

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Blida
Institut d'aéronautique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme d'études
Appliquées en aéronautique

D.E.U.A

OPTION : PROPULSION



024/2002



OPTIMISATION D'UN PROGRAMME DE
MAINTENANCE D'UNE TURBOMACHINE
AERONAUTIQUE PAR LES TECHNIQUES DE
DETECTION ET DE DIAGNOSTIC DES
DEFAILLANCES

Révisé par :

Melle: BALEH Yasmina

Promoteur :

Mr MEFTAH A/Matek

Co-Promoteur :

Mr LARBI FARID

Promotion : 2002

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Blida

Institut d'Aéronautique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

**En vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Universitaires
Appliquées en Aéronautique**

D . E . U . A

OPTION : PROPULSION



THEME

**OPTIMISATION D'UN PROGRAMME DE
MAINTENANCE D'UNE TURBOMACHINE
AERONAUTIQUE PAR LES TECHNIQUES DE
DETECTION ET DE DIAGNOSTIQUE DES
DEFAILLANCES**

Réalisé par :

Melle: BALEH Yasmina

Promoteur :

Mr MEFTAH A/Malek

Co-Promoteur :

Mr LARBI Farid

Promotion: 2002

Dédicaces

En hommage à l'être le plus merveilleux que j'ai connu sur cette terre, à l'étincelle de ma vie. À celui qui m'a toujours donné de l'espoir et de la volonté dans tous mes projets, à mon cher père.

À celle qui m'a accompagné dans le chemin de la Vie et qui a souffert pour voir un sourire se dessiner sur mes lèvres, à la source de beauté et de sagesse, ma très chère mère.

À mes frères, à mes sœurs et à toute ma famille qui m'ont soutenu pendant toutes mes années d'études.

À mon cher frère Adda et à ses amis Amrane et Riad.

À toutes mes amies.

Yasmina

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail je tiens à remercier en premier lieu le dieu miséricordieux qui m'a donné la force pour achever cette étude.

Je remercie vivement et du fond du cœur mon encadreur monsieur M. F. J. A. / Malek pour m'avoir encadré durant toute la durée du stage, et pour m'avoir non seulement orienté vers ce travail, mais également pour n'avoir ménagé ni son temps ni son effort à m'assister jusqu'à la réalisation du projet.

Je tiens à remercier monsieur L. A. R. B. I. / Farid qui m'a suivi de près.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur le directeur de L'URD-MA et à monsieur A. M. R. A. N. E. / Karim qui m'ont permis de passer mon stage pratique.

Mes remerciements vont aussi à tout le personnel de L'URD-MA pour leur qualité d'accueil et leur aide précieuse.

Que toute personne ayant œuvré de près ou de loin à la réalisation de ce travail par un simple conseil, un mot d'encouragement, ou par toute autre forme de contribution; trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Yasmina

SOMMAIRE

➤ DEDICACES

➤ REMMERCIEMENTS

I- INTRODUCTION GENERALE.....	1
I-1 INTRODUCTION.....	1
I-2 SITUATION DU PROBLEME.....	2
II- LA FONCTION MAINTENANCE.....	4
II-1 INTRODUCTION.....	4
II-2 DEFINITION DE LA MAINTENANCE.....	4
II-3 OBJECTIFS ET MISSIONS DE LA MAINTENANCE.....	5
II-4 IMPORTANCE DE LA FONCTION MAINTENANCE.....	6
II-5 OPERATIONS ET ORGANISATIONS DE LA MAINTENANCE.....	7
III- LES POLITIQUES DE MAINTENANCE.....	10
III-1 INTRODUCTION.....	10
III-2 LA MAINTENANCE CORRECTIVE.....	10
III-3 LA MAINTENANCE PREVENTIVE.....	11
III-4 LA MAINTENANCE PREDICTIVE.....	12
IV- MAINTENANCE DES TURBOMACHINES AERONAUTIQUES	17
IV-1 TECHNOLOGIE DES PROPULSEURS.....	17
IV-2 DOCUMENTS DE LA MAINTENANCE AERONAUTIQUE.....	28
IV-3 PROGRAMME DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE OPTIMISE...	34

V- MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE MAINTENANCE PREDICTIVE DES TURBOMACHINES AERONAUTIQUES.....	38
V-1 REGLES DE MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE SURVEILLANCE.....	38
V-2 MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE.....	41
V-2-1 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE D'ANALYSE DES HUILES.....	41
V-2-2 MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF.....	47
V-2-3 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE DE SURVEILLANCE DES TENDANCES.....	61
V-2-4 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE D'ANALYSE VIBRATOIRE.....	69
VI- ELABORATION D'UNE BASE DE DONNEES.....	75
V-1 IMPORTANCE DE L'INFORMATISATION DE LA FONCTION MAINTENANCE..	75
V-2 PRESENTATION DE <i>SGS-OM</i>	77
VII- CONCLUSION.....	83
VIII- BIBLIOGRAPHIE.....	84
IX- ANNEXE.....	85

I- INTRODUCTION GENERALE

1 INTRODUCTION

Les exigences de compétitivité obligent aujourd'hui les entreprises à développer des politiques de maintenance pour réduire et optimiser les coûts et les prix de revient des équipements. L'exploitation des équipements doit être conduite aujourd'hui avec le double souci de la sécurité et de l'économie. La sécurité est garantie par le maintien dans le temps des performances et des caractéristiques de ces équipements. Quant à l'économie, qui est fonction des coûts d'acquisition, des coûts d'exploitation et des coûts de maintenance, elle est assurée par la diminution du coût global de possession.

La fonction maintenance prend une nouvelle dimension, aidée par l'avancée technologique dans les domaines de l'informatique, de l'électronique, des techniques de surveillance et des outils de traitement et d'analyse. La maintenance est en évolution permanente. Les techniques et les conceptions d'organisation se sont adaptées à de nouveaux besoins dont le but est la maîtrise des coûts de maintenance ; c'est à dire, les coûts des arrêts de production qu'ils soient prévus ou non. Perçue à l'origine comme un mal nécessaire, la maintenance tend à devenir un levier majeur de performance ; des équipements, elle est au centre d'une démarche qualité. Depuis la modernisation de l'outil productif et l'introduction des nouvelles technologies de production.

L'étude de projet « optimisation d'un programme de maintenance d'une turbomachine aéronautique par les techniques de détection et diagnostique des défaillances » suivre le plan suivant :

Le chapitre I essaie de situer le problème par une étude comparative entre les différents concepts de maintenance existants.

Le chapitre II est réservé exclusivement à la fonction maintenance, vu l'importance qu'elle a dans n'importe quel processus industriel. On citera les fonctions ayant des objectifs communs avec la fonction maintenance. Aussi on citera les opérations et l'organisation de cette dernière.

Le chapitre III présente les politiques de maintenance à savoir la maintenance préventive et la maintenance corrective. On s'étalera sur le principe de chaque concept et sur les opérations qui lui sont attribuées.

Le chapitre IV s'intéresse à un domaine industriel très important et stratégique, il s'agit du domaine aéronautique, on s'étalera sur la technologie des propulseurs (turboréacteur et turbopropulseur) et sur les documents utilisés en maintenance aéronautique. Une étude de l'existant révèle la nécessité d'optimisation du programme reposant sur la maintenance préventive systématique, on trouvera l'ébauche de la solution proposée s'articulant sur le concept de la maintenance prédictive.

Le chapitre V montre les conditions et modalités d'application du programme de maintenance optimisé, les techniques concernées sont l'analyse des huiles, le contrôle non destructif, l'analyse vibratoire et la surveillance des tendances.

Le chapitre VI attire notre attention sur l'importance de l'informatisation de la fonction maintenance et présente le système de gestion et de suivi des opérations de maintenance élaborée par le SGBD Access sous Windows. Enfin une conclusion clôturera cette étude.

2 SITUATION DU PROBLEME

Le projet « Optimisation d'un programme de maintenance d'une turbomachine aéronautique par les techniques de détection et diagnostique des défaillances » se veut une contribution pour une meilleure prise en charge de la fonction maintenance. A notre avis cette prise en charge doit prendre en compte les évolutions enregistrées à travers le monde dans le domaine de la maintenance aéronautique.

Le cas qu'on va étudier concerne une compagnie aérienne qui exploite différents types d'avions, par conséquent de moteurs, mais malheureusement son programme de maintenance repose uniquement sur le concept de la maintenance préventive systématique. Ce qui a engendré de grandes pertes financières vu le taux très élevé d'indisponibilité des aéronefs. L'ancien concept de maintenance consiste à effectuer des déposes systématiques, obéissant aux limitations d'emploi fixées par le fabricant d'origine. Ces limitations sont la durée de vie et le temps entre révisions.

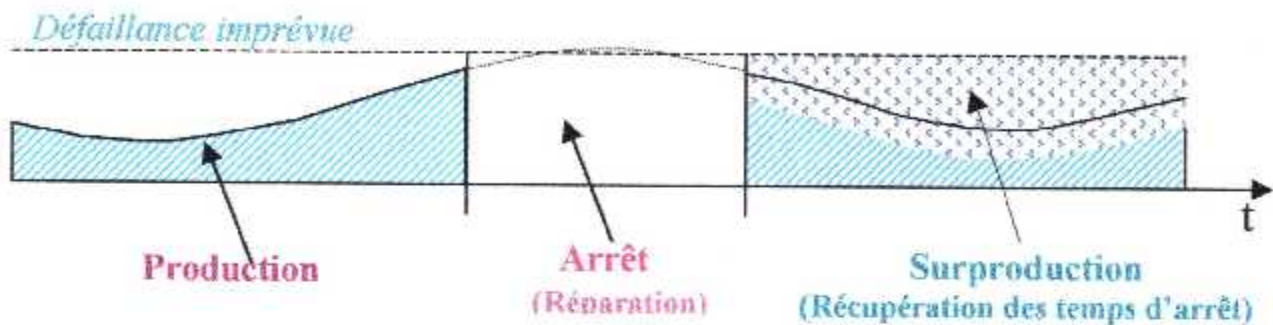
La solution proposée pour l'amélioration de la situation de cette compagnie concerne l'élaboration d'un nouveau programme de maintenance, qui par l'apport de méthodes d'entretien modernes, permet de satisfaire les objectifs de sécurité, tout en réduisant les coûts d'exploitation. Ce dernier s'articulera sur les axes suivants :

- L'adoption du concept de la maintenance prédictive comme nouvelle stratégie ;
- L'introduction des techniques de maintenance prédictive en exploitation ;
- La mise à jour des documents et procédures de la maintenance aéronautique ;
- L'informatisation de la fonction maintenance par l'élaboration d'un système de gestion et de suivi des opérations de maintenance des turbomachines en exploitation.

L'étude comparative suivante entre les différents concepts de maintenance valide notre choix et montre l'intérêt qu'il faut donner pour ce nouveau concept.

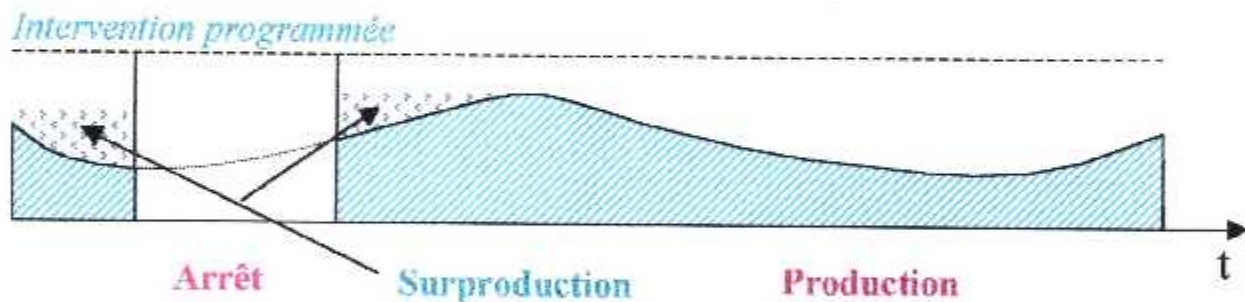
➤ **MAINTENANCE CORRECTIVE : APRES PANNE OU DEFAILLANCE**

- ↳ nécessite une équipe d'entretien surdimensionnée ;
- ↳ ne permet pas de maîtriser la disponibilité des équipements.



➤ **MAINTENANCE SYSTEMATIQUE : SUIVANT UN ECHEANCIER ETABLI SYSTEMATIQUENT**

- ↳ engendre le remplacement prématuré de composants ;
- ↳ ne permet pas de prendre en compte l'évolution réelle de leur état.



