nul. Néanmoins, lorsque celui-ci existe, cela signifie qu'il ne peut pas y avoir de défaillance pour un temps de fonctionnement t inférieur au décalage. Il est préférable quand cela arrive qu'il y ait une signification physique.

On peut trouver un décalage par exemple lorsque la défaillance est liée à la taille d'une crrique. La dépose a lieu lorsque la crrique a atteint une taille crrique prédéfinie. Compte tenu de la vitesse de propagation de la crrique, il est possible de ne jamais trouver de dépose en dessous d'un nombre minimum d'heures de fonctionnement.

Dans le même ordre d'idée, lorsque le critère de dépose est la valeur d'un jeu, il est possible, compte tenu de la vitesse d'usure, de ne jamais trouver de dépose en dessous d'un nombre d'heures de fonctionnement minimal.

4.7 Estimation graphique des paramètres d'une loi de Weibull

4.7.1 Technique de dépouillement d'ALAIN PLAÏT

Considérons l'expression de la fonction de réaprtition des défaillances :

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

On a successivement :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right] = \beta \text{Ln}\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)$$

Soit finalement :

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right] = \beta \text{Ln}(t - \delta) - \beta \text{Ln}(\eta)$$

qui est l'équation d'une droite $y = \beta x + b$. Par conséquent, les points de coordonnées (x, y) , avec

$$x = \text{Ln}(t - \delta)$$

et

$$y = \text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right]$$

s'alignent sur une droite dont la pente est égale au paramètre de forme β et dont l'intersection avec l'axe des abscisses donne la valeur de η

4.8 L'essai suspendu avec remplacement

4.8.1 Méthode de Johnson

On décide de faire un calcul à partir d'une flotte en opération, l'échantillon observé est constitué des équipements qui ont été déposés pour défaillance et des équipements qui sont en fonctionnement, sur chaque appareil en vol.

Le problème qui se pose est de savoir quel rang il faut affecter à une défaillance, à partir du moment où des équipements suspendus ont un nombre d'heures de fonctionnement inférieur à ceux des défaillances. En effet si on avait décidé d'arrêter l'essai plus tard, certains des vivants seraient tombés en panne. Le rang des défaillances et donc $F(t)$, auraient été différents. La fonction $F(t)$ que l'on va tracer dépend de T, durée de l'essai. On présente ici la méthode de Johnson ou des rangs corrigés, qui permet de résoudre ce problème.

Prenons le cas d'un essai de quatre équipements, dont les résultats sont donnés dans le tableau à la page suivante.

Défaillance ou suspension	Heures de fonctionnement
Défaillance (D_1)	84
Suspension (S_1)	91
Défaillance (D_2)	122
Défaillance (D_3)	274

Trois défaillances ont eu lieu respectivement au bout de 84, 122, 274 heures de fonctionnement, et une suspension au bout de 92 heures. Si on avait poursuivi l'essai jusqu'à la défaillance de l'ensemble des quatre équipements on aurait pu avoir les trois résultats suivants :

I	II	III
D_1 $S_1 \rightarrow D$ D_2 D_3	D_1 D_2 $S_1 \rightarrow D$ D_3	D_1 D_2 D_3 $S_1 \rightarrow D$

L'équipement suspendu aurait pu tomber en panne entre 91 et 122 heures de fonctionnement, cas n° 2 ou encore après 274 heures de fonctionnement, c'est le cas n° 3.

Dans tous les cas, la première défaillance observée D_1 , aura pour rang 1. Par contre, la deuxième défaillance observée D_2 , peut, suivant le cas, avoir le rang 2 (cas n° 2 et 3) ou le rang 3 (cas n° 1). On peut lui associer le rang moyen suivant :

$$r_2 = \frac{(3) + 2 \times (2)}{3} = 2,33$$

C'est ce rang qui est affecté à la deuxième défaillance observée.

En final les rangs qui sont affectés à nos trois défaillances sont :

Heures de défaillance	Rang de la défaillance
84	1,00
122	2,33
274	3,67

La méthode devient très vite fastidieuse quand la taille de l'échantillon augmente. Une formule permet de calculer de manière simple le rang de chaque défaillance. Si n est le nombre total d'équipements en essai, on affectera à la défaillance observée n° j , le rang r_j défini par :

$$r_0 = 0$$

et
$$r_j = r_{j-1} + N_j$$

avec
$$N_j = \frac{(n+1) - r_{j-1}}{(n+1) - P_j}$$

où P_j est le nombre d'équipements suspendus ou défaillants qui précèdent dans la liste ordonnée la défaillance étudiée.

CHAPITRE 5

5 EXEMPLE D'APPLICATION A 1 CAS CONCRET

La B.T.P. MK1

On veut calculer le MTBF de la B.T.P. en appliquant la méthode de Johnson. On dispose pour cela de l'historique de 24 B.T.P.

Numéro de série	Défaillances TSN	Défaillances TSR	Vivants
M144	2381		94
M218	579		1949
M198	610	390	1601
M163	1443	1000	1401
M193		1231	1216
M231	713		1768
M196	1466		486
M228	1014		976
M253	246		2252
M121	1952		428
M151	1103		489
M169	1656		76
M170	1344		2626
M204	781		1592
M274	1151		818
M178	629		1277
M193	1231	649	1329
M215	431		1567
M231	713		1857
M236	1037	420	1574
M257	1738		739
M274	1626		343
M280	1630	670	1826
M312	733		1710

TSN (Time Since New) : Temps de fonctionnement de l'équipement depuis sa mise en service (heures).

TSR (Time Since Repair) : Temps de fonctionnement de l'équipement depuis sa dernière remise en état (heures).

On va successivement :

- classer les équipements par heures de fonctionnement à la défaillance ou à la suspension,
- calculer le rang de chaque défaillance par la méthode de Johnson,
- calculer la valeur de $F(t)$ à chaque défaillance.

L'ensemble des calculs sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

D/S	t heures	Incrément Nj	Rang affecté à la défaillance Nj	$F(t_j)$ j/48
S	76	$((48 + 1) - 0) / ((48 + 1) - 2) = 1,04$	1,06	0,022
S	94			
D	246			
S	343	$((48 + 1) - 1,06) / ((48 + 1) - 5) = 1,09$	1,06 + 1,09 = 2,15	0,44
S	428			
D	431			
S	486	$((48 + 1) - 2,15) / ((48 + 1) - 8) = 1,14$	2,15 + 1,14 = 3,29	0,068
S	489			
D	579			
D	610	$((48 + 1) - 3,29) / ((48 + 1) - 9) = 1,14$	3,29 + 1,14 = 4,43	0,092
D	629	$((48 + 1) - 4,43) / ((48 + 1) - 10) = 1,14$	4,43 + 1,14 = 5,57	0,116
D	713	$((48 + 1) - 5,57) / ((48 + 1) - 11) = 1,14$	5,57 + 1,14 = 6,71	0,139
D	733	$((48 + 1) - 6,71) / ((48 + 1) - 12) = 1,14$	6,71 + 1,14 = 7,85	0,163
S	739	$((48 + 1) - 7,85) / ((48 + 1) - 14) = 1,18$	7,85 + 1,18 = 9,03	0,188
D	781			
S	818			
D	960	$((48 + 1) - 9,03) / ((48 + 1) - 16) = 1,21$	9,03 + 1,21 = 10,24	0,213
S	976	$((48 + 1) - 10,24) / ((48 + 1) - 18) = 1,25$	10,24 + 1,25 = 11,49	0,239
D	1014			
S	1037			
D	1037	$((48 + 1) - 11,49) / ((48 + 1) - 20) = 1,29$	11,49 + 1,29 = 12,78	0,266
D	1103	$((48 + 1) - 12,78) / ((48 + 1) - 21) = 1,29$	12,78 + 1,29 = 14,07	0,293
D	1151	$((48 + 1) - 14,07) / ((48 + 1) - 22) = 1,29$	14,07 + 1,29 = 15,36	0,320
S	1216	$((48 + 1) - 15,36) / ((48 + 1) - 24) = 1,35$	15,36 + 1,35 = 16,71	0,348
D	1231			
S	1277			
S	1329	$((48 + 1) - 16,71) / ((48 + 1) - 27) = 1,47$	16,71 + 1,47 = 18,18	0,378
D	1344			
S	1401			