➤ **MAINTENANCE PREDICTIVE : SUIVANT L'ETAT DU SYSTEME (MESURE OU PRESUME)**

- ↳ Adaptation des actions de maintenance en fonction de l'état réel des équipements ;
- ↳ Réduction des interventions non programmées ;
- ↳ Réduction des coûts ;
- ↳ Amélioration de la disponibilité ;
- ↳ Amélioration de la sécurité des personnels.

II- LA FONCTION MAINTENANCE ✕

II-1 INTRODUCTION

Chaque type d'entreprise justifie une organisation de la maintenance correspondant à sa spécificité. Pour améliorer la fonction maintenance, il est impossible d'isoler cette fonction des autres fonctions de l'entreprise. Il faut donc intégrer et faire participer à cette fonction d'autres fonctions qui ont plus ou moins directement une influence sur la gestion et l'organisation de la maintenance, donc sur ses coûts et son efficacité.

Les fonctions qui ont des objectifs communs avec la fonction maintenance sont les suivantes :

- La fonction méthodes et fabrication ;
- La fonction achats ;
- La fonction gestion des stocks de fournitures et des pièces de rechange ;
- La fonction métrologie ;
- La fonction normalisation ;
- La fonction financière ;
- La fonction gestion des ressources humaines ;
- La fonction sécurité.

II-2 DEFINITION DE LA MAINTENANCE : ✕

La norme **NF X 60-010** définit la maintenance comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

La maintenance est donc l'ensemble d'opérations d'entretien préventif et curatif destinées à accroître la fiabilité ou pallier les défaillances des biens pour les maintenir en état de marche et fournir aux exploitants un matériel sûr, efficace, économique et dans les délais.

II-3 OBJECTIFS ET MISSIONS DE LA MAINTENANCE

II-3-1 Les objectifs de la maintenance :

La fonction maintenance vise à atteindre les objectifs suivants :

- **Assurer la production prévue**

L'outil de production doit assurer un fonctionnement maximal pour assurer une production maximale. La fonction maintenance et la fonction production doivent travailler en collaboration pour satisfaire au mieux les tendances des fabricants et les arrêts nécessaires à la maintenance. Il faut donc tenir compte de la disponibilité prévue et de la sécurité de fonctionnement imprévue.

- **Maintenir la qualité du produit fabriqué**

La qualité des produits fabriqués dépend en grande partie de la qualité de l'outil productif. La maintenance doit préparer ces machines dans un état acceptable et sans défaillance pour assurer une production de qualité.

- **Respecter les délais :**

Les programmes de production doivent se faire en collaboration avec la fonction fabrication pour pouvoir contrôler les délais de fabrication et les délais de maintenance.

Il faut garantir le bon fonctionnement des machines pendant les périodes prévues pour la production.

- **Réduire les coûts :**

La réduction des coûts est assurée par la minimisation des pertes de production, dues aux défaillances non prévues des machines, par la qualité des produits fabriqués, par les améliorations apportées et par la mise en oeuvre des politiques de maintenance qui assurent une économie en pièces de rechange, en délais d'intervention et en main-d'œuvre d'exécution.

- **Assurer la sécurité d'emploi :**

La maintenance doit se préoccuper des accidents que ces interventions peuvent occasionner tant pour ses propres membres que pour le personnel de fabrication.

Les conditions de travail et la sécurité ne peuvent être ignorées la maintenance doit prendre les dispositions nécessaires pour assurer une sécurité d'emploi et de fonctionnement optimal.

- **Préserver l'environnement :**

Le service maintenance ne s'occupe pas uniquement des machines, il doit entretenir tous ce qui les entoure. La maintenance incombe souvent la lutte contre les pollutions et les nuisances.

II-3-2 Les missions de la maintenance :

La fonction maintenance a pour missions :

- La mise en oeuvre des politiques de maintenance ;
- L'organisation, la gestion, le contrôle et l'évaluation de l'activité maintenance ;
- Le maintien du niveau de maintenance désiré au moindre coût ;
- La réalisation des modifications et des améliorations nécessaires ;
- L'assistance des autres fonctions lors de l'exécution de leurs tâches.

II-4 IMPORTANCE DE LA FONCTION MAINTENANCE

Le coût annuel de la maintenance représente généralement de 08 à 10 % de la valeur d'acquisition du matériel, dans certains secteurs ce coût peut être bien plus élevé. Le coût de la maintenance a tendance à s'accroître en valeur absolue et relative pour atteindre couramment, suivant l'entreprise, entre 10 et 30 % du prix de revient du produit. A titre d'exemple il représente un taux de 05 % du chiffre d'affaires de l'industrie chimique. L'augmentation de ce taux est directement fonction du développement de l'automatisation des équipements de production. La maintenance représente 30 à 40 % des effectifs en sidérurgie. En moyenne, les différentes évaluations tous secteurs confondus (mais les différences peuvent être grandes d'un secteur à l'autre), donnent :

- 06 à 10% des effectifs de production ;
- 06 % du chiffre d'affaires ;
- 10 à 30% de la valeur ajoutée, selon les branches.

Selon une étude réalisée en France, près de 600.000 personnes dont plus de 50.000 cadres travaillent dans des activités de maintenance (en comptant les effectifs des entreprises prestataires de service), soit un chiffre de près de 200 milliards de francs.

II-5 OPERATIONS ET ORGANISATION DE LA MAINTENANCE X

II-5-1 LES OPERATIONS DE MAINTENANCE

La maintenance du matériel technique comprend l'entretien, la remise en état et le ravitaillement.

1- ENTRETIEN

C'est l'ensemble des opérations à caractère systématique, pour chaque type de matériel, destinées à prévenir les altérations ou à limiter leur développement de façon à :

- Maintenir le matériel en service apte à l'emploi ;
- Assurer la conservation du matériel en approvisionnement ou en attente.

Ces opérations caractérisées par une périodicité, se divisent en deux groupes :

- **La surveillance** : destinée à contrôler l'évolution des altérations connues et à déceler les altérations nouvelles ;
- **Le maintien en état** : destiné à prévenir ou à limiter le développement des altérations et à remédier leurs conséquences.

Suivant la fréquence et l'importance des opérations qu'il comporte, l'entretien correspond à trois stades :

- **L'entretien élémentaire** : comprend des opérations de faible importance qualitative et de fréquence élevée. Son exécution n'entraîne pas l'indisponibilité du matériel.
- **L'entretien mineur** : comprend des opérations d'importance qualitative et de fréquence moyenne, entraînant l'immobilisation du matériel qui devient indisponible pour l'emploi.
- **L'entretien majeur** : comprend des opérations de fréquence faible mais d'importance qualitative élevée, dont l'exécution doit être confiée à des organismes de maintenance possédant des installations techniques importantes et un personnel hautement qualifié.

2- REMISE EN ETAT

C'est l'ensemble des opérations éventuelles ayant pour but de remédier aux avaries accidentelles ou aux altérations dont l'évolution brutale entraînerait ou serait susceptible d'entraîner des détériorations importantes risquant d'avoir des conséquences graves sur le comportement général du matériel et le rendant inapte à l'emploi.

Suivant leur importance et leur caractère d'urgence les remises en état sont classées en :

- **Retouches** : remises en état mineures dont l'exécution est possible à l'occasion des immobilisations normalement prévues pour l'entretien du matériel ;
- **Réparations** : remises en état importante ou dont l'exécution entraîne l'immobilisation immédiate du matériel ;
- **Révisions générales** : Le matériel peut faire l'objet de révisions générales où sont effectuées des opérations qui lui redonnent une qualité équivalente à celle du matériel neuf.

Certains travaux comme l'exécution des modifications, les récupérations, et les confections, bien que ne constituant pas des opérations de maintenance, sont néanmoins exécutés par les organismes de maintenance.

3- RAVITAILLEMENT

C'est l'ensemble des activités ayant pour but :

- De commander et de mettre en place les moyens matériels de toute nature (ensembles rechanges, outillages, matières premières ...etc.) nécessaires à l'exécution des opérations de mise en œuvre d'entretien et de remise en état ;
- De remplacer, soit par du matériel neuf, soit par du matériel remis en état ou récupéré.

Le ravitaillement comprend :

- **L'approvisionnement et le réapprovisionnement** : groupant les opérations destinées à assurer la constitution et le renouvellement des stocks ou des quantités de matières et matériels destinés à couvrir les besoins pendant une période ou pour un travail déterminé ;
- **Le magasinage** : c'est la mise et la conservation en magasin des matières et des matériels approvisionnés.

II-5-2 ORGANISATION DE LA MAINTENANCE X

La maintenance est organisée en échelons. Un **échelon de maintenance** est un ensemble de moyens en matériels et en personnels, permettant de faire face à des charges de maintenance qualitativement et quantitativement définies.

Un échelon de maintenance peut assurer simultanément des charges d'entretien, de remise en état et de ravitaillement.

Les opérations de maintenance des matériels techniques sont classées en fonction de leur nature et de leur importance en quatre échelons :

- **1^{er} échelon** : comprend les moyens qui permettent aux utilisateurs de satisfaire leurs besoins immédiats, permettant des petites retouches, mais limitées tant par les moyens d'exécution que par les temps d'immobilisation du matériel ;
- **2^{ème} échelon** : constitué par les organismes placés normalement au niveau du service de maintenance. Les charges confiées à cet échelon comprennent l'entretien mineur et les travaux de remise en état compatibles avec les moyens d'exécution et les délais d'immobilisation imposés par l'exécution du plan d'entretien, de dépannage et de récupération ;
- **3^{ème} et 4^{ème} échelon** : constitués par des moyens à caractère industriel plus ou moins développés qui dépassent de loin les moyens mis à la disposition du service de maintenance.

III- LES POLITIQUES DE MAINTENANCE

III-1 INTRODUCTION

La construction et la mise en exploitation d'une turbomachine nécessitent la conception et l'intégration d'un nombre considérable de modules et de pièces. La fonction maintenance a le devoir de veiller sur la sécurité du personnel et d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble de ces modules et pièces, par des opérations de démontage, de rechange, de montage et de contrôle. Et parfois d'apporter les améliorations et les modifications nécessaires. Le tout doit se faire dans le respect total des normes d'exploitation et des exigences de la qualité.

La maintenance, définie comme étant un ensemble d'opérations qui a pour finalité la restauration des performances, le maintien du potentiel et le maintien de la disponibilité, a connu le développement de plusieurs concepts pour répondre le mieux aux exigences économiques et opérationnelles. On distingue deux grands concepts :

- La maintenance préventive ;
- La maintenance corrective.

Si dans le concept de la maintenance corrective il ne faut intervenir qu'après panne pour restaurer l'état ou remédier aux avaries de fonctionnement. Dans le concept de la maintenance préventive il ne faut pas attendre la panne mais agir systématiquement, selon une butée calendaire ou horaire, par des opérations de rechanges programmées (maintenance systématique) ou agir après dégradation de paramètres caractéristiques (maintenance prédictive).

La fonction maintenance évolue vers l'expertise, cela est rendu possible grâce aux techniques de la maintenance prédictive, dont la finalité est d'éviter les pannes et non de les corriger. Le concept de la maintenance prédictive se distingue des autres concepts par son aptitude à améliorer la sécurité et la disponibilité et à diminuer les coûts de maintenance.

III-2 LA MAINTENANCE CORRECTIVE

Dans la maintenance corrective il ne faut intervenir qu'après panne pour restaurer l'état ou remédier aux avaries de fonctionnement. Les opérations de maintenance corrective concernent :

- **La localisation** : action conduisant à rechercher précisément le ou les éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
- **Le dépannage** : action effectuée sur un bien en panne en vue de le remettre provisoirement en état de fonctionnement avant réparation ;

- **La réparation** : action effectuée après panne en vue de le remettre définitivement en état de fonctionnement ;
- **La rénovation** : action inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces ou sous-ensembles défailants, conservation des pièces bonnes ;
- **La modification** : opération à caractère définitif sur un bien en vue d'en améliorer le fonctionnement, ou d'en changer les caractéristiques d'emploi.

III-3 LA MAINTENANCE PREVENTIVE

La maintenance préventive est définie selon la norme «AFNOR X60-010 » comme étant : « Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu ». C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. La maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilités de dysfonctionnement des systèmes de production. Elle peut être systématique ou prédictive.

La maintenance systématique est définie selon la norme «AFNOR X60-010 » comme étant « Maintenance préventive effectuée suivant un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage ». Selon un planning prévu et établi, ce type d'intervention permet d'effectuer des opérations systématique de maintenance, afin d'éliminer ou de diminuer les risques de défaillance.