D/S	t heures	Incrément Nj	Rang affecté à la défaillance Nj	F(t _j) j/48
D	1443	$((48 + 1) - 18,18) / ((48 + 1) - 29) = 1,54$	18,18 + 1,54 = 19,72	0,410
D	1466	$((48 + 1) - 19,72) / ((48 + 1) - 30) = 1,54$	19,72 + 1,54 = 21,26	0,442
S	1567			
S	1574			
S	1592			
S	1601			
D	1626	$((48 + 1) - 21,26) / ((48 + 1) - 35) = 1,98$	21,26 + 1,98 = 23,24	0,484
D	1630	$((48 + 1) - 23,24) / ((48 + 1) - 36) = 1,98$	23,24 + 1,98 = 25,22	0,525
D	1656	$((48 + 1) - 25,22) / ((48 + 1) - 37) = 1,98$	25,22 + 1,98 = 27,20	0,566
S	1710			
D	1738	$((48 + 1) - 27,20) / ((48 + 1) - 39) = 2,18$	27,20 + 2,18 = 29,38	0,612
S	1768			
S	1826			
S	1857			
S	1949			
D	1952	$((48 + 1) - 29,38) / ((48 + 1) - 44) = 3,92$	29,38 + 3,92 = 33,30	0,693
S	2252			
D	2381	$((48 + 1) - 33,30) / ((48 + 1) - 46) = 5,23$	33,30 + 5,23 = 38,58	0,803
S	2626			

Le graphe d'Alan Plait associé est présenté sur la planche 1. Les points s'alignent. La loi de fiabilité est donc une loi de Weibull sans décalage.

$$\delta = 0$$

L'intersection de la droite expérimentale avec la droite d'ordonnée 0,632 permet d'obtenir la valeur de η

$$\eta = 1800 \text{ heures}$$

En traçant la parallèle passant par le point l, on détermine la valeur du paramètre de forme β

$$\beta = 2$$

On en déduit le MTBF de la B.T.P.

$$MTBF = \eta \times X + \delta \text{ avec } X = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Les valeurs de X étant données dans le tableau ci-après.

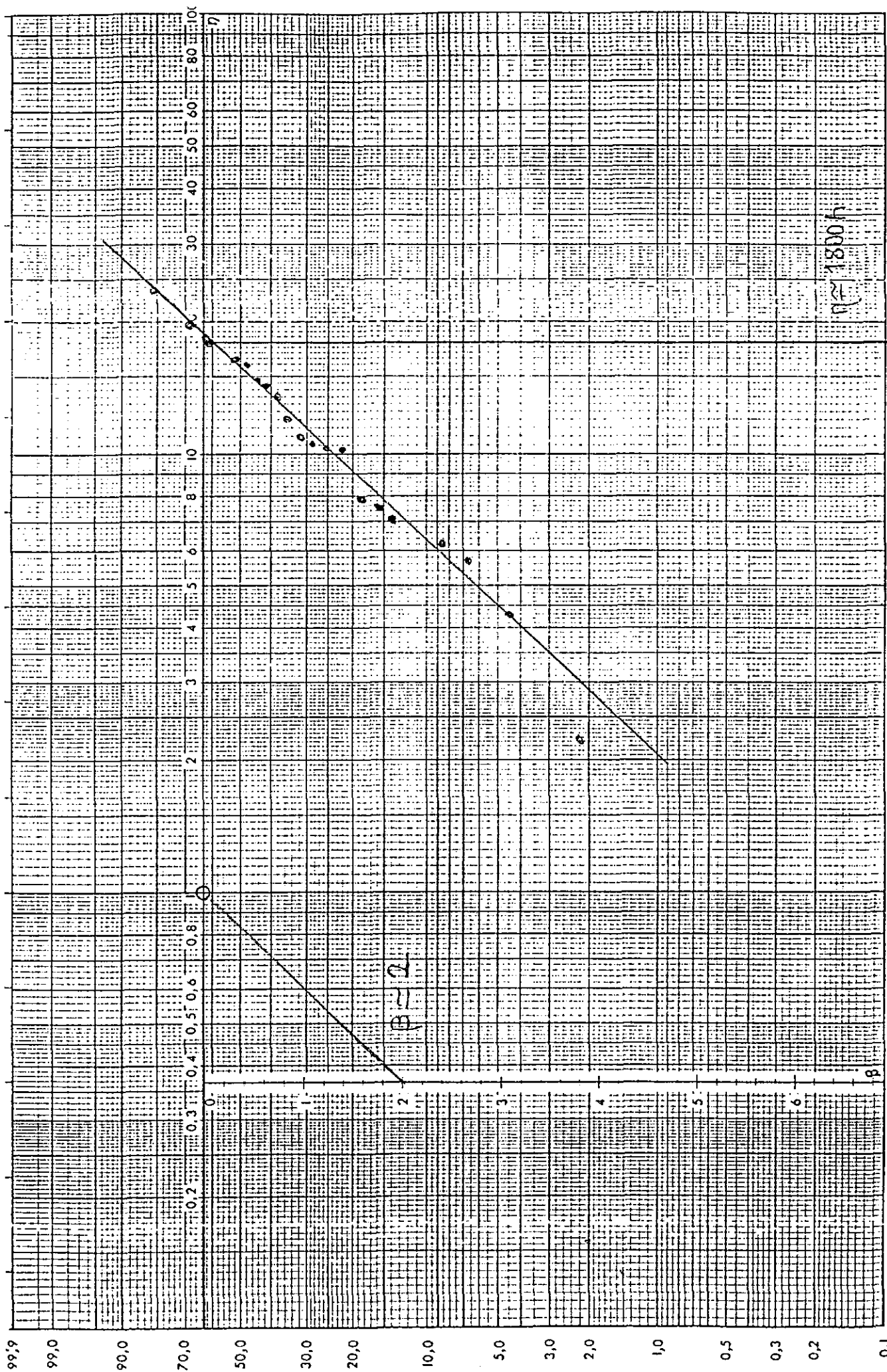
$$MTBF = 0,8862 \times 1800 = 1595 \text{ heures}$$

LOI DE WEIBULL

MOYENNE ET ECART TYPE

$$MTBF = \eta \cdot X + \delta \quad \text{avec} \quad X = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

β	X	Y	β	X	Y	β	X	Y
0.20	120	1900	1.50	0.9027	0.614	4.00	0.9064	0.255
0.25	24	200	1.55	0.8994	0.593	4.10	0.9076	0.250
			1.60	0.8966	0.574	4.20	0.9089	0.245
			1.65	0.8942	0.556	4.30	0.9101	0.240
			1.70	0.8922	0.540	4.40	0.9113	0.235
			1.75	0.8906	0.525	4.50	0.9125	0.230
0.30	9.2603	52.6	1.80	0.8892	0.511	4.60	0.9137	0.225
0.35	5.0295	19.9	1.85	0.8882	0.498	4.70	0.9149	0.222
0.40	3.3233	10.5	1.90	0.8874	0.486	4.80	0.9160	0.218
0.45	2.5055	6.45	1.95	0.8867	0.474	4.90	0.9171	0.214
0.50	2.0000	4.58	2.00	0.8862	0.463	5.00	0.9182	0.210
0.55	1.7024	3.35	2.10	0.8857	0.444	5.10	0.9192	0.207
0.60	1.5045	2.65	2.20	0.8856	0.425	5.20	0.9202	0.204
0.65	1.3603	2.24	2.30	0.8859	0.407	5.30	0.9212	0.200
0.70	1.2657	1.85	2.40	0.8865	0.394	5.40	0.9222	0.197
0.75	1.1906	1.61	2.50	0.8872	0.380	5.50	0.9232	0.194
0.80	1.1330	1.43	2.60	0.8882	0.367	5.60	0.9241	0.191
0.85	1.0878	1.28	2.70	0.8893	0.356	5.70	0.9251	0.188
0.90	1.0522	1.18	2.80	0.8903	0.346	5.80	0.9260	0.185
0.95	1.0238	1.08	2.90	0.8917	0.334	5.90	0.9268	0.183
1.00	1.0000	1.000	3.00	0.8930	0.324	6.00	0.9277	0.180
1.05	0.9808	0.935	3.10	0.8943	0.316	6.10	0.9285	0.178
1.10	0.9649	0.880	3.20	0.8956	0.308	6.20	0.9293	0.175
1.15	0.9517	0.830	3.30	0.8970	0.300	6.30	0.9302	0.173
1.20	0.9406	0.780	3.40	0.8984	0.292	6.40	0.9309	0.170
1.25	0.9314	0.744	3.50	0.8997	0.285	6.50	0.9318	0.168
1.30	0.9236	0.716	3.60	0.9011	0.278	6.60	0.9325	0.166
1.35	0.9169	0.687	3.70	0.9024	0.272	6.70	0.9330	0.164
1.40	0.9114	0.660	3.80	0.9038	0.266	6.80	0.9340	0.161
1.45	0.9067	0.635	3.90	0.9051	0.260	6.90	0.9350	0.158