La maintenance prédictive est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé révélateur de l'état de dégradation du bien. Elle permet, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc de planifier une intervention avant défaillance. Cela signifie que l'on interviendra sur une machine que de façon conditionnelle ; c'est à dire uniquement si certains paramètres évoluent de façon significative. La maintenance prédictive permet une augmentation de la longévité du matériel, un coût des réparations moins élevé, une amélioration de la sécurité et une plus grande motivation du personnel. Les opérations de maintenance préventive concernent :

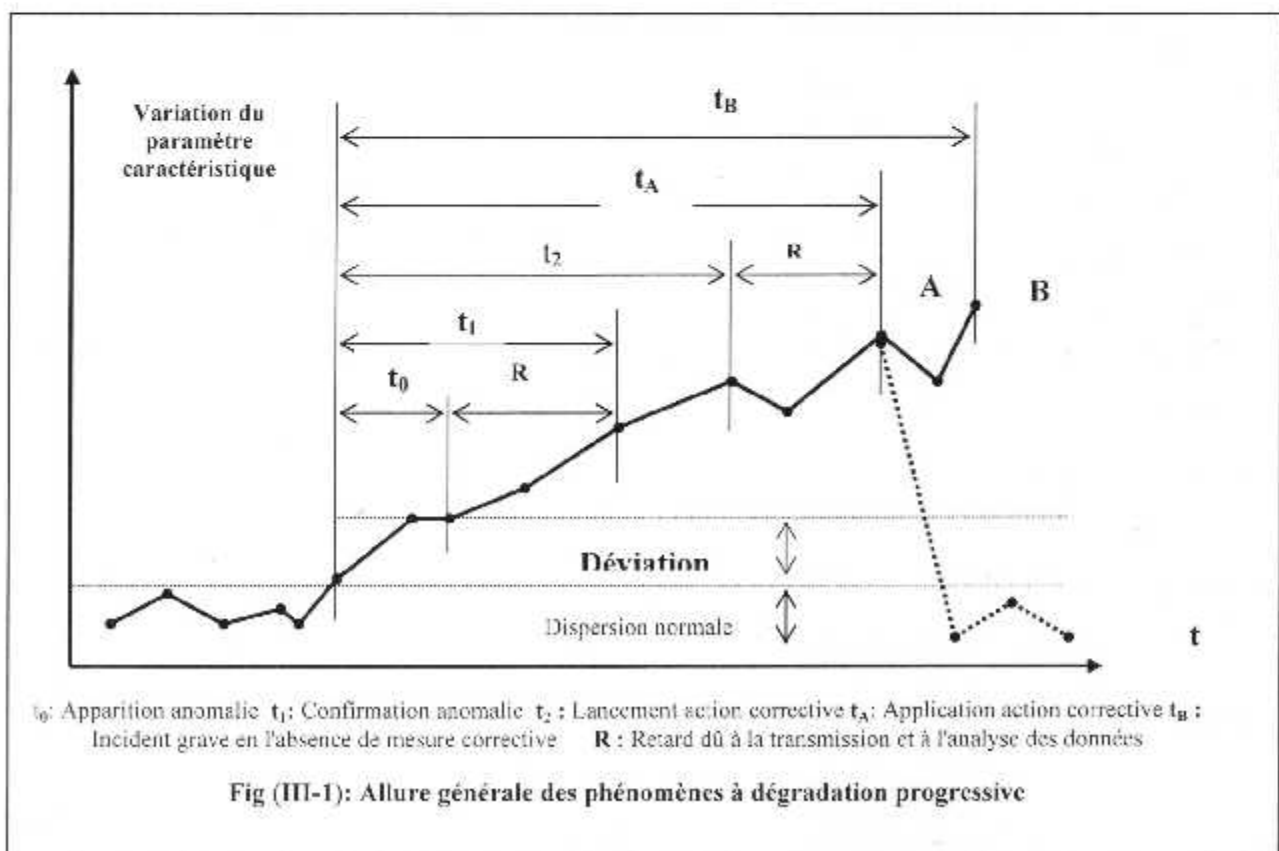
- **L'inspection** : activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie et qui n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies ;
- **Le contrôle** : vérification de la conformité des données préétablies ;

- **La visite**: opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tous (visite générale) ou d'une partie (visite limitée) des éléments du bien ;
- **Le test** : opération permettant de comparer les réponses d'un système à une sollicitation appropriée et définie, avec celle d'un système de référence ou avec un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

III-4 LA MAINTENANCE PREDICTIVE

III-4-1 Principe

Il s'agit d'assurer une surveillance continue des dégradations progressives pour prévenir l'incident par dépose de l'équipement à un seuil de déviation fixé par l'expérience. Cette méthode suppose que l'incident prend un certain temps pour se développer, permettant ainsi le lancement d'actions correctives préventives avant la phase finale de dégradation, pour confirmer la signature de panne et éventuellement corriger le défaut constaté (fig (III-1)). L'efficacité de cette méthode est assurée par la rapidité d'acquisition et de traitement des données et la fiabilité de leur interprétation. L'expérience a montré qu'un même type d'incident n'entraîne pas toujours sur deux turbomachines identiques la même signature de panne, pour cela, il est impératif de prendre en compte les informations réunies sur l'état de la machine, les résultats d'inspections, les actions de maintenance entreprises et les différentes anomalies signalées.



III-4-2 Les techniques de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive ou conditionnelle comprend les opérations qui ont pour but de déterminer l'état de santé de la machine. On subdivise ces opérations en :

- Celles qui apportent la connaissance de l'état à un instant donné (surveillance de l'état) ;
- Celles qui permettent d'apprécier l'altération de l'état par référence à la connaissance du comportement (surveillance du comportement).

III-4-2-1 Surveillance de l'état

1- Surveillance du circuit d'huile

L'état mécanique des parties lubrifiées d'une turbomachine peut être connu avec une bonne précision à partir de l'analyse d'huile ou des particules recueillies sur les filtres ou les bouchons magnétiques. La dégradation des pièces lubrifiées donne deux sortes de particules métalliques, les particules de grandes dimensions et les particules infiniment petites, permettant de déduire l'état de santé de l'ensemble surveillé. La surveillance du circuit d'huile s'exerce par les procédés suivants :

- **Analyse spectrométrique des huiles** : les particules libérées par frottement des organes en mouvement polluent l'huile de graissage. L'analyse spectrale de cette huile permet d'établir, par rapport à une huile étalon, la nature des particules et la concentration pour chaque élément. Un guide de signature de panne élaboré à partir de la carte métallurgique d'une turbomachine donnée, permet de déterminer l'urgence de l'intervention et de localiser l'origine de l'anomalie ;
- **Analyse des particules** : l'analyse des particules recueillies sur les bouchons magnétiques ou sur les filtres amène un complément d'information qui permet de déterminer les éléments défectueux. Cette méthode consiste à effectuer un examen macroscopique et une analyse métallurgique des particules ;
- **Suivi de la consommation horaire d'huile** : une évolution importante de la consommation horaire d'huile est le symptôme d'une avarie dans le système d'étanchéité ou d'une défection d'un élément du circuit de graissage.

2- Contrôle non destructif

Parmi les méthodes de contrôle non destructif connues (endoscopie, ressuage, courants de Foucault, rayons X, rayons Gamma, ultrasons, magnétoscopie et émission acoustique), la maintenance prédictive des turbomachines s'intéresse surtout aux contrôles par endoscopie, rayons X et rayons Gamma.

-Contrôle endoscopique : Le contrôle endoscopique consiste à examiner les parties internes d'une turbomachine à l'aide d'un endoscope flexible ou rigide pour la détection des défauts superficiels et des déformations dès leur apparition ou après une certaine évolution ;

-Contrôle par rayons X et rayons Gamma : Le contrôle par radiographie X ou Gamma est utilisé pour la détection des défauts internes tels que criques, corrosion, et variations d'épaisseur dans les parties chaudes des turbomachines. On fait traverser l'élément à contrôler par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde et on recueille les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas ;

-Contrôle par thermographie infrarouge : Le contrôle par thermographie infrarouge consiste à examiner les parties internes d'une turbomachine à l'aide d'une caméra infrarouge pour la détection des défauts de structure par l'analyse des rayonnements émis par un matériau chauffé.

III-4-2-2 Surveillance du comportement

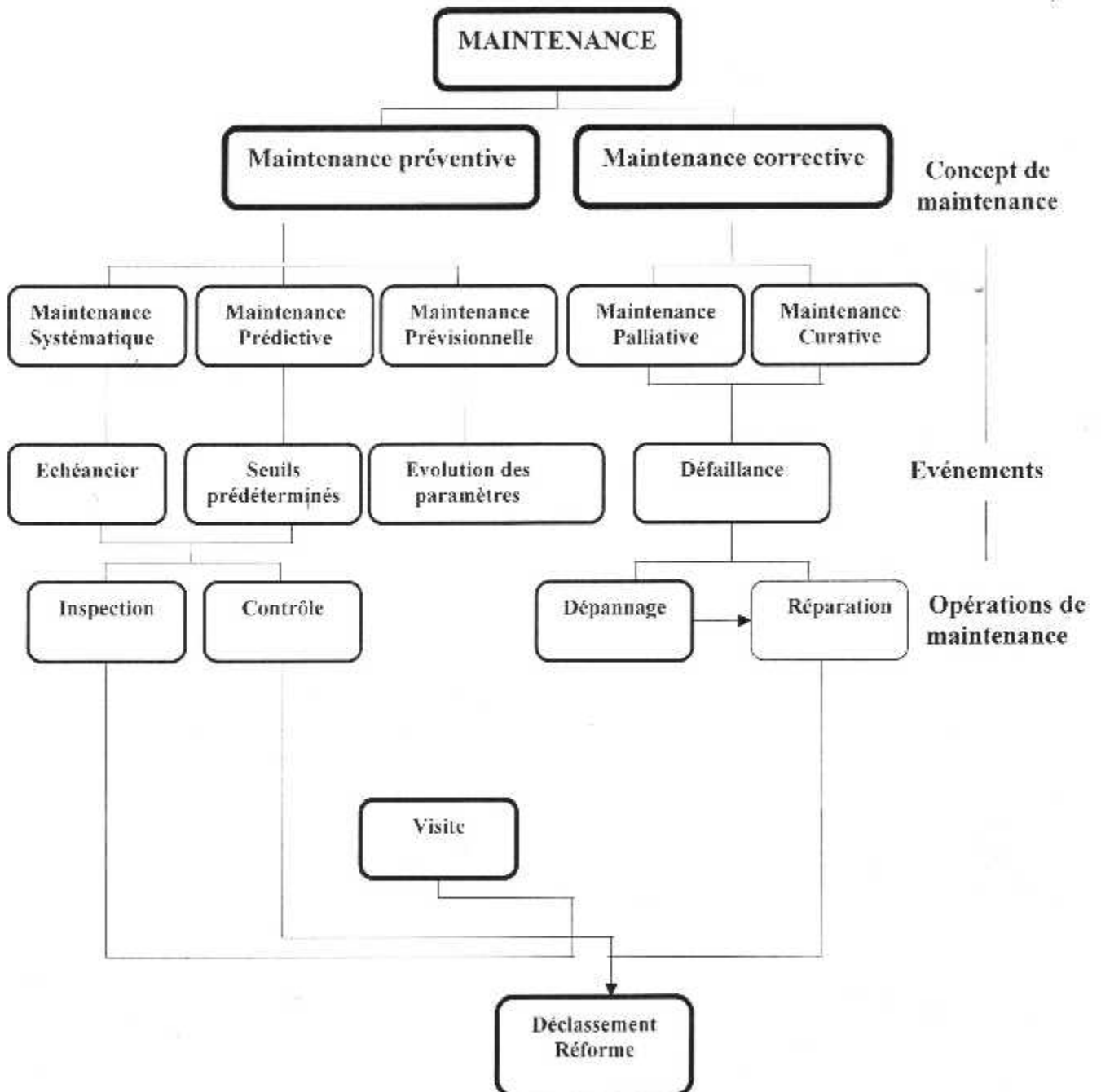
1- Analyse des vibrations

Tout ensemble tournant est générateur de vibrations. L'évolution du niveau vibratoire d'une turbomachine est significative d'une dégradation. Les signaux vibratoires rencontrés sur les machines tournantes ont souvent une structure complexe car ils résultent de la somme d'un nombre parfois important de vibrations élémentaires, difficilement exploitable. Afin de faciliter l'exploitation de ces signaux, il est nécessaire de les décomposer en spectre. L'analyse des vibrations s'effectue de deux façons, par la mesure du niveau global de vibration à partir de la mesure des vitesses de déplacement à l'aide d'un capteur qui délivre une charge électrique proportionnelle aux efforts qui lui sont appliqués et par l'analyse du niveau vibratoire. Le signal transmis par les capteurs de vibration est analysé par rapport à des fréquences de référence afin de déterminer l'organe défectueux.