Variable : t - δ loi de WEIBULL

5.1 Calcul du coût de maintenance

Le MTBF global nous donne la fréquence des déposes non programmées ou défaillances, dont la distribution par module est :

	Pourcentage de déposes
Module Epicycloïdal	30 %
Module principal	17 %
Boîtier accessoires droit	5,5 %
Boîtier accessoires gauche	5,5 %
Pompe à huile principale	15 %
Pompe à huile secours	27 %

Les coûts moyens des remises en état et des révisions générales pour chaque module sont :

	Prix réparation	Prix RG	TBO
Module épicycloïdal	306900	465000	2500
Module principal	149160	226000	3000
Boîtier accessoires droit	30360	46000	3000
Boîtier accessoires gauche	36960	56000	3000
Pompe à huile principale	8983	16880	3000
Pompe à huile secours	10880	20520	3000

- Le coût des déposes non programmées

$$\text{Coût non programmé/heure de vol} = \frac{1}{MTBF} \times (\%_1 C_1 + \%_2 C_2 + \dots +)$$

$$= \frac{1}{1595} (0,30 \times 306900 + 0,17 \times 149160 + 5,5 \times 10^{-2} \times 30360 + 5,5 \times 10^{-2} \times 36960 + 0,15 \times 8983 + 0,27 \times 10880)$$

$$= 79 \text{ F/h}$$

- Le coût des déposes programmées

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{H \text{ vol 1 hélicoptère}}{TBO} - 1 \right) \times C_{RG}}{H \text{ vol 1 hélicoptère}}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{2500} - 1 \right) \times 465000}{12000}$$

$$\text{(Module épicycloïdal)} = 155 \text{ F/h}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{3000} - 1 \right) \times 226000}{12000}$$

$$\text{(Module principal)} = 56,5 \text{ F/h}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{3000} - 1 \right) \times 46000}{12000}$$

$$\text{(Boîtier accessoires droit)} = 11,5 \text{ F/h}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{3000} - 1 \right) \times 56000}{12000}$$

$$\text{(Boîtier accessoires gauche)} = 14 \text{ F/h}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{3000} - 1 \right) \times 16880}{12000}$$

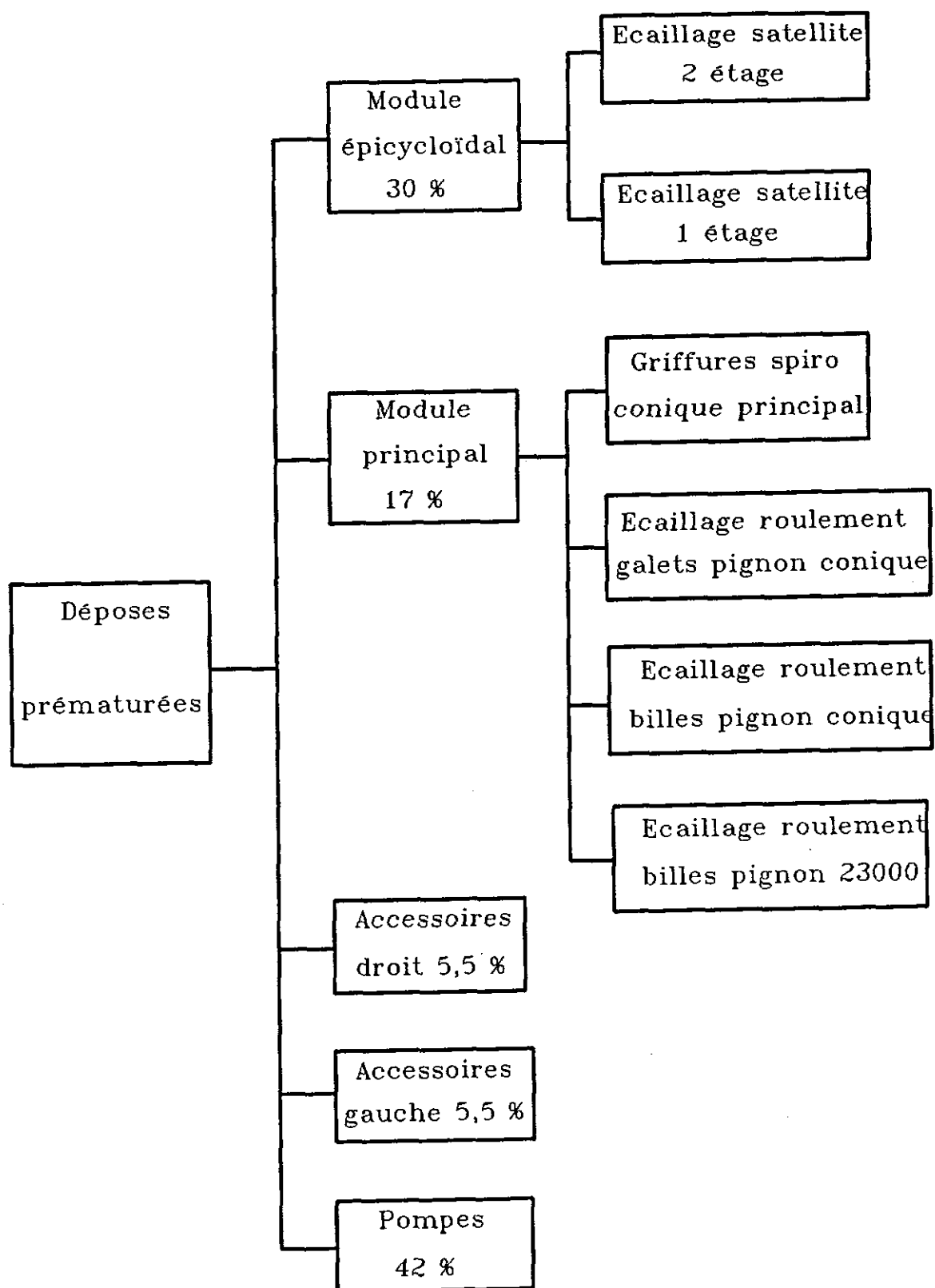
$$\text{(Pompe à huile principale)} = 5 \text{ F/h}$$

$$\text{Coût programmé/heure de vol} = \frac{\left(\frac{12000}{3000} - 1 \right) \times 20520}{12000}$$

$$\text{(Pompe à huile secours)} = 6 \text{ F/h}$$

Le Coût de la maintenance programmée est 248 F

- Le coût total de maintenance
 $C \text{ Total} = \text{Coût non programmé} + \text{Coût programmé} = 327 \text{ F/h}$
- La maintenance programmée représente 76 % du coût d'entretien d'une BTP, sachant que le module épicycloïdal représente à lui seul en maintenance programmée 47 % du coût total, (programmé + non programmé).
- Par conséquent une diminution des coûts d'entretien de la BTP passe par une augmentation du potentiel du module épicycloïdal qui ne peut être consécutif qu'à une amélioration de sa fiabilité.



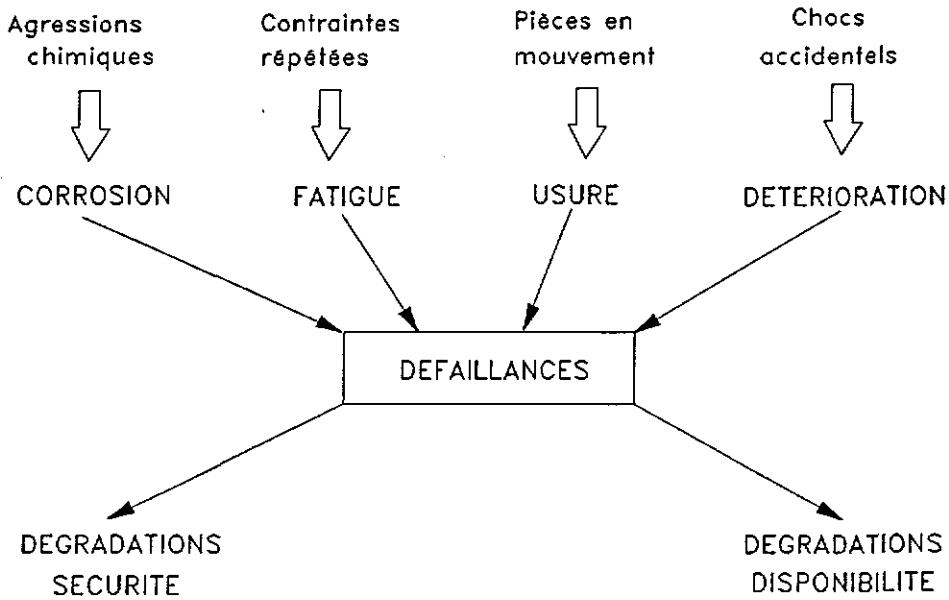
CHAPITRE 6

6 MODES DE DEFAILLANCE

6.1 Définition de base

Défaillance = événement qui conduit à la perte totale ou partielle d'un élément de la fonction réalisée par l'équipement.

Qu'est qui conduit à une défaillance ?



La maintenance est l'ensemble des opérations ayant pour finalité le maintien des niveaux :

- de performances
- de potentiel
- des disponibilités

permettant d'assurer les missions contractuelles.

6.2 Types de maintenance

6.2.1 Buts de la maintenance

- Empêcher la défaillance (maintenance préventive)
- Réparer la défaillance (maintenance curative)

6.2.2 La maintenance préventive

C'est l'ensemble des actions programmées et répétitives, permettant de vérifier et de maintenir un état de fonctionnement donné.

6.2.3 La maintenance corrective

C'est l'ensemble des actions exécutées après l'apparition d'une panne et qui permettent de rétablir l'état de fonctionnement initial.

6.2.4 La maintenance curative

C'est l'ensemble des actions permettant de remédier définitivement à une anomalie ou une situation préalablement identifiées et jugées inadmissibles, malgré l'activité de maintenance préventive et corrective.

6.3 Procédures de maintenance

Il y a trois procédures de maintenance :

- Maintenance à temps limité (Hard Time)
- Maintenance selon vérification de l'état (On Condition)
- Surveillance du comportement en service (Condition Monitoring)

6.3.1 Maintenance à temps limité (Hard Time)

Dire qu'un élément fait l'objet d'une procédure de maintenance à temps limité signifie que cet élément devra être déposé avant d'atteindre une limitation :

- Temps : - Heures de vol ou de fonctionnement,
- Calendaire, nombre de cycles.

L'élément est remplacé avant sa défaillance.

Il y a deux catégories de maintenance à temps limité :

a) Temps limité de vie (Service Life Limit) (SLL)

L'élément déposé doit être retiré du service (rebut programmé). Ce sont les éléments ou sous-ensembles soumis au travail en fatigue tels que : moyeux, arbres de transmission, réducteurs, etc....

b) Temps limité entre révision (Time Between Overhauls)

L'élément déposé doit subir des interventions en atelier spécialisé dans le but de le libérer pour une nouvelle période de service d'une durée équivalente. Ce sont les ensembles mécaniques (B.T.P., B.T.A.) moteurs, bloc pilote automatique, pompes hydrauliques, etc...

6.3.2 Maintenance selon vérification de l'état (On Condition)

Dire qu'un élément fait l'objet d'une procédure de maintenance selon vérification de l'état signifie que cet élément subit des interventions périodiques permettant de contrôler l'évaluation des altérations connues, et/ou de déceler les altérations nouvelles, afin de le libérer pour une nouvelle période d'utilisation.

Ce sont les rotors principaux et arrière, les pales, les arbres et boîtes de transmission, les atterrisseurs, la structure, etc...

6.3.3 Surveillance du comportement en service (Condition Monitoring)

Dire qu'un élément fait l'objet d'une procédure de maintenance avec surveillance du comportement signifie que l'on interviendra sur cet élément qu'après indication de sa défaillance.

L'application de la procédure de maintenance avec surveillance du comportement en service nécessite la surveillance des éléments dont la défaillance entraîne un fonctionnement non satisfaisant.

6.4 Niveaux de maintenance

Il existe trois niveaux de maintenance.

6.4.1 Soutien d'accompagnement des appareils

La maintenance est faite sur la base de stationnement avec ou sans installation fixe (en campagne), par des mécaniciens, avec des moyens légers, dans le but de maintenir la capacité opérationnelle de l'aéronef.

Les délais d'intervention sont très courts (3/4 heure)

6.4.2 Soutien direct des matériels

La maintenance est faite sur la base de stationnement avec atelier de réparation, par des mécaniciens confirmés, avec des moyens lourds, dans le but de restaurer le potentiel opérationnel des matériels majeurs.

Délais d'intervention : $\leq$ 2 ou 3 jours

6.4.3 Soutien différé

En installation fixe de type semi-industrielle, par des spécialistes, avec des outillages statiques et complexes, dans le but de satisfaire aux exigences de durée de vie du parc de matériel.

Délais de l'intervention : $\geq$ 1 semaine

6.5 Programme de la maintenance

Le programme de maintenance de l'hélicoptère dépend de son type (lourd ou léger) et de son utilisation (militaire ou civile).

Il y a quatre types de visites dans ce programme de maintenance :

- Visite journalière " J "
- Visite complémentaire " S "
- Visite périodique " T "
- Grande visite " G "

6.5.1 Visite journalière " J "

Elle permet de s'assurer du bon état de l'hélicoptère et de sa disponibilité pour le vol.

Elle se décompose en trois sous-visites suivantes :

- Visite avant le premier vol (APV)
- Visite inter vol (IVOL)
- Visite après le dernier vol (ADV)

Elles sont réalisables :

- Pour les hélicoptères légers :
 - Par un pilote
- Pour les hélicoptères lourds :
 - Par un pilote pour la visite avant le premier vol et les visites inter-vol pour les civils et les militaires.
 - Par un mécanicien pour la visite après le dernier vol pour les civils.

6.5.1.1 Visite avant le premier vol (APV)

Elle assure que l'appareil est en état de vol et contient l'inspection visuelle et opérations simples capots ouverts, le niveau carburant, complément plein d'huile, l'inspection visuelle des installations optionnelles.

La durée approximative de la visite est de 8 minutes pour les appareils légers et de 25 minutes pour les appareils lourds.

6.5.1.2 Visite inter-vol (IVOL)

Elle assure la disponibilité immédiate pour le vol et détecte au plus tôt les conséquences éventuelles du vol précédent.

Elle contient, l'inspection visuelle générale capots fermés, la vérification carburant, la surveillance des niveaux à partir du sol (huiles).

- Durée approximative de la visite :
 - . Appareils légers :
 - 5 minutes
 - 10 minutes avec complément de plein de carburant
 - . Appareils lourds :
 - 10 minutes
 - 15 minutes avec complément de plein de carburant

6.5.1.3 Visite après le dernier vol (ADV)

On décide si l'appareil pourra être à nouveau programmé pour la prochaine journée de vol. Elle contient les inspections visuelles détaillées capots ouverts comprenant la détection des causes d'anomalies éventuelles signalées par l'équipage, la surveillance des niveaux d'inspection de l'ensemble de l'aéronef, remise en état et vérification.

La durée approximative de la visite est de 15 minutes pour les appareils légers et de 40 minutes pour les appareils lourds.

6.5.2 Visite complémentaire " S "

Elle assure l'état de navigabilité de l'hélicoptère et consiste en une vérification plus approfondie des éléments (usure altération...) dont la périodicité est courte. Si pour l'appareil la visite journalière après le dernier vol est faite par un mécanicien, la périodicité est de 100 heures (appareils légers) et de 50 heures (appareils lourds).

Dans le cas contraire cette périodicité est de 25 heures.

La durée approximative de la visite est de 30 minutes (appareils légers) et de 50 minutes (appareils lourds). Pendant cette visite, on fait les procédures à temps limite et les opérations demandées par le motoriste.

La périodicité de la visite complémentaire du 332 MK II est de 50 heures.

6.5.3 Visite périodique " T "

Elle contient les inspections générales de la structure, la vérification détaillée au niveau des ensembles mécaniques et des moteurs, vérifications générales des circuits et des équipements, les essais de certains équipements et inspections des filtres.

La périodicité de visite périodique du 332 MK II est de 500 heures.

6.5.4 Grandes visites " G "

La périodicité des grandes visites du 332 MK II est de 6000 heures, une vérification complète de l'hélicoptère est effectuée avec examen minutieux de tous les systèmes et de toute la structure. La cellule est pratiquement remise à neuf.