2- Surveillance des paramètres de fonctionnement

Le monitoring des paramètres de fonctionnement est un outil de maintenance très performant, il consiste à faire une surveillance continue des paramètres thermodynamiques et des paramètres mécaniques, dans le but de déceler tout indice de dégradation progressive pour déclencher les actions correctives adéquates. L'analyse de ces paramètres repose sur la définition d'une turbomachine de référence, représentant statistiquement toutes les turbomachines d'un type donné. Cette définition consiste en un ensemble d'équations thermodynamiques valables pour un point de fonctionnement. On introduit les paramètres de la machine surveillée dans l'ensemble d'équations, il en résulte des écarts de performances (écart de rendement, écart de puissance, et écart de consommation spécifique). L'exploitation des écarts obtenus, complétée par la connaissance de l'historique de la turbomachine par référence à un guide de pannes, permet de formuler un diagnostic sur l'état de la machine à un instant donné. La réussite dans la surveillance des paramètres dépend de la collecte, du traitement et de l'interprétation des données fournies par des équipements spécifiques. Le monitoring a évolué de façon à diminuer l'action humaine sur l'analyse et l'expertise des données et cela en la remplaçant par un système expert qui transforme les données recueillies en informations utiles, profitant des progrès technologiques réalisés dans les domaines de l'électronique et de l'informatique.

DIFFERENTS CONCEPTS DE MAINTENANCE



IV- MAINTENANCE DES TURBOMACHINES AERONAUTIQUES

IV-1 TECHNOLOGIE DES PROPULSEURS

IV-1-1 ROLE D'UN PROPULSEUR

Pour qu'un aéronef puisse prendre son envol, il faut lui communiquer pendant sa course de décollage, une vitesse, afin que naisse sur sa structure (voilure, fuselage) une résultante aérodynamique R . Lorsque la vitesse de l'aéronef est suffisante et que la composante verticale de la résultante aérodynamique (portance) devient supérieure au poids de l'aéronef, celui-ci prend son envol. Le rôle du moteur est donc d'assurer l'accélération de l'aéronef au décollage et de fournir, en vol stabilisé rectiligne, une force opposée et égale à la traînée de l'avion.

IV-1-2 DIFFERENTS TYPES DE PROPULSEURS

Les propulseurs sont divisés en deux grandes catégories :

1- Moteurs à propulsion directe

Ces moteurs sont ainsi nommés car ils produisent directement une force, leur caractéristique est appelée la poussée. Dans cette grande famille, sont rassemblés :

- Les Groupes Turbo Réacteurs dont l'appellation courante est GTR ;
- Les statoréacteurs et les fusées.

2- Moteurs à propulsion indirecte

Ces moteurs sont ainsi nommés car ils ne produisent pas directement une force, mais délivrent une puissance sur arbre. Cette puissance sur arbre est ensuite convertie en puissance propulsive par un organe assurant la production d'une traction (hélice).

Ces moteurs se subdivisent en deux catégories bien distinctes :

- Les Groupes Moteurs à Pistons dont l'appellation usuelle est GMP ;
- Les Groupes Turbo Propulseurs plus couramment appelés GTP.

IV-1-3 DIFFERENTS TYPES DE TURBOREACTEURS

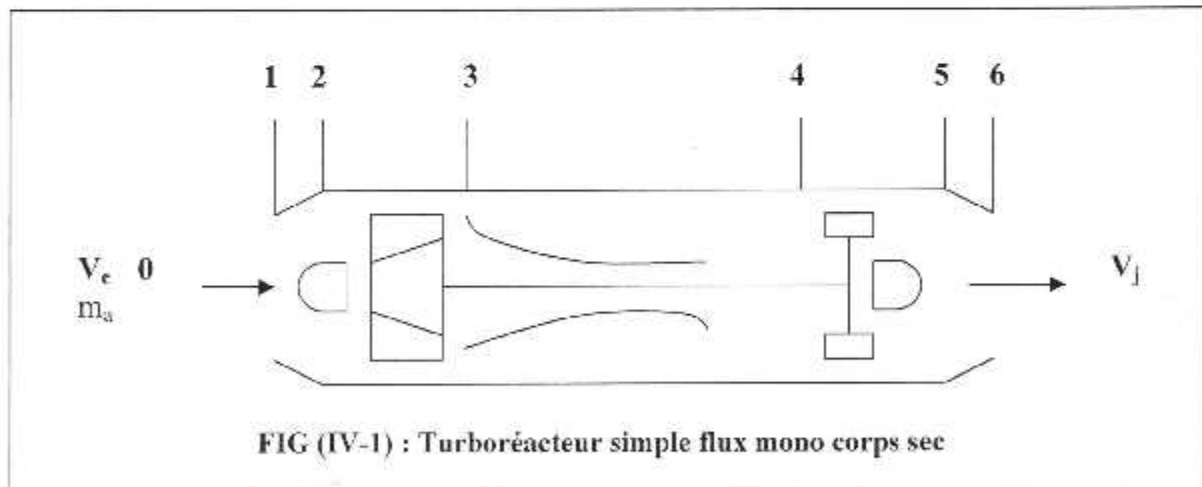
La poussée d'un turbo réacteur est générée principalement par la variation de vitesse du débit masse le traversant. Au sol le débit masse d'air est nul, afin d'établir ce débit d'air sur les turbomachines, les constructeurs font appel à des compresseurs qui augmentent l'énergie de pression des gaz le traversant. Cet air comprimé est ensuite mélangé à du carburant, enflammé uniquement au démarrage, la combustion devant s'auto entretenir.

L'accroissement de température des gaz élève à nouveau leur énergie. Afin d'entraîner en rotation le compresseur, des turbines sont installées derrière la chambre de combustion. Les gaz issus de la chambre cèdent une partie de leur énergie en se détendant, les turbines transformant cette énergie en couple mécanique qu'elles transmettent au compresseur par un arbre compresseur-turbine. Les gaz continuent à se détendre dans une tuyère ou leur vitesse augmente fortement. Devant le compresseur est installée une entrée d'air dont le rôle est d'alimenter correctement le compresseur. De l'amont vers l'aval, pour tout turboréacteur, nous trouverons :

- Entrée d'air ;
- Compresseur ;
- Chambre de combustion ;
- Turbine ;
- Tuyère.

1- Turboréacteur simple flux mono corps sec ; FIG (IV-1).

- **Simple flux** : un seul débit d'air traverse le moteur ;
- **Mono corps** : un seul ensemble compresseur-turbine ;
- **Sec** : non équipé de la post combustion.



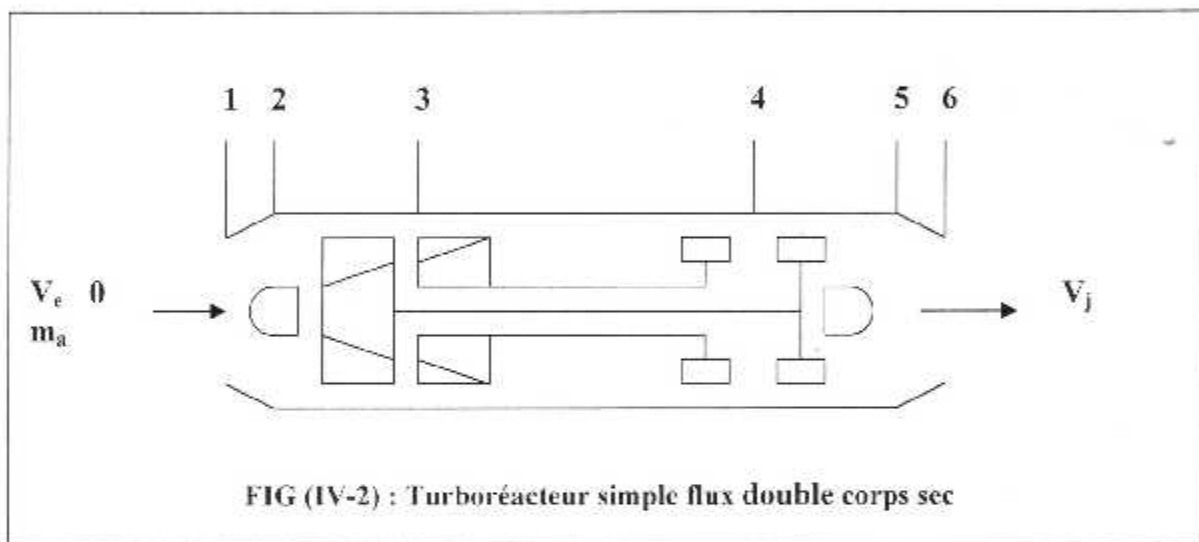
$$F = m_a(V_j - V_e) + m_c v_j$$

- F** : la poussée totale $F = F_a - F_c$;
V_j : la vitesse des filets d'air à la sortie tuyère ;
V_e : la vitesse des filets d'air à l'entrée ;
m_a : le débit masse air ;
m_c : le débit masse carburant.

2- Turboréacteur simple flux double corps sec ; FIG (IV-2).

Afin de réduire l'inertie des masses tournantes et d'améliorer la caractéristique compresseurs, les motoristes ont réalisé des compresseurs double corps ; chaque corps étant entraîné par sa ou ses turbines ce qui nécessite deux arbres concentriques.

Le premier compresseur est appelé compresseur Basse Pression, il est entraîné par la turbine basse pression ; ce mobile tourne au régime N_1 . Le mobile entourant la chambre de combustion est constitué du compresseur haute pression ; entraîné par la turbine haute pression ; son régime de rotation est N_2 . Lors du démarrage, seul le mobile HP est entraîné en rotation la puissance nécessaire au démarrage est donc plus faible.

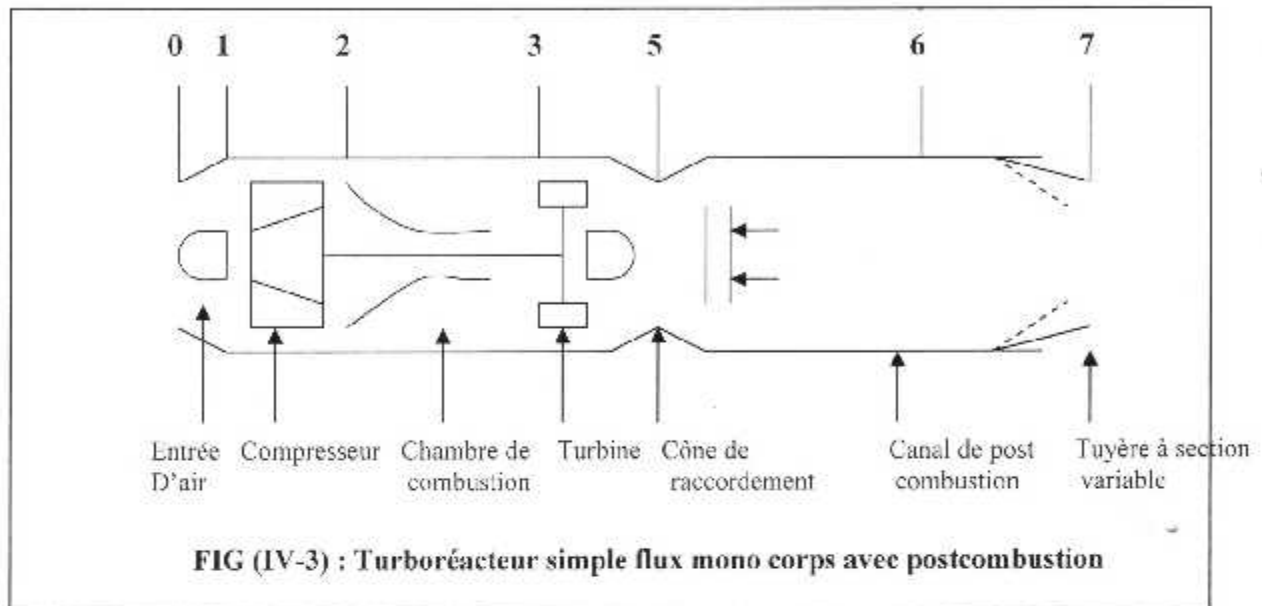


3- Turboréacteur simple flux mono corps avec postcombustion; FIG (IV-3)

Sur les moteurs précédents, il faut savoir que seulement environ 1/5 de l'air sortant du compresseur alimente la combustion en oxygène, l'autre partie restante est utilisée pour le refroidissement. Après avoir traversé les turbines, les gaz possèdent une énergie de pression, qui sur un turboréacteur sec, est transformée en énergie cinétique dans la tuyère.

Avec la relation de la poussée, nous voyons que si l'on accroît la vitesse d'éjection, pour un même débit masse d'air, la poussée augmente. C'est ce que réalisent les motoristes en ajoutant derrière la structure d'un turboréacteur sec un canal de post combustion, composé d'une chambre de combustion et de deux tuyères à section variable, dans lequel, par apport supplémentaire de carburant, une forte proportion des gaz de refroidissement est enflammée. N'ayant aucune partie mobile, l'apport thermique peut être très élevé ; les gaz acquièrent alors une très forte énergie qui est transformée en énergie cinétique par les tuyères. La vitesse d'éjection et la température des gaz en fonctionnement PC sont très

élevées. Ce type de moteur peut fonctionner PC allumée ou éteinte. Pour ne pas perturber le fonctionnement du moteur sec, il est équipé obligatoirement de tuyères à sections variables.



$$F_{pc} = m_a (V_{jpc} - V_e) + (m_c + m_{cpc}) V_{jpc}$$

$$F = m_a (V_j - V_e) + m_c V_j$$

F_{pc} : la poussée totale ;

V_{jpc} : la vitesse des filets d'air à la sortie de la tuyère ;

V_e : la vitesse des filets d'air à l'entrée ;

m_a : le débit masse air ;

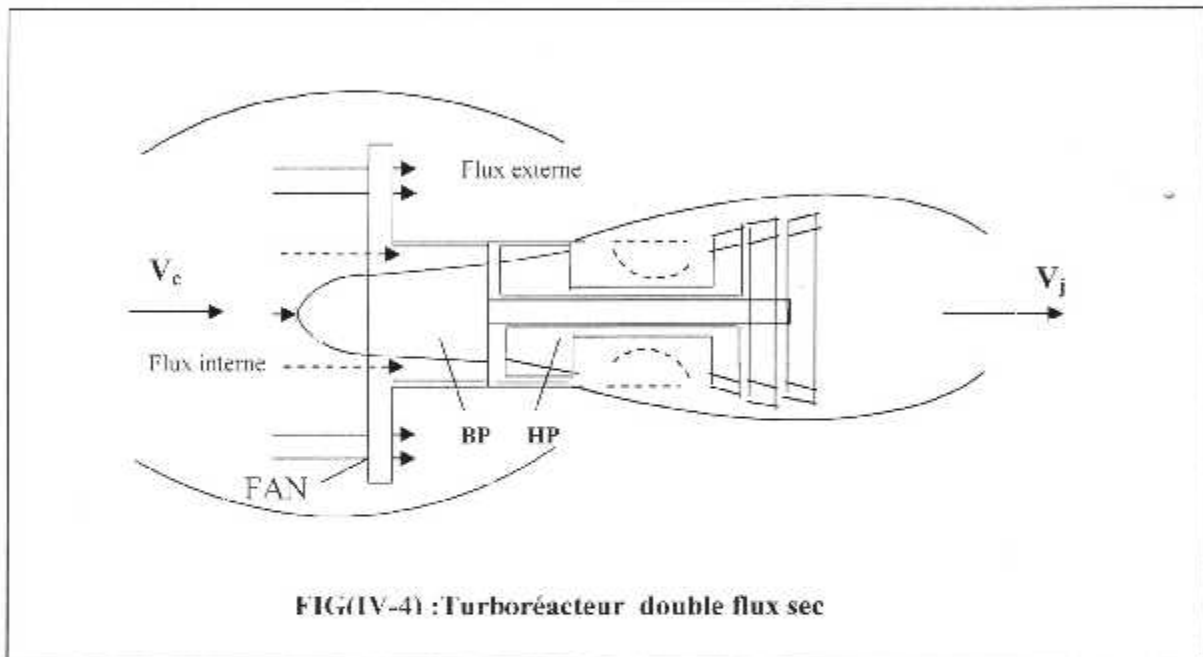
m_c : le débit masse carburant ;

m_{cpc} : le débit masse carburant du canal post combustion.

4- Turboréacteur double flux sec ; FIG (IV-4)

La poussée est proportionnelle au débit masse d'air. Si on augmente le débit masse d'air à un turboréacteur simple flux, sec et double corps, la poussée augmente, c'est ce que réalise le turboréacteur double flux.

Sur ces moteurs entraînés par les turbines basse pression, le compresseur basse pression reçoit un étage supplémentaire appelée FAN pour établir deux débits d'air.



$$F_i = m_i (V_{ji} - V_c) + m_c V_{ji}$$

$$F_c = m_c (V_{je} - V_c)$$

$$F_{df} = m_e (V_{je} - V_c) + m (V_{ji} - V_c) + m_c V_{ji}$$

m_i : débit masse interne (partie chaude) ;

m_j : débit masse externe (traverse le FAN et ces stators) ;

V_{je} : la vitesse d'éjection du flux externe ;

V_{ji} : la vitesse d'éjection du flux interne.

IV-1-4 DIFFERENTS TYPES DE TURBOPROPULSEURS

L'ensemble compresseur, chambre de combustion et turbine entraînant le compresseur est souvent appelé générateur de gaz. Les gaz, en sortie générateur possèdent une énergie de pression qui est convertie en puissance sur arbre par d'autres étages de turbine communément appelée turbine de travail.

Ces turbines tournent à des vitesses trop élevées pour être supporté par une hélice ; les motoristes installent donc un réducteur dont le rôle est de transmettre la puissance des turbines de travail à l'hélice, tout en diminuant leur vitesses de rotation, ce qui permet d'accroître le couple sur l'arbre porte hélice.

Un turbopropulseur sera donc composé de :

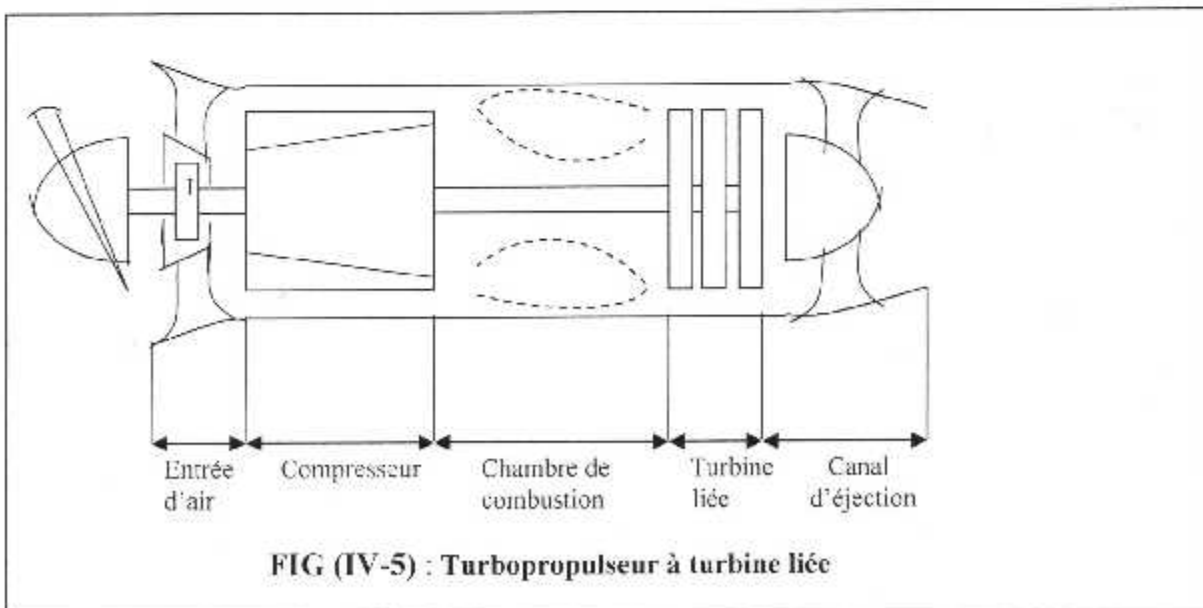
- Générateur de gaz ;
- Turbines de travail ;
- Réducteur ;
- Tuyère faiblement convergente.

Suivant la liaison entre la turbine génératrice et les turbines de travail on distingue plusieurs types de turbopropulseurs.



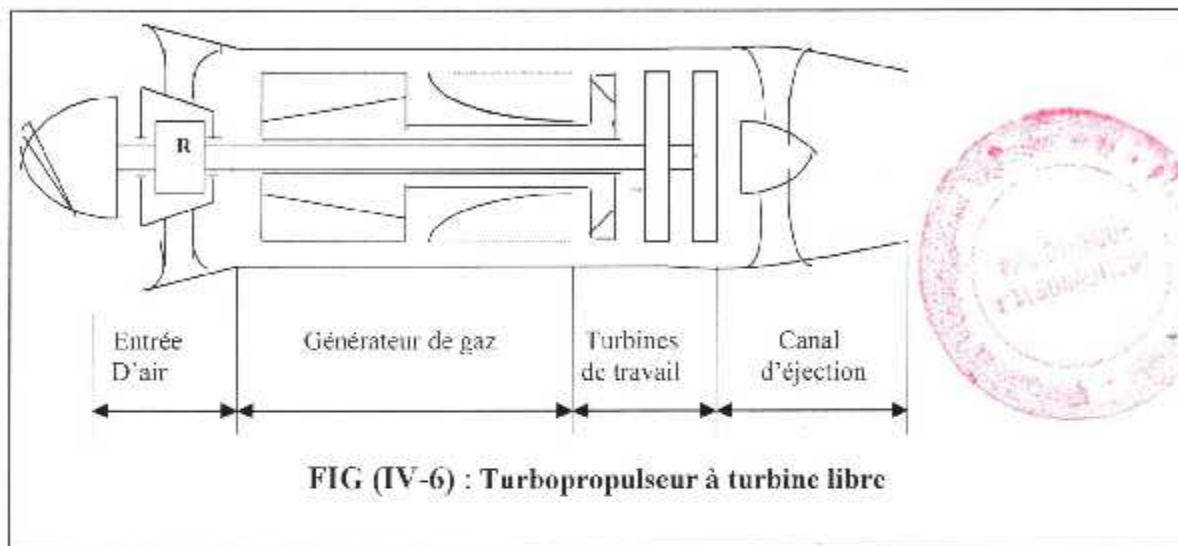
1- Turbopropulseur à turbine liée ; FIG (IV-5)

Dans ce type de machines on voit que les turbines, les compresseurs et l'hélice sont solidaires d'un même arbre. La vitesse de rotation de l'hélice est liée directement à celle du générateur par un rapport constant.



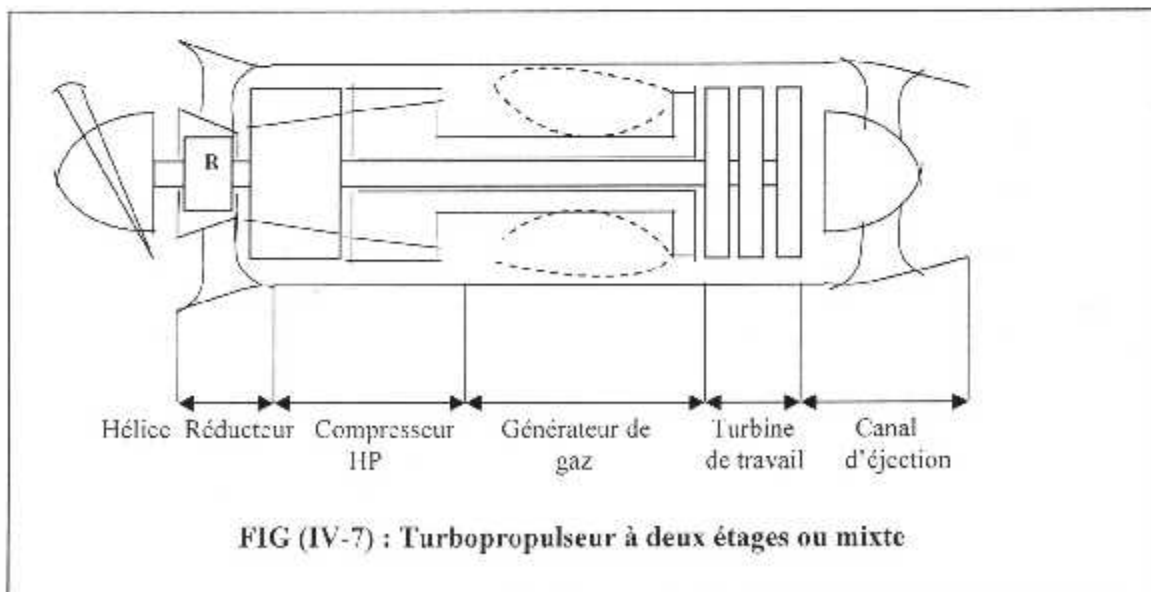
2- Turbopropulseur à turbine libre ; FIG (IV-6)

Dans ce cas les turbines fournissant l'énergie mécanique à l'hélice sont indépendantes de la rotation du générateur. Le générateur fonctionne donc comme un réacteur et après avoir traversé la turbine entraînant le compresseur, les gaz continuent leur détente en grande partie dans la turbine libre pour actionner l'hélice.