6.6 Analyse de pannes

- Les modes de défaillance
- Les causes possibles de défaillance
- Les conséquences sur l'ensemble étudié
- Les méthodes de détection préventives
- Les méthodes de détection de l'équipage
- Les modes de prévention et justification
 - La classe de la gravité
 - La probabilité d'occurrence
 - La justification de cette probabilité
 - Les conséquences de la défaillance extérieure à l'ensemble étudié et/ou la conséquence opérationnelle.

Dans la B.T.P. certains éléments mécaniques tels que les roulements et engrenages subissent des endommagement des surfaces par exemple : usure, pitting, écaillages, griffures.

Ce sont les principales causes de défaillance, il faut donc rechercher des moyens de les détecter.

6.6.1 Roulements

6.6.1.1 Usure :

Bague extérieure, bague intérieure, éléments roulants. Elles se produisent en l'absence de lubrification ou à la suite de la rupture du film d'huile suite à une surcharge anormale par exemple.

Ces usures finissent par provoquer des enlèvements de matière ou dégénérer en écaillages.

Dans les deux cas, les particules sont recueillies par le bouchon magnétique de l'ensemble. La surveillance du bouchon magnétique permet de vérifier l'état des roulements.

6.6.1.2 Usure cage

Elles peuvent se produire soit en l'absence de film d'huile soit sous sollicitations anormales. Les usures produisent des particules magnétique ou non suivant le matériau qui les constitue. Le bouchon magnétique et le filtre sont des moyens d'alerte efficaces.

6.6.1.3 Pitting

Bague extérieure, bague intérieure, éléments roulants. Le pitting que l'on peut assimiler à de l'écaillage naissant est un phénomène d'endommagement par fatigue superficielle à développement lent. Quand il n'est pas, pour des raisons quantitatives, décelé au bouchon magnétique, il ne peut provoquer le moindre incident et ne peut altérer le bon fonctionnement du roulement.

6.6.1.4 Ecaillage

Bague extérieure, bague intérieure, éléments roulants. Les écaillages de par leur nature produisent suffisamment de particules pour être détectés par le bouchon magnétique.

6.6.2 Engrenages (DENTURE)

6.6.2.1 Usure

Elle peut se produire en l'absence de lubrification ou rupture du film d'huile (surcharge anormale localisée). A un stade réduit, elle n'affecte pas le fonctionnement de l'engrenage.

A un stade avancé elle provoque une augmentation du niveau sonore et peut dégénérer soit en griffures et/ou écaillages décelables par le bouchon magnétique.

6.6.2.2 Pitting

Bague extérieure, bague intérieure, éléments roulants. Le pitting que l'on peut assimiler à de l'écaillage naissant est un phénomène d'endommagement par fatigue superficielle à développement lent. Quand il n'est pas, pour des raisons quantitatives, décelé au bouchon magnétique, il ne peut provoquer le moindre incident et ne peut altérer le bon fonctionnement du roulement.

6.6.2.3 Ecaillage

Bague extérieure, bague intérieure, éléments roulants. Les écaillages de par leur nature produisent suffisamment de particules pour être détectés par le bouchon magnétique.

6.6.2.4 Griffures

Les sillons transversaux appelés "griffures" ne se produisent qu'en l'absence de film d'huile pour un couple d'engrenages correctement dimensionnés et réglés. Les particules détectées forment de la barbe au bouchon magnétique et sont donc parfaitement décelables.

6.6.3 Corrosion

La surveillance et l'élimination des corrosions à l'extérieur des mécaniques s'effectuent lors des visites journalières ou programmées au cours desquelles des actions de maintenance sont déclenchées si nécessaire.

La corrosion à l'intérieur des mécaniques n'est pas à craindre du fait de la présence d'huile, en fonctionnement et à l'arrêt.

6.7 Analyse des modes de défaillances

Analyse MSG-3

6.7.1 Définition

Le MSG-3 est une procédure d'analyse logique. Le but du MSG II est d'assurer le meilleur compromis ECONOMIE/SECURITE, en définissant en structure des règles de tolérance aux dommages, ainsi que le traitement adapté des défaillances fonctionnelles cachées.

La logique du MSG-3 utilise une approche basée sur la conséquence des défaillances. Une défaillance fonctionnelle est analysée en fonction de ses conséquences et classée dans deux catégories de base.

- A. Sécurité
- B. Economie

Un processus de classification complémentaire détermine des sous catégories, basées sur le fait que la défaillance est évidente ou cachées aux membres de l'équipage.

Avant que la logique MSG-3 réelle puisse être appliquée à un élément, les systèmes et composants principaux de l'appareil doivent être identifiés.

6.7.2 La méthode MSG-3

La procédure MSG est une méthode d'analyse qui sélectionne la tâche à partir d'un cheminement logique. Son but est de fournir une liste de tâches qui correspondent à un rapport coût/efficacité maximum. (Dans le mot efficacité sont inclus les aspects sécurités et objectifs opérationnels).

L'analyse MSG-3 comporte trois procédures différentes.
Ces procédures sont les suivantes :

- une procédure système
- une procédure structure
- une procédure dite "de zone"

6.7.2.1 Une procédure système

On utilise cette méthode pour définir les tâches d'entretien des systèmes et du groupe motopropulseur.

La méthode consiste en :

- a) Une énumération de chaque système, sous-système, composant, accessoire et élément.

b) Une sélection des éléments prépondérants de maintenance avec les critères suivants :

1. Effet de la défaillance sur la sécurité
2. Evidance de la défaillance en opération
3. Impact de la défaillance au niveau opérationnel
4. Répercussion de la défaillance sur le plan

c) Identifier pour chaque élément prépondérant

1. Les fonctions
2. Les défaillances fonctionnelles
3. Les conséquences des défaillances
4. Les causes des défaillances

d) Analyser les défaillances fonctionnelles au moyen du diagramme logique de manière à définir une tâche applicable et efficace.

e) Les tâches retenues et leur périodicité seront intégrées au programme initial de maintenance programmée.

6.7.2.1.1 Critères de sélection des tâches

TACHE	APPLICATION	EFFICACITE		
		SECURITE	OPERATIONNEL	ECONOMIE
GRAISSAGE OU ENTRETIEN	Le remplissage de produit consommable doit réduire la cadence d'évolution de la détérioration	La tâche doit réduire le risque de panne.	La tâche doit réduire le risque à un niveau acceptable.	La tâche doit être économiquement rentable
CONTROLE VISUEL ou OPERATIONNEL	L'identification de la défaillance doit être possible	La tâche doit assurer une disponibilité suffisante de la fonction cachée pour réduire le risque d'une panne multiple	Sans objet.	La tâche doit assurer une disponibilité suffisante de la fonction cachée pour éviter les répercussions économiques des pannes multiples et avoir un rapport efficacité/coût favorable

6.7.2.2 Procédure structure

La structure comprend tous les éléments qui supporte les charges.

La méthode consiste en :

- a) Identifier les éléments prépondérants structuraux (EPS) à l'aide des critères suivants :

1. Conséquence de défaillance

Les éléments qui sont le plus susceptible aux détériorations dues à l'environnement, au dommage accidentel ou à la fatigue.

Par exemple :

- zone de concentration de contraintes
- zone sensible à la corrosion
- zone vulnérable aux dommages accidentels

- b) Les éléments qui ne sont pas éléments prépondérants structuraux sont classés comme éléments de structures complémentaires et sont traités par la procédure de zone

- c) Classer les éléments prépondérants structuraux (EPS) en tolérant au dommages ou à vie sûre.

1. Tolérance au dommage

Un élément est considéré comme tolérant aux dommages s'il peut les supporter et si le reste de la structure est capable de supporter les efforts sans rupture ni déformation importante avant que le dommage ne soit détecté.

2. Vie sûre

Il doit être démontré que la structure peut supporter les charges avec une probabilité de rupture très faible.

On fixe les limites de vie après lesquelles les éléments doivent être rebutés

- d) Pour chaque élément prépondérant structural (EPS) à vie sûre, sélectionner les limites de vie sûre et noter sa prédisposition aux deux processus de détérioration

1. Due à l'environnement
2. Due aux dommages accidentels

- e) Pour chaque élément tolérant aux dommages noter séparément sa pré-disposition à chacun des trois processus de détérioration

1. Fatigue
2. Détérioration due à l'environnement
3. Détérioration due aux dommages accidentels

Si l'élément prépondérant structural peut être soumis à des dommages accidentels, les processus de dommage en fatigue et dû à l'environnement sont à considérer.

- f) Sélectionner pour chaque élément prépondérant structural (EPS) :

1. Le seuil d'inspection initial
2. Les intervalles d'inspections et leurs moyens matériels associés

Les inspections visuelles seront intégrées au programme d'inspection zonales.