3- Turbopropulseur à deux étages ou mixte ; FIG (IV-7)

Ce type de turbopropulseur se différencie des précédents par le fait que son compresseur est double corps. Sur l'arbre hélice, un premier compresseur est utilisé pour alimenter le compresseur du générateur de gaz.



IV-1-5 LES SYSTEMES MOTEURS

1- SYSTEME DE DEMARRAGE

La mise en route d'un moteur au sol est obtenue à l'aide d'un démarreur qui a pour rôle d'entraîner l'attelage compresseur/turbine à une vitesse permettant d'obtenir un taux de compression suffisant pour amorcer l'inflammation du mélange et la combustion. ;

Les démarreurs appartiennent généralement à l'une des trois catégories suivantes :

- Démarreurs électriques ;
- Démarreurs pneumatiques ;
- Turbo démarreurs.

2- SYSTEME DE REGULATION

Le régulateur est un système qui maintient un fonctionnement correct du réacteur en tenant compte de l'ordre pilote et de toutes les conditions, influences et limitations décrites précédemment

Il comprend donc :

- Une limitation d'accélération : pour éviter les pompages sur reprises et l'extinction pauvre en décélération brutale ;
- Une commande des aubages de pré rotation, des aubes stators orientables et des vannes de décharge ;
- une commande de la section de sortie tuyère : elle se fait par l'intermédiaire d'un vérin ;
- Un limiteur de T4 : veille à ne pas dépasser la température admissible par la turbine à cause du fluage ;
- Un régulateur tachymétrique : maintient le nombre de tours constant en régime stabilisé et empêche tout dépassement du Nmax, qui est une limitation compresseur turbine;
- Une correction barométrique : permet à partir de la mesure de pression avant le compresseur, d'agir sur le débit carburant pour maintenir la richesse constante quelles que soient les conditions extérieures ;
- Une distribution de carburant aux chambres de combustion : pour cela nous disposons d'injecteurs ;
- Un canal de débit de base : assure toute l'injection avec une bonne pulvérisation aux bas régimes de fonctionnement. Son débit serait insuffisant aux régimes élevés, c'est

alors qu'intervient, en parallèle, le canal de débit principal. L'alimentation du canal principal est commandée par une valve de distribution qui est un clapet taré, actionné par la pression carburant.

Aux régimes élevés, le débit de base étant insuffisant, la pression du carburant augmente et écasse le ressort libérant ainsi le passage du circuit principal. Lorsque la pression devient trop faible (au régime ralenti) la valve de distribution referme le circuit principal.

3- SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

Le turbo réacteur doit en toutes conditions de fonctionnement atteindre un équilibre thermique qui est un facteur de sécurité.

Les organes du réacteur qui doivent être refroidis sont :

- Les turbines ;
- Les roulements.

Les chambres de combustion étant maintenues à une température correcte de fonctionnement par l'air de dilution, il n'est pas nécessaire de prévoir un circuit externe de refroidissement pour le turbo réacteur. Une circulation d'air peut être cependant maintenue entre les carters du réacteur et les capotages de façon à éviter l'accumulation de vapeurs inflammables.

Les turbines hautes pression, sont refroidies par un circuit d'air haute pression. Prélevé au niveau des derniers étages du compresseur, de façon à permettre l'évacuation de l'air de refroidissement dans les gaz de propulsion (pression de l'air de refroidissement à la pression des gaz brûlés).

Pour une turbine multi étages, l'air de refroidissement est prélevé à des niveaux moyenne ou basse pression au fur et à mesure que la pression et la température des gaz de détente diminuent.

Les disques de turbines sont toujours refroidis, les aubages fixes le sont souvent et les aubes mobiles le sont quelquefois. Les roulements principaux soutenant l'attelage turbine – compresseur sont refroidis par un circuit d'air basse pression prélevé à un niveau moyen du compresseur.

Le refroidissement interne du turbo réacteur sera donc assuré par des circuits d'air sous pression différentes (et à des températures différentes) suivant l'élément à refroidir.

4- SYSTEME DE GRAISSAGE

Le circuit d'huile du turbo réacteurs assure également une protection contre la corrosion interne et principe à l'évacuation des calorifuges des parties moteur à refroidir.

Le circuit de graissage se représente pour les réacteurs de manière différente, en raison :

- De leurs conditions d'utilisation ;
- Du petit nombre d'éléments mobiles qu'ils comportent ;
- De la présence de roulements à billes ou à rouleaux qui sont, avec les engrenages d'entraînement des accessoires, les seules parties délicates à lubrifier ;
- De la complément absence de mouvements alternatifs.

Le circuit de graissage est composé de :

- Un réservoir, en générale de forme annulaire qui épouse l'entrée d'air ; de contenance variable (15 à 20 L) qui comporte : un orifice de remplissage équipé d'un filtre, une jauge à main (contrôle niveau aux étapes), un transmetteur de capacité relié à un indicateur au poste de pilotage, un circuit de dégazage ;

- Une sonde de température reliée à un indicateur (poste de pilotage) ;
- Une pompe de pression à engrenages et son clapet de surpression ;
- Un transmetteur de pression d'huile et une alarme basse pression d'huile ;
- Des tuyauteries d'alimentation acheminant l'huile sous pression à toutes les parties à lubrifier, (roulement de l'attelage, réducteur, chaîne d'accessoires, régulation hélice) ;
- Un groupe de pompe de récupération ;
- Echangeur de température (huile carburant) ;
- Un radiateur huile air (qui peut être thermo staté) ;
- Une tuyauterie de retour réservoir avec un dégazeur.

5- SYSTEME DE CARBURANT

Le circuit carburant doit permettre une alimentation moteur correcte dans toutes les phases sol et vol (démarrage, ralenti, mise en puissance).

Le circuit carburant se compose de :

- Un échangeur thermique, qui permet d'éviter le givrage du filtre basse pression et qui, en réchauffant le carburant, lui permet de conserver ses caractéristiques (viscosité) ;
- Un filtre BP et son « mano » de colmatage (ΔP) actionnant un voyant d'alarme ;

- Un débit –mètre (fuel – flow) ;
- Le bloc régulateur carburant permettant au générateur de rester dans sa zone de fonctionnement normal ;
- Un robinet coupe – feu électrique ;
- Un clapet de sécurité, actionné par le l'huile lors de la mise en drapeau de l'hélice ;
- Des injecteurs.

IV-2 DOCUMENTS DE LA MAINTENANCE AERONAUTIQUE

IV-2-1 BUT DE LA DOCUMENTATION DE CONTROLE :

La documentation de contrôle a pour but :

- De connaître à tout moment l'état présent et la vie passé du matériel aérien, ceci est obtenu par un enregistrement systématique, au fur et à mesure de leur exécution, de toutes les opérations effectuées sur le matériel : utilisation, mise en œuvre, entretien, remise en état ;
- De permettre aux divers échelons intéressés de vérifier que les opérations prévues ont été exécutées ;
- De déterminer d'une façon précise l'individu ayant effectué une opération donnée ;
- De noter les difficultés rencontrées au cours de l'utilisation du matériel ;
- De permettre l'enregistrement de certains renseignements nécessaires pour le contrôle quantitatif des activités de maintenance.

IV-2-2 COMPOSITION DE LA DOCUMENTATION DE CONTROLE

Elle est constituée par :

- **Les documents semi permanents de contrôle** : qui ont été conçus de telle manière que ces documents, remplis par le personnel responsable, puissent être exploités directement sans répétition, ceci dans le but d'éliminer toutes causes d'erreurs qui pourraient être introduites au cours de la reproduction dans le cas d'une demande de renseignements. On a les documents de contrôle :

- de l'exécution des services aériens ;
- des opérations de service courant ;
- des opérations d'entretien mineur et de remise en état ;
- les fiches suiveuses pour les équipements et organes.

- **Les documents permanents de contrôle** : qui suivent le matériel (aéronef complet, moteur, éventuellement équipements) depuis sa conception jusqu'à sa disparition et permettent de connaître à tout moment : ses caractéristiques générales, sa qualité, son

degré de vétusté, les travaux essentiels de maintenance dont il a été l'objet et tous faits marquants survenus au cours de son exploitation

Il s'agit :

- un livret par moteur et son livret équipements ;
- les fiches suiveuses et les fiches matricules pour les équipements et organes importants.

A) DOCUMENT DE CONTROLE DES OPERATIONS DE VOL

C'est un compte rendu technique de la préparation d'un aéronef en vue du vol et une mise à jour à l'issue de l'exécution de chaque opération élémentaire par l'ensemble du personnel responsable (pilote, chef du 1er échelon, mécaniciens toutes spécialités), il a pour but essentiel :

- D'indiquer à chaque instant l'état de l'aéronef et du moteur ;
- De suivre avec une continuité rigoureuse le vieillissement du matériel ;
- De signaler par le personnel navigant tout incident ou avarie survenus au cours ou à l'occasion d'un vol et de faire toute remarque qu'il juge nécessaire ;
- De rendre compte par personnel mécanicien de toutes opérations systématiques ou non effectuées ou en cours d'exécution sur le matériel au 1er échelon ;
- La mise à jour de la documentation permanente en ce qui concerne les opérations effectuées au 1^{er} échelon ;
- L'établissement des compte rendus et statistiques diverses.

Ce document comporte les enseignements suivants :

Tableau I: renseignements généraux

Où sont inscrits les renseignements généraux caractérisant l'aéronef et son rattachement aussi que la date correspondant à une journée de vol ou à des travaux exécutés au 1^{er} échelon sur ledit aéronef ;

Tableau II: remarque des pilotes ou du chef de piste

Où sont inscrites les remarques faites par le pilote à l'issue d'un vol, aussi que les directives particulières et remarques ;

Tableau III: contrôle de l'activité aérienne

C'est le relevé vol par vol des renseignements. Une totalisation journalière permet de suivre le vieillissement de l'aéronef, de son moteur et éventuellement d'autres paramètres afférents au matériel utilisé ;

Tableau IV: contrôle des pleins

Permet le contrôle des quantités livrées pour recompter les pleins de l'aéronef en carburants, comburants et ingrédients, le pilote connaît aussi ce dont il dispose au départ du vol ;

Tableau V : contrôle des opérations d'entretien et de remise en état

Permet de connaître :

- les points fixes effectués au titre d'opérations de maintenance ;
- les pièces changées ;
- les responsables de l'exécution des travaux et échanges de pièces.

B) DOCUMENT DE DEMANDE D'EXECUTION DES OPERATIONS D'ENTRETIEN MINEUR ET DE REMISE EN ETAT

Ce document permet au 1^{er} échelon d'éclairer le 2^{ème} échelon sur les travaux à exécuter sur un aéronef donné (opérations d'entretien systématiques, modifications, travaux de retouche, équipements à changer), de faciliter la préparation et l'exécution des travaux et d'enregistrer les échanges des équipements.

Ce document comporte les enseignements suivants :

Tableau I : renseignements généraux

où sont inscrits les renseignements généraux caractérisant l'aéronef, le type de travail demandé, l'organisme chargé de l'exécution de ces opérations et la date de la demande ;

Tableau II : échanges équipements

Sur ce tableau le 1^{er} échelon inscrit les équipements à changer :

- Ceux ayant atteint leur limite de fonctionnement (relevé à faire par consultation du tableau de contrôle équipement) ;
- Ceux ayant subi une avarie.

Le 2ème échelon mentionne l'exécution ou le motif de la non exécution des échanges demandés ;

Tableau III : travaux de remise en état

Ce tableau permet au 1^{er} échelon :

- De signaler toutes les anomalies relevées au cours de l'utilisation et aux quelles il n'a pas été porté remède : petites criques, rivets remplacer, points particuliers à voir, etc... ;
- De demander éventuellement l'exécution de modification ;
- De donner tous les renseignements nécessaires lorsque le type de travail demander est une remise en état.

Tableau IV : autres équipements changés ou remise en état

Sur ce tableau le 2^e échelon inscrit les équipements changés ou remis en état et qui n'ont pas été prévus au tableau I ;

Tableau V : observations à l'issue des travaux

Sont mentionnées dans ce tableau toutes remarques faites à l'issue des travaux et dont la connaissance est nécessaire au 1^{er} échelon pour l'exécution correcte du service courant.

C) DOCUMENT DE CONTROLE DES OPERATIONS D'ENTRETIEN MINEUR ET DE REMISE EN ETAT EXECUTEES

Ce document permet le contrôle de tous les travaux exécutés sur un aéronef par une section d'atelier : travaux systématiques, modification, retouche, pièces changées, temps passés. Et d'assurer la continuité dans l'exécution des travaux en cas d'indisponibilité de personnel (maladie, service, etc...).

Ce document comporte les enseignements suivants.

Tableau I :

Où sont inscrits : le type de travail à exécuter, l'organisme et la section d'atelier responsables des travaux, les dates de début et de fin de ces derniers, les temps passés à l'exécution et le numéro de la formule ;

Tableau II : directives de l'autorité responsable

L'autorité responsable mentionne dans ce tableau toutes directives concernant les travaux à exécuter par la section d'atelier : opération systématique, modifications, retouches... ;

Tableau III : équipements changés ou remis en état

Ce tableau permet d'insérer la pose, la dépose ou la remise en état des équipements et de connaître le spécialiste responsable ayant effectué le travail ainsi que la date et le temps passé.

La totalisation des temps est prévue au bas du tableau ;

Tableau IV : travaux effectués

Ce tableau permet de connaître en détail tous les travaux exécutés sur aéronef, les matières employées et les spécialistes responsables de l'exécution et les temps passés pour l'exécution de ces travaux.

D) DOCUMENT DE SUIVI DES FAITS TECHNIQUES

Ce document est un rapport technique des faits et des événements qui surviennent au matériel et qui ont une relation avec :

- La sécurité d'emploi ;
- L'aptitude opérationnelle et technique ;
- La maintenance ;
- Le fonctionnement et l'endurance de ces matériels.

Il a pour objectifs :

- L'amélioration de la sécurité d'emploi du matériel ;
- La définition des règles optimales de maintenance ;
- La fourniture de renseignements sur la consommation en pièces de rechanges et de susciter les dispositions à prendre sur le plan logistique ;
- L'élévation de la qualité des exécutions de toutes les opérations techniques.

Selon la **nature** des faits techniques ont les **avaries** et les **anomalies**. Les avaries sont les détériorations d'un matériel technique provoquant une modification notable de ces caractéristiques initiales par altération des constituants (cassures, usures anormales, corrosion, détérioration des ensembles et équipement majeur.). Les anomalies sont les modifications notables des caractéristiques d'un matériel technique sans altération des constituants (dérèglement, présence d'humidité, défaut d'usinage, non conformité aux normes).

Selon la gravité des conséquences que peuvent provoquer les faits techniques, ces derniers sont classés en deux **catégories** sont les faits techniques **graves** et les faits techniques **secondaires**. Les faits techniques graves sont ceux qui mettent directement en cause la sécurité d'emploi des matériels. Ils sont de nature à imposer un contrôle systématique et immédiat de tous les matériels identiques en service et à provoquer d'importantes restrictions ou même d'interdiction d'emploi temporaire ou définitif de ce matériel. Les faits techniques secondaires sont tous les faits techniques qui ne peuvent pas être d'une gravité à préoccuper l'emploi. L'importance des faits techniques et l'urgence qu'il a à leur apporter une solution sont fonction du type d'incident que l'on a :

- Les incidents connus ;
- Les incidents nouveaux.

IV-3 PROGRAMME DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE OPTIMISE

Comme le projet « Optimisation d'un programme de maintenance d'une turbomachine aéronautique par les techniques de détection et diagnostique des défaillances » se veut une contribution pour une meilleure prise en charge de la fonction maintenance. Une étude pour l'élaboration d'un programme de maintenance optimisé s'avère indispensable pour améliorer le programme de maintenance reposant uniquement sur le concept de la maintenance préventive systématique, qui a engendré de grandes pertes financières vu le taux très élevé d'indisponibilité des aéronefs.

La solution proposée pour l'amélioration de notre cas concerne l'élaboration d'un nouveau programme de maintenance, qui par l'apport de méthodes d'entretien modernes, permet de satisfaire les objectifs de sécurité, tout en réduisant les coûts d'exploitation. Ce dernier s'articulera sur les axes suivants :

- **L'adoption du concept de la maintenance prédictive comme nouvelle stratégie ;**

Dans le but d'atteindre les objectifs suivants :

- Diminution de la consommation de la pièce de rechange ;
- Réduction des opérations de dépose et réduction des attentes de pièces ;
- Optimisation et dimensionnement des stocks de rechanges en fonction de la fiabilité et de l'utilisation prévue ;
- Augmentation de la fiabilité et allègement de la maintenance par remplacement et modification des pièces.

- **L'introduction des techniques de maintenance prédictive en exploitation ;**

Il est question d'introduire les techniques suivantes :

- Analyse spectrométrique des huiles ;
- Analyse vibratoire ;
- Surveillance des tendances ;
- Contrôle non destructif (endoscopie, thermographie infrarouge et autres méthodes).

- **La mise à jour des documents et procédures de la maintenance aéronautique ;**

Un complément aux documents existant est nécessaire, il s'agit des documents suivants :

- Procédures de collecte de données pour chaque document ;
- Procédures d'échantillonnage ou de prélèvement pour chaque document ;
- Procédures d'interprétation des résultats d'analyse liées aux techniques de la maintenance prédictive.

- **L'informatisation de la fonction maintenance par l'élaboration d'un système de gestion et de suivi des opérations de maintenance des turbomachines en exploitation.**

Il s'agit d'élaborer des bases de données :

- Elaborer le SGS-OM (système de gestion et de suivi des opérations de maintenance prédictive) ;
- Constituer des techniques de données sur le matériel en exploitation ;
- Informatiser la fonction maintenance ainsi que les autres fonctions, telles que production, approvisionnement, stock, ressource humaine, formation et autres fonctions.

Le passage entre l'ancien et le nouveau concept de maintenance peut être assuré par :

- **L'introduction progressive des techniques de surveillance de l'état et du comportement ;**

- **La mise en place d'une nouvelle organisation doit assurer les fonctions suivantes :**
 - - La coordination entre les différentes équipes de travail, la mise à disposition des informations et des moyens et la prise de décision concernant les actions de maintenance à entreprendre ;

 - - La mise en œuvre d'un réseau informatique doté d'un matériel puissant avec des logiciels adéquats pour optimiser le stockage, le traitement et l'analyse des données ;

 - - L'édition de la documentation technique (fiches de suivi, documents concernant les nouvelles techniques et les rapports de tendances) ;

 - - La constitution des bases de données sur tout le parc des turbomachines.

- **Démarche de passage vers la maintenance prédictive :**
 - Exécution de l'étude de l'existant ;

 - Choix du matériel candidats à la maintenance prédictive ;

 - Mise en place de l'organisation et constitution des groupes de travail ;

 - Recensement du matériel ;

 - Recueil des faits techniques ;

 - Etudes de fiabilité ;

 - Désignation des paramètres à suivre ;

- Collecte des données ;
- Lancement du programme de formation ;
- Prospections pour l'acquisition du matériel ;
- Partenariat pour compléter le manque en informations et en maîtrise de la technologie et de l'expertise ;
- Elaboration des cahiers des charges et choix des matériels à acquérir.

On procédera en **quatre étapes** :

1^{ère} étape : Appliquer les techniques de surveillance de l'état à toutes les pièces non critiques, en supprimant pour celles-ci les exigences de temps entre révisions.

2^{ème} étape : Pour les ensembles critiques, il sera procédé à un développement du temps entre révisions, afin, de le rendre égal à la durée de vie de l'ensemble telle qu'affichée par le constructeur.

3^{ème} étape : Pour les pièces présentant des marges de résistance importantes, une extension de leur durée de vie est envisageable par analyse (calculs, mesures d'efforts, et essais de fatigue).

4^{ème} étape : Pour les pièces pour lesquelles les étapes précédentes n'ont pas été praticables, une extension de la durée de vie par d'autres moyens. Tel que des essais sur les pièces, des modifications et des améliorations de performances.

V- MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE MAINTENANCE PREDICTIVE SUR LES TURBOMACHINES AERONAUTIQUES

V-1 REGLES DE MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE SURVEILLANCE

Les stratégies de surveillance, figure (V-1), ont pour rôle d'analyser et de réserver ces analyses aux machines pour lesquelles la panne est une réelle hantise sur le plan de la sécurité ou de la production. Ces stratégies doivent être menées en analysant le coût réel de chaque panne ou incident, c'est à dire en prenant en compte non seulement les coûts directs de la réparation, mais aussi les coûts indirects qui représentent, en général la partie la plus importante des pertes enregistrées. Sur le plan technique, il faut s'assurer que la surveillance s'applique bien aux machines sélectionnées et il faut satisfaire les conditions suivantes :

1- Connaissance des machines à surveiller

Pour chaque machine surveillée, il est impératif de connaître :

- Le contexte d'utilisation ;
- Les particularités ;
- La composition de chaque élément de la cinématique ;
- Les points faibles et les organes défailants ;
- L'historique détaillé des incidents ou pannes.

2- Initialisation de la stratégie de surveillance

La phase d'initialisation est une étape très importante dans un programme de maintenance, dont dépend la réussite ou l'échec de ce programme. Il est donc nécessaire de réaliser, dans les meilleures conditions, les points suivants :

- L'identification des paramètres caractéristiques de l'état mécanique et thermodynamique de l'équipement. Il est nécessaire de trouver une corrélation entre un paramètre mesurable et l'état du système. Les exemples de mesures sont :
 - Les divers paramètres physiques (pressions, débits, températures,...) ;

- Les niveaux de vibration et de bruit ;
 - La fréquence de vibration ;
 - La teneur en résidus d'usure (analyse de lubrifiant) ;
 - Les défauts internes par contrôles non destructifs.
- L'identification des points de mesure et de fixation (supports de capteurs) ;
 - La prise des mesures de référence (mesurer, si possible, la valeur initiale de ces paramètres lorsque la machine est neuve ou réputée en bon état) ;
 - La détermination des procédures de surveillance ;
 - Les préconisations des éventuelles d'interventions ;
 - La construction de bases de données pour la gestion et le traitement des données ;
 - La formalisation d'un plan de maintenance intégrant l'ensemble des turbomachines.

3- Respect de la procédure de prise de mesure

Pour une fidélité des mesures il faut élaborer des procédures claires et précises qui prennent en charge les points suivants :

- Accessibilité aux points de mesure ;
- Constance de la vitesse de la machine ;
- Prise de mesure d'une durée suffisante ;
- Utilisation d'une chaîne de mesure adaptée ;
- Reproductibilité des conditions de mesure ;
- Vérification de la rentabilité de la surveillance en tenant compte du coût de la stratégie adoptée et de la périodicité des visites à effectuer ;
- Limitation de l'utilisation de ces techniques aux machines pour les quelles la rentabilité est quasi assurée.

4- Surveillance et diagnostic

- Collecte périodique des données ;
- Analyse de l'évolution des paramètres de surveillance ;
- Diagnostic d'état de santé des turbomachines ;
- Planification des éventuelles actions correctives