6.7.2.3 Procédure de zone

Ce sont les éléments qui ne sont pas considérés dans l'analyse structure et dont la défaillance peut contribuer à la défaillance fonctionnelle.

Cela comprend :

- Les tuyauteries
- Les conduites
- La structure complémentaire
- Les câblages, etc...

La méthode consiste à :

- a) Découper l'aéronef en zones
- b) Lister les accès avec leur localisation, leur description, leur taille et quel équipement ils permettent d'atteindre.
- c) Détailler pour chaque zone :
 1. Son numéro d'identification
 2. Son nom
 3. Sa description
 4. Les équipements importants qui y sont installés
- d) Evaluer la maintenabilité de la zone en codant :
 1. Son importance par rapport à l'aéronef
 2. Détectabilité de la défaillance
 3. Susceptibilité à l'environnement

6.7.3 Application du MSG-3 (avions) à l'hélicoptère

6.7.3.1 Problème d'application

6.7.3.1.1 L'architecture

La sustentation de l'hélicoptère est obtenue par les voilures tournantes. L'obligation de mouvoir ces voilures nécessite la présence de mécaniques importantes (transmission, réduction, renvoi).

6.7.3.1.2 Le mode de fonctionnement

Dans l'hélicoptère le mode de fonctionnement des rotors provoque obligatoirement des excitations cycliques sur les éléments mécaniques (pales, moyeu, chaîne de commande, barres B.T.P.) et sur la structure. Ainsi les pièces d'hélicoptères sont soumises à des phénomènes de fatigue vibratoire (grand nombre de cycles : 10^9)

6.7.3.1.3 La tolérance au dommage

Tolérer une crique sur un hélicoptère est beaucoup plus contraignant que pour un avion. Son mode de fonctionnement fait que la propagation du défaut est beaucoup plus rapide.

Il n'y a que deux solutions pour appliquer la tolérance au dommage à l'hélicoptère :

- soit on augmente les sections
- soit on réduit les périodicités d'inspections

6.7.3.1.4 Le coût de réalisation de MSG-3

La réalisation d'une analyse MSG-3 pour un appareil tel que le 332, coûterait environ 40 000 heures.

Le rapport coût des études pour un hélicoptère est beaucoup plus élevé que sur un avion.

6.7.3.2 Analyse système

La procédure MSG système est applicable aux systèmes de l'hélicoptère, cependant sa réalisation ne peut être correctement effectuée qu'à partir d'une analyse de panne complète.

Pour chaque système les analyses de panne devront fournir :

- Les fonctions.
- Les modes de défaillances de ces fonctions.
- Les conséquences de ces défaillances.
- Les causes de ces défaillances.

Elles devront :

- D'écrire l'évolution de la défaillance pour définir le défaut à rechercher.
- Classer les conséquences sur le plan sécurité, opérationnel et économique.
- Donner la probabilité d'occurrence de la défaillance.
- Donner la classe de gravité de la défaillance.

6.7.3.3 Analyse structure

Le concept tolérance au dommage ne peut pas être appliqué. Donc le concept durée de vie sûre (avec les dommages d'environnement et d'accident) est le seul choix qui nous reste.

Pour réaliser cette méthode d'analyse les périodicités d'inspections retenues doivent être telles que la crigue due à l'environnement ou l'accident soit détectable avant qu'elle ne soit critique.

La prise en compte de l'environnement nécessite de classer tous les matériaux et de chiffrer leur tenue à la corrosion en fonction de leur protection, forme et localisation.

Il faut aussi créer un catalogue des dommages en décrivant et identifiant leur répercussions sur l'appareil.

CONCLUSION

Le coût est un élément fondamental pour l'utilisateur et pour le fabricant par voie de conséquence.

En 1980 l'Aérospatiale a donné un deuxième souffle au 330 en mettant en service le 332 Mark I qui avait des performances, une sécurité, une maintenance très améliorée par rapport au 330. Alors que les ventes de 330 commençaient à ralentir et semblaient devoir plafonner vers 700 appareils, le 332 a permis de relancer les cadences avec une promesse de vente de 400 à 500 machines.

En 1990, le même phénomène se produit, c'est-à-dire que les cadences de vente du 332 ralentissaient. C'est pourquoi l'Aérospatiale a lancé le 332 Mark II, avec un nouvel espoir de 400 appareils nouveaux, qui vient d'être certifié.

Cet exemple illustre parfaitement l'importance de la diminution des coûts. Le but de mon exposé était de porter l'accent sur les diverses solutions d'évaluation des coûts et d'illustrer mes propos par des exemples significatifs.

ANNEXE 1

1 Coût de la maintenance (COM)

$$COM = COMM + COMX + COMS$$

(On néglige les autres valeurs)

COMM = Coût du personnel de maintenance

COMX = Coût des rechanges

COMS = Coût des outillages de maintenance

1.1 Coût du personnel de maintenance (COMM)

$$COMM = COOU + COOS$$

COOU = Coût du personnel pour la maintenance corrective

$$COOU = (QCA \cdot MMHC \cdot COCP + CDC)$$

QCA : Nombre d'actions correctives

MMHC : Maintenance corrective en
"heures X hommes"

par action de maintenance

COCP : Coût du travail par action de
maintenance corrective

CDC : Coût de la documentation de
maintenance corrective

Pour la maintenance préventive :

$$COOS = (QPA \cdot MMHP \cdot COPP + CDP)$$

1.1.1 Détail de chaque paramètre

Nombre d'actions correctives et préventives

Nombre d'hélicoptères = 20

Utilisation annuelle = 800 hdv/an chacun
15 ans d'exploitation

1.1.1.1 Nombre d'actions correctives (QCA)

$$Q_{CA} = \frac{\text{Nb hélicoptères} \times \text{Nb équip/hélicoptère} \times \text{Utilisation annuelle}}{\text{MTBF}}$$

Module épicycloïdal

MTBF = 5000

Utilisation annuelle = 800 X 15 = 12000 hdv

QCA = 48

Module principal

$$MTBF = 8500$$

$$Q_{CA} = 29$$

Pompe à huile principale

$$MTBF = 10000$$

$$Q_{CA} = 24$$

Pompe à huile de secours

$$MTBF = 5500$$

$$Q_{CA} = 44$$

1.1.1.2 Nombre d'actions préventives (QPA)

Détail de Q_{PA} : 1^{er} et 2^{ème} Niveaux

1^{er} Niveau

Description des actions	Périodicité	Durée
- Vérification niveau d'huile	Avant chaque vol	0,25 h
- Inspection de la queue de pignon conique	50 h	0,25 h
- Examen du bouchon magnétique module épicycloïdal	25 h	0,25 h
- Examen du bouchon magnétique module principal	100 h	0,25 h

$$Q_{PA1} = 800 \times 15 \times 20/2 = 120000$$

$$Q_{PA2} = 800 \times 15 \times 20/50 = 4800$$

$$Q_{PA3} = 800 \times 15 \times 20/25 = 9600$$

$$Q_{PA4} = 800 \times 15 \times 20/100 = 2400$$

$$M_{MHP1} = 0,25h$$

$$M_{MHP2} = 0,25h$$

$$M_{MHP3} = 0,25h$$

$$M_{MHP4} = 0,25h$$

$$\sum Q_{PA} \cdot M_{MHP} = 34200 \text{ h}$$

$$\text{Equirépartition par élément : } \frac{34200}{4} = 8550 \text{ h}$$

2ème Niveau

Description des actions	Périodicité	Durée
- Vérification des vis de fixation	50 h	2 h
- Inspection de la zone d'appui	150 h	1 h
- Recherche de suintement et de fuites d'huile sur le carter principal et les différents plans de joint	50 h	0,5 h
- Vérification de l'état général sans démontage	50 h	2 h
- Vérification de l'état général après dépose	500 h	1 h
- Mise au couple de serrage des vis de fixation des tirants	500 h	2 h
- Vérification du couple de serrage des vis de fixation de la B.T.P. sur la platine assouplie	250 h	2 h
- Vérification du couple de serrage des vis de fixation de la ferrure d'élingue	250 h	1 h
- Inspection visuelle générale externe de la B.T.P. pour s'assurer de l'absence de corrosion	150 h	1 h
- Graissage des cannelures	à chaque montage	0,5 h

QPA1 = 4 800	MMHP1 = 2 h
QPA2 = 1 600	MMHP2 = 1 h
QPA3 = 4 800	MMHP3 = 0,5 h
QPA4 = 4 800	MMHP4 = 2 h
QPA5 = 480	MMHP5 = 1 h
QPA6 = 480	MMHP6 = 2 h
QPA7 = 960	MMHP7 = 2 h
QPA8 = 960	MMHP8 = 1 h
QPA9 = 1 600	MMHP9 = 1 h
QPA10 = 96	MMHP10 = 0,5 h

$$\sum Q_{PA} \cdot M_{MHP} = 29168h$$

=> 7292 h / module

332 MKII
PROJET DE PROGRAMME INITIAL D'ENTRETIEN
B.T.P.
HORS GROUPE DE REFROIDISSEMENT

DESIGNATION DES OPERATIONS	PERIODICITES PROVISOIRES
-Vérification du niveau d'huile	Avant chaque vol
- Graissage des cannelures	A chaque montage
- Examen du bouchon magnétique module épicycloïdal	25 h
- Vérification de l'état général sans démontage : * Des fixations du couvercle 23000/800 sur carter * Des fixations du frein Bendix sur carter * Des fixations du couvercle arrière sur carter * Des chapes de fixation servo - commande * Des tirants * Des fixations du filtre sur carter * Des fixations servo - commande sur chape * Des fixations de la couronne fixe sur carter * Des fixations de couplemètre * Des fixations du bouchon de remplissage * Des fixations du couvercle sur couronne * Des fixations du voyant d'huile * Des fixations du carter conique sur couvercle * Des fixations du bouchon magnétique électrique * Du couvercle * Du support de capteur * De la plaque support de joint et glace de voyant d'huile * Des conduits de lubrification sous pression * Du bouchon de remplissage * Des obturateurs et de leurs fixations	S
- Recherche de suintement et de fuites d'huile sur le carter principal et les différents plans de joint	S
- Examen du bouchon magnétique module principal	2S
- Examen du filtre	2S
- Vérification de l'état général sans démontage : * Des fixations du couvercle de bac à huile sur bac à huile * Du frein d'écrou 23000 * Du joint torique manchon 23000 * De l'écrou de bride de frein rotor * Du manchon 23000 * Du jonc de frein d'écrou de bride de frein de rotor	T

DESIGNATION DES OPERATIONS	PERIODICITES PROVISOIRES
- Vérification de l'état général après dépose : * Des tirants * Des rondelles des tirants * De la crépine	T
- Mise au couple de serrage des vis de fixation des tirants	T
- Vérification du couple de serrage des vis de fixation de la B.T.P. sur la platine assouplie : * Appareils exploités en transport de charges à l'élingue : . Exploitants comptabilisant les cycles . Exploitants ne comptabilisant pas les cycles * Appareils non exploités en transport de charges d'élingue	1000 cycles 250 h T
- Vérification du couple de serrage des vis de fixation de la ferrure d'élingue : * Exploitants comptabilisant les cycles * Exploitants ne comptabilisant pas les cycles	1000 cycles 250 h
- Inspection visuelle générale externe de la B.T.P. pour s'assurer de l'absence de corrosion	3A ¹
- Inspection des zones d'appui du carter avec les ancrages des servocommandes pour s'assurer de l'absence de corrosion	3A ²
- Inspection de la queue de pignon conique (zone en contact avec l'atmosphère extérieure) pour s'assurer de l'absence de corrosion	A ²

1 Appareils exploités en atmosphère sévère.

2 Avant amélioration de la protection de la zone.

3ème Niveau

$$Q_{PA} = \left(\frac{H \text{ vol 1 hélicoptère}}{TBO} - 1 \right) \times Nb \text{ hélicoptères}$$

Nombre d'hélicoptères = 20

Utilisation annuelle = 800 hdv/an chacun
15 ans d'exploitation

Module épicycloïdal

TBO = 2500

Q_{PA} = 76

Module principal

TBO = 2500

Q_{PA} = 76

Pompe à huile principale

TBO = 3000

Q_{PA} = 60

Pompe à huile secours

TBO = 3000

Q_{PA} = 60

1.1.1.3 Coût de la documentation de maintenance corrective et préventive (CDC et CDP)

1^{er} et 2^{ème} Niveaux

- Manuel d'entretien (MET) -> "50 p"
- Manuel des Techniques Courantes révision (MTV) -> "1000 p"
(pour module épicycloïdal - module principal)
- Manuel d'entretien équipement -> "200 p"
(pompe à huile principal et secours)

3^{ème} Niveau

- Manuel de révision (MRV) -> "1000 p"
(pour module épicycloïdal - module principal)
- Manuel des techniques courantes générales (MTC) -> "1000 p"
(pour module épicycloïdal et module principal)
- Manuel des défaillance et diagnostics (MFI) -> "10000 p"

- Manuel de réparation (MRR) -> "10000 p"
- Catalogue illustré des pièces (IPC) -> "1000 p"
- Catalogue des outillages (ICO) -> "250"
- Catalogue complémentaire d'approvisionnement (ICA) -> "200 p"

1.1.1.3.1 Méthode de calcul du coût de la documentation

- Le coût de travail du personnel par heure = 300 F
- 10 heures de travail sont nécessaires pour faire une page
- 5% des documents sont dédiés à la B.T.P.

1er et 2ème Niveaux

Module épicycloïdal

$$C_{DP} = 40000$$

Module principal

$$C_{DP} = 40000$$

Pompe à huile principale

$$C_{DP} = 7500$$

Pompe à huile secours

$$C_{DP} = 7500$$

3ème Niveau

Module épicycloïdal

$$C_{DP} = 200000$$

$$C_{DC} = 412500$$

Module principal

$$C_{DP} = 200000$$

$$C_{DC} = 412500$$

Pompe à huile principale

C_{DP} = 54375
C_{DC} = 412500

Pompe à huile secours

C_{DP} = 54375
C_{DC} = 412500

1.2 Coût des rechanges (COMX)

1.2.1 Nombre d'éléments l demandés/commandés (Q_{MI})

$$Q_{MI} = \frac{\text{Nb hélicoptères} \times \text{Nb équip/hélicoptère} \times \text{Utilisation annuelle}}{\text{MTBF}} \times \frac{\text{TAT}}{36}$$

Nombre d'hélicoptères = 20

Utilisation annuelle = 800 hdv/an chacun
15 ans d'exploitation

TAT (Temps d'immobilisation) = 60 jours

Module épicycloïdal

MTBF = 5 000
Q_{MI} = 8

Module principal

MTBF = 8 500
Q_{MI} = 5

Pompe à huile principale

MTBF = 10 000
Q_{MI} = 4

Pompe à huile secours

MTBF = 5 500
Q_{MI} = 7

1.3 Coût des outillages (COMS)

Références	Désignation	Prix
330A91-1120-02	Elingue de pales	25000
330A93-1008-00	Clé d'orientation pales	1000
330A93-3082-00	Cale platine assouplie	1600
330A96-1100-00	Berceau de repos pales	2000
330A98-2188-20	Clé écrou à encoche	1500
332A91-3000-03	Potence de levage	180000
332A91-3121-02	Support de repos MRP	10000
332A91-3150-00	Elingue de hissage MRP	15000
332A91-3151-00	Elingue de manchon MRP	7000
332A91-3271-00	Couvercle BTP	7000
332A91-3870-00	Fausses barres BTP	10000
332A92-1190-00	Broches maintien masselottes	φ
332A93-3175-20	Broche centrage MRP/BTP	300
332A93-3182-00	Support amortisseur	400
332A93-3184-00	Cales de butées hautes	1000
332A93-3380-00	Ext. entretoise pales ar.	2000
332A93-3870-00	Ext. axes sup. barres BTP	1000
332A93-3871-00	Emmanch. Axe sup. barres BTP	2000
332A94-2770-00	Outils réglage commande de vol	10000
332A96-3175-00	Obturateur MRP	4000
703A91-0207-00	Manille de 22	400
703A92-0020-00	Sangle de guidage	500
703A93-0030-00	Ext. frein d'écrou	1000
87-20-21-30V08	Valise d'essai CROUZET	10000
HB84-30-10-01	Raccord anémo-barométrique	φ

COMS = 300000 F

$$\begin{aligned}
 \text{Equirépartition par élément} &= \frac{300000}{4} \\
 &= 75000 \text{ F}
 \end{aligned}$$

2 LE CALCUL DU COUT DE MAINTENANCE (COM)

2.1 Le calcul du coût du personnel de maintenance (COMM)

Module épicycloïdal

$$\begin{aligned} \text{COOU} &= (48 \times 250 \times 400 + 412500) \\ &= 5212500 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COOS} &= ((8550 + 7292 + 4332) \times 300 + 2800000) \\ &= 8852200 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\text{COMM1} = 14064700 \text{ F}$$

Module principal

$$\begin{aligned} \text{COOU} &= (29 \times 130 \times 400 + 412500) \\ &= 1920500 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COOS} &= ((8550 + 7292 + 4332) \times 300 + 4600000) \\ &= 10652200 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\text{COMM2} = 12572700 \text{ F}$$

Pompe à huile principale

$$\begin{aligned} \text{COOU} &= (24 \times 5 \times 400 + 412500) \\ &= 460500 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COOS} &= ((8550 + 7292 + 3420) \times 300 + 7500 + 7500 + 54375) \\ &= 5847975 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\text{COMM3} = 6308475 \text{ F}$$

Pompe à huile secours

$$\begin{aligned} \text{COOU} &= (44 \times 7 \times 400 + 412500) \\ &= 535700 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COOS} &= ((8550 + 7292 + 3420) \times 300 + 7500 + 7500 + 54375) \\ &= 5847975 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\text{COMM4} = 6383675 \text{ F}$$

$$\begin{aligned} \text{COMM} &= \text{COMM1} + \text{COMM2} + \text{COMM3} + \text{COMM4} \\ &= 39329550 \text{ F} \end{aligned}$$

2.2 Coût des rechanges (COMX)

$$COMX = C_{Mi} Q_{Mi} + C_{Hi} Q_{Mi}$$

C_{Mi} = Coût de rechange de l'élément i

Q_{Mi} = Nombre d'éléments i demandés/commandés

C_{Hi} = Coût de stockage de l'élément i
(≈ 4% du prix de rechange)

$$COMX = 1,04 C_{Mi} Q_{Mi}$$

Module épicycloïdal

$$\begin{aligned} COMX1 &= 1,04 \times 2800000 \times 8 \\ &= 23296000 \text{ F} \end{aligned}$$

Module principal

$$\begin{aligned} COMX2 &= 1,04 \times 4600000 \times 5 \\ &= 23920000 \text{ F} \end{aligned}$$

Pompe à huile principale

$$\begin{aligned} COMX3 &= 1,04 \times 75000 \times 4 \\ &= 312000 \text{ F} \end{aligned}$$

Pompe à huile secours

$$\begin{aligned} COMX4 &= 1,04 \times 80000 \times 7 \\ &= 582400 \text{ F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} COMX &= COMX1 + COMX2 + COMX3 + COMX4 \\ &= 48110400 \text{ F} \end{aligned}$$

2.3 Coût des outillages (COMS)

$$COMS = 300000 \text{ F}$$

$$\begin{aligned} COM &= COMM + COMX + COMS \\ &= 87739950 \text{ F} \end{aligned}$$

Tableau synthèse

	COMM	COMX	COMS
ME	14064700	23296000	75000
MP	12572700	23920000	75000
PHp	6308475	312000	75000
PHs	6383675	5822400	75000
Coût total	39329550	48110400	300000
	164/ F/h	200 F/h	

Coût de maintenance = 366 F/h

	WLA	GPA(1)	MMHC	MMHP(1)	QMI	COC	COP	CMHC	CMHP	CDC	CDP	CMI	COMS	GPA,MMHP (1)
1er Niveau											40 000			8 550
2ème Niveau							300				40 000			7 292
3ème Niveau							300				200 000	2 800 000	75 000	4 332
RG		76		57	8									
Maintenance Corrective	48		250			400				412 500				
1er Niveau							300				40 000			8 550
2ème Niveau							300				40 000			7 292
3ème Niveau							300				200 000	4 600 000	75 000	4 332
RG		76		57	5									
Maintenance Corrective	29		130			400				412 500				
1er Niveau							300				7 500			8 550
2ème Niveau							300				7 500			7 292
3ème Niveau							300				54 375	75 000	75 000	3 420
RG		60		57	4									
Maintenance Corrective	24		5			400				412 500				
1er Niveau							300				7 500			8 550
2ème Niveau							300				7 500			7 292
3ème Niveau							300				54 375	80 000	75 000	3 420
RG		60		57	7									
Maintenance Corrective	44		7			400				412 500				

MODULE
EPICYCLOIDAL

MTBF = 5 000
MTBR = 1 950
TBO = 2 500

MODULE
PRINCIPAL

MTBF = 8 500
MTBR = 2 150
TBO = 2 500

POMPE A HUILE
PRINCIPALE

MTBF = 10 000
MTBR = 1 900
TBO = 3 000

POMPE A HUILE
SECOURS

MTBF = 5 500
MTBR = 1 900
TBO = 3 000

ANNEXE 2

2.1. Définitions

Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement/Mean Time Between Failures (MTBF)

Estimateur obtenu en divisant le nombre d'heures de fonctionnement des équipements totalisés au cours d'une période, par le nombre de défaillances d'équipements survenues au cours de la même période.

Moyenne des Temps de Travaux de Réparation/Mean Time To Repair (MTTR)

Estimateur obtenu en divisant la somme des temps effectifs de réparation cumulés au cours d'une période pour un certain nombre d'articles spécifiés, par le nombre de ces mêmes articles réparés au cours de la même période.

Moyenne des Temps entre Déposes/Mean Time Between Removals (MTBR)

Estimateur obtenu en divisant le nombre d'heures de fonctionnement des équipements totalisés au cours d'une période, par le nombre de déposes d'équipements survenues au cours de la même période.

Moyenne des Temps entre Déposes non planifiées/Mean Time Between Unscheduled Removals (MTBUR)

Estimateur obtenu en divisant le nombre d'heures de fonctionnement des équipements totalisés au cours d'une période, par le nombre de déposes non planifiées d'équipements survenues au cours de la même période.

TAT (temps d'immobilisation/rotation)

Temps de transport aller-retour de l'équipement défectueux + temps de réparation chez le réparateur.

TSN/Time Since New

Temps de fonctionnement de l'équipement depuis sa mise en service

TSR/Time Since Repair

Temps de fonctionnement de l'équipement depuis sa dernière remise en état.

TSO/Time Since Overhaul

Temps de fonctionnement de l'équipement depuis sa dernière révision générale.

2.2 Abréviations

Q _{CA}	=	Nombre d'actions correctives
Q _{PA}	=	Nombre d'actions préventives
Q _{MI}	=	Nombre d'éléments i demandés/commandés
Q _{HI}	=	Nombre d'éléments i stockés
Q _T	=	Nombre d'allers simples
M _{MHC}	=	Maintenance corrective en "heures x hommes" par action de maintenance
M _{MHP}	=	Maintenance préventive en "heures x hommes" par action de maintenance
N _{OS}	=	Nombre de sites opérationnels
N _{MS}	=	Nombre de sites de maintenance
C _{OCP}	=	Coût du travail de maintenance corrective
C _{MHC}	=	Coût du matériel de manutention par action de maintenance corrective
C _{MHP}	=	Coût du matériel de manutention par action de maintenance
C _{DC}	=	Coût de la documentation corrective par action de maintenance corrective
C _{DP}	=	Coût de la documentation préventive par action de maintenance préventive
C _T	=	Coût de transport
C _p	=	Coût de l'emballage
C _{TOM}	=	Coût de la formation
C _{HI}	=	Coût de stockage de l'élément i
C _{MI}	=	Coût de rechange élément i
T _T	=	Durée du programme de formation

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) James V. JONES
LOGISTIC Support Analysis Handbook
- (2) Ph. de GOUTTES
Entretien des Aéronefs : Département Transport Aérien, 1988
- (3) Guide pour évaluer les coûts induits chez un transporteur aérien par un choix technique relatif à un système d'avion
Aérospatiale Division Avions, 1991
- (4) P. LEFORT et J. HAMANN
L'hélicoptère théorie et pratique, 1989
- (5) Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
Coût du cycle de vie, 1989
- (6) Roger RALETZ
Théorie élémentaire de l'hélicoptère
Aérospatiale Division Hélicoptères, 1990
- (7) Fiabilité opérationnelle
Aérospatiale Division Hélicoptères
- (8) Customer Support : 332 MK2 Analyse M.S.G 3
Système, B.T.P. Module principal, 1991
Aérospatiale Division Hélicoptères
- (9) Analyse de pannes du module principal de la B.T.P. 332 MK2, 1989
Aérospatiale Division Hélicoptères
- (10) Marcel THOMAS
Integrated Logistics Support, 1991