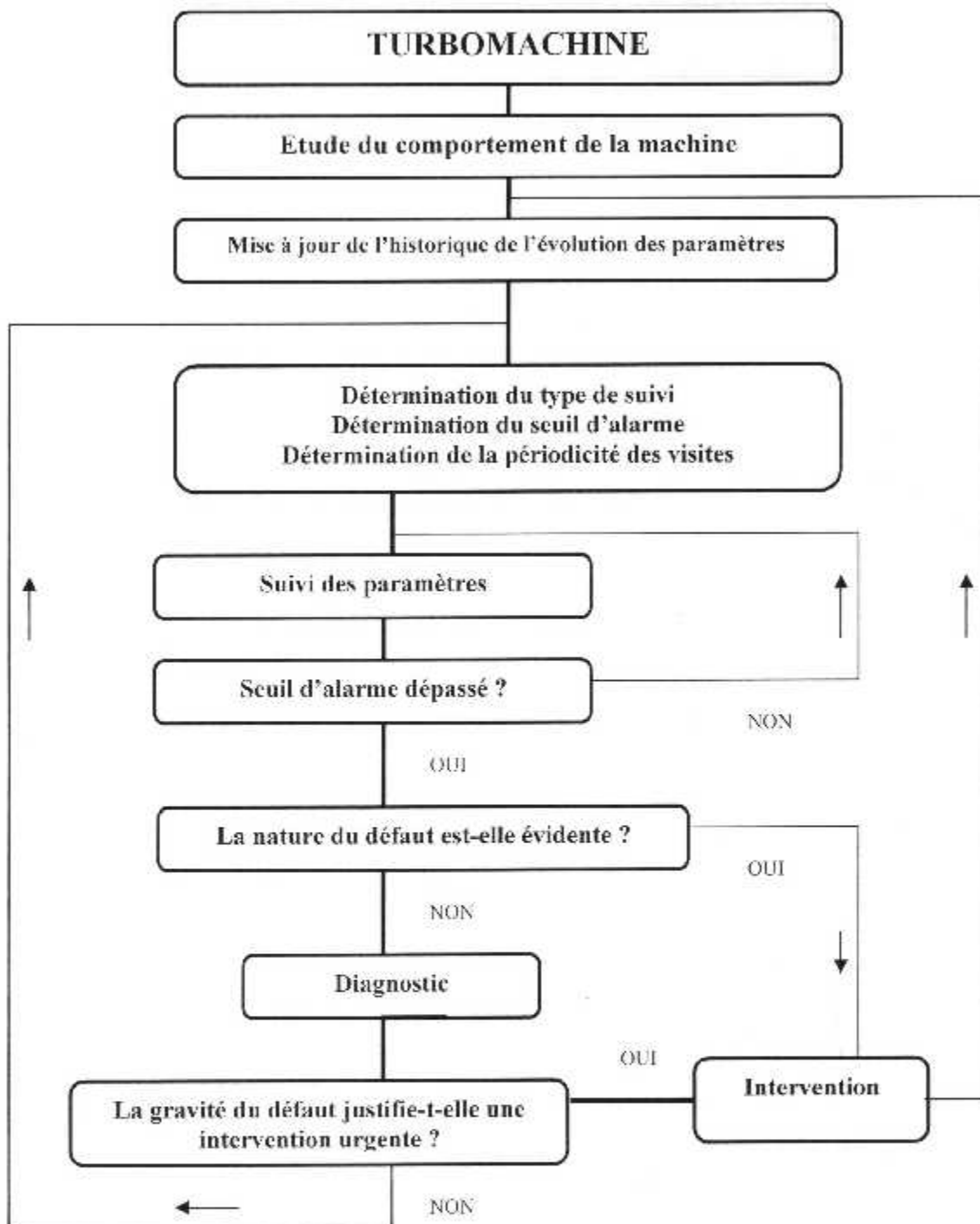


FIG (V-1): STRATEGIE DE SURVEILLANCE

V-2 MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE

V-2-1 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE DE L'ANALYSE DES HUILES

1- INTRODUCTION

L'ensemble des paliers, supportant les arbres et les éléments tournants, est lubrifié par un circuit d'huile à recirculation. Une détérioration de ces derniers (usure par frottement) a pour effet la libération des particules métalliques enlevées aux pièces en contact, qui passent en suspension dans l'huile. Le contrôle de l'état de cette huile de lubrification en cours de service permet :

- De déterminer le moment adéquat du renouvellement de l'huile en surveillant le degré de dégradation de cette huile (analyse physico-chimique) ;
- De détecter les premiers symptômes de l'usure anormale du moteur en étudiant les particules d'usure générées par le frottement des pièces en contact (analyse spectrométrique).

2- DEMACHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE

La démarche préconisée consiste à réaliser les points suivants :

1. Consignes de prélèvement des échantillons d'huile

Pour que les résultats d'analyses soient représentatifs des phénomènes d'usures d'un moteur, boîte de transmission ou d'un accessoire surveillé, il est indispensable que les échantillons soient prélevés avec le plus grand soin tout en respectant quelques règles élémentaires, à savoir :

- L'utilisation d'un flacon (récipient) d'échantillonnage sec et exempt de contaminants ;
- La prise de l'échantillon juste après l'arrêt de l'appareil (dans les 15 minutes suivantes) ;
- L'étiquetage du flacon prélevé et renseignement des indications nécessaires à l'analyse (référence, durée de service, date du prélèvement, appoints, etc.) ;
- Le nettoyage accru des points de prélèvements sur les parties concernées de l'aéronef.
- Effectuer un complément de plein après chaque prélèvement afin de permettre le calcul des vitesses de pollution.

2. Liste des analyses à effectuées

2-1 analyses Physico-chimique

La dégradation d'une huile de graissage se produit généralement par oxydation sous l'action combinée de la température et de l'oxygène de l'air. Alors les paramètres qu'il faut les contrôler dans l'huile de graissage sont :

- **Viscosité**

La viscosité représente la résistance qu'oppose le lubrifiant au déplacement de ces molécules les unes par rapport aux autres. Cette mesure est déterminée dans le but de suivre la dégradation d'une huile et ceci par mesure du temps d'écoulement d'un volume donné d'huile à travers un capillaire et à plusieurs températures, (Norme AFNOR T60-100, Norme A.S.T.M D445-61) ;

- **Présence d'eau**

Dans une huile moteurs, l'eau peut être due à une condensation des produits de combustion ou à une fuite de circuit de refroidissement. Parmi les méthodes utilisées pour déterminer la teneur en eau par titration avec le réactif de Karl Fischer (Norme A.S.T.M D17446601) ;

- **Point d'éclair**

Le point éclair est la température à laquelle un produit doit être chauffé pour donner une quantité de vapeurs formant avec l'air un mélange explosif en présence d'une flamme dans les conditions expérimentales données. La mesure du point d'éclair renseigne sur:

- Une pollution par un produit plus léger ;
- Une modification importante des caractéristiques.

- **Point d'éclair en vase ouvert:** Cet essai mesure (selon la norme AFNOR T 60-118), la température d'inflammation la plus basse des vapeurs dégagées par l'huile en présence d'une flamme ;

- **Point d'éclair en vase clos :** (selon la norme AFNOR T 60-103). L'huile contenue dans un creuset est chauffée progressivement et à une vitesse bien définie. Le creuset est équipé d'un couvercle muni d'une cheminée au dessus de laquelle est présentée la flamme d'une veilleuse. Le point d'éclair est la température de l'huile au moment où se produit un éclair par l'inflammation des vapeurs d'huile.

- **Teneur en matières carbonneuses**

Une teneur en carbone élevée est un signe de mauvaise carburation ou mauvaise injection, ou un défaut d'étanchéité de segmentation (en particulier pendant le rodage). C'est une caractéristique essentielle pour une huile moteur, car, outre qu'elle peut dénoter un mauvais

fonctionnement du moteur, elle donne également les limites d'utilisation de l'huile. Au dessus de 3% de carbone, l'huile ne peut plus remplir son rôle et doit être éliminée. Cet essai est déterminé par deux mesures selon les normes suivantes:

- 1- Conradson : Norme AFNOR T 60-116; Norme A.S.T.M D 189-61
- 2- Ramsbottom: Norme AFNOR T 60-117 Norme A.S.T.M D524-59.

2-2 Analyse spectrométrique des huiles (ASH)

Les particules libérées par frottement des organes en mouvement polluent l'huile de graissage. L'analyse spectrale de cette huile permet d'établir, par rapport à une huile étalon, la nature des particules et la concentration pour chaque élément. Un guide de signature de panne élaboré à partir de la carte métallurgique d'une turbomachine donnée, permet de déterminer l'urgence de l'intervention et de localiser l'origine de l'anomalie.

Les analyses sont effectuées par un spectromètre de masse dont le principe de fonctionnement est le suivant:

Un mélange de particules d'huile et d'argon est porté en phase plasma au travers d'une torche à plasma par excitation thermique, et émet un rayonnement. La lumière émise par les différents atomes est décomposée par l'intermédiaire d'un système optique appelé "réseau" en raies caractéristiques par leurs longueurs d'onde des éléments excités et représentatives par leurs intensités de la concentration des éléments. L'intensité lumineuse de chaque raie sélectionnée est transformée en signal électrique à l'aide de cellules photomultiplicatrices. Le courant produit, proportionnel à l'intensité lumineuse, est intégré et donne la concentration de ces éléments dans le mélange.

Le spectromètre est piloté par un microprocesseur qui permet de stocker les informations obtenues au cours des analyses.

3- LES REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES

L'exploitation et l'interprétation des résultats d'analyse d'huile moteur en cours de service obtenus comporte deux volets:

Le dépassement d'une ou plusieurs valeurs limites admissibles des caractéristiques physico-chimiques recommandées par les normes, entraînant dans la majorité des cas la vidange de l'huile.

La détection d'un phénomène d'usure de pièce lubrifiée se fait de la façon suivante le mode de développement des usures, FIG (V-2) :

- La fréquence de prélèvement étant constante, aucune mesure n'est à envisager avant d'atteindre le seuil de première alerte ;

- Ce seuil étant atteint voire dépassé, on est en présence d'un début d'usure et il convient de resserrer l'intervalle de prélèvement, et de surveiller la pente d'évolution de la concentration.

La carte métallurgique des pièces lubrifiées non exhaustive utilisée généralement dans la constitution des moteurs est présentée ci-dessous:

- **Fer**

Le fer se trouve dans toutes les pièces lubrifiées, toujours sous forme d'alliage au carbone et d'autres éléments ;

- **Fer seul** : l'apparition de fer seul est en général l'indice d'une usure des cannelures de l'arbre de boîte de prise de mouvement et d'une détérioration importante des joints d'air ;
- **Fer + Titane seul** : c'est l'indice d'une usure du joint rotatif air / huile de roulement due à une rotation de la piste interne du roulement sur l'arbre (desserrage de l'écrou de retenue). Cela peut être conforté par une augmentation des vibrations fan ;
- **Fer + Cuivre + Zinc** : Usure des roulements de boîte d'accessoires ;
- **Fer + Chrome** : Usure de pièces de boîtier d'engrenage.

- **Titane**

La présence d'aluminium seul signifie un revêtement de portée interne de roulement, joint rotatif air/huile ;

- **Traces de Titane et Nickel + Aluminium** : il s'agit d'une usure de l'enceinte avant de roulement (**vibrations fan éventuellement**) ;
- **Titane + Nickel + Fer + Tungstène** : la présence de Titane, de Nickel et / ou Tungstène, la plupart du temps accompagnée de fer; est l'indice d'une rotation de piste interne de roulement ;

Dès que les concentrations en Ti, Ni où Fe atteignent l'une ou l'autre le seuil d'alerte, l'intervalle de prélèvement doit être resserré. Le déclenchement de l'action corrective (dépose moteur) est alors lié aux concentrations relatives atteintes par ces éléments.

- **Aluminium**

La présence d'aluminium seul signifie une usure des encintes avant de roulements ou une détérioration du revêtement des cages ;

- **Argent**

La présence d'argent signifie une détérioration importante des entretoises et de la bague du palier ;

- **Chrome**

La présence de chrome signifie une détérioration importante de l'arbre d'entraînement, des éléments d'entraînement des accessoires des portées de roulement et des roulements ;

Cuivre

La présence de chrome signifie une détérioration importante de l'arbre d'entraînement et des éléments d'entraînement des accessoires :

- **Magnésium**

La présence de chrome signifie une détérioration des joints d'air et des paliers ;

- **Nickel**

La présence de chrome signifie une détérioration des portées de roulements.

- **Tungstène**

La présence de chrome signifie une détérioration importante dans les revêtements de portée ;

- **Silicium**

Le silicium est le dixième élément suivi en analyse spectrométrique. Il est représentatif d'une pollution de l'huile par du liquide hydraulique ou des particules étrangères (sable, poussières...).

Plus une usure devient grave, plus elle génère de grosses particules. La sévérité des types d'usure observés sont les suivants :

- **Usure normale** : les grosses particules n'ont pas une taille supérieure à 10µm. La répartition granulométrique est à peu près constante, entre 0.1 et 1µm ;
- **Usure sévère** : dans ce cas, dans la plage de dimension de 0.1 à 10µm, il y a une augmentation légère du nombre de particules générées. En suite, il y a une décroissance assez rapide vers zéro ;
- **Usure avancée** : l'usure avancée est l'aboutissement normal de l'usure sévère. A ce stade, les avaries de surface son bien visibles ;
- **Usure catastrophique** : c'est le stade ultime de l'usure avant grippage et on constate qu'on peut donc suivre la progression vers l'avarie redoutée en étudiant l'évolution de la concentration en grosses particules.

FORMES DES PARTICULES	TYPE D'USURE	IMPORTANCE DE L'USURE
Petites plaquettes 0.3µm-5µm	Usure adhésive	Usure normale
Grosses plaquettes 5µm-150µm	Grippage	Usure dangereuse
Ecailles 20µm-1mm	Ecaillage	Usure dangereuse
Copeaux enroulés bouclés	Abrasion	Grave (copeaux nombreux)
Sphères métalliques petites 1µm à 5µm; grosses > 10µm	Fatigue de roulements, Cavitation, Erosion	Incident grave
Sphères plastiques	Dépôts d'additifs	
Magas, agglomérations 2µm à 150µm	Corrosion- oxydation	Incident grave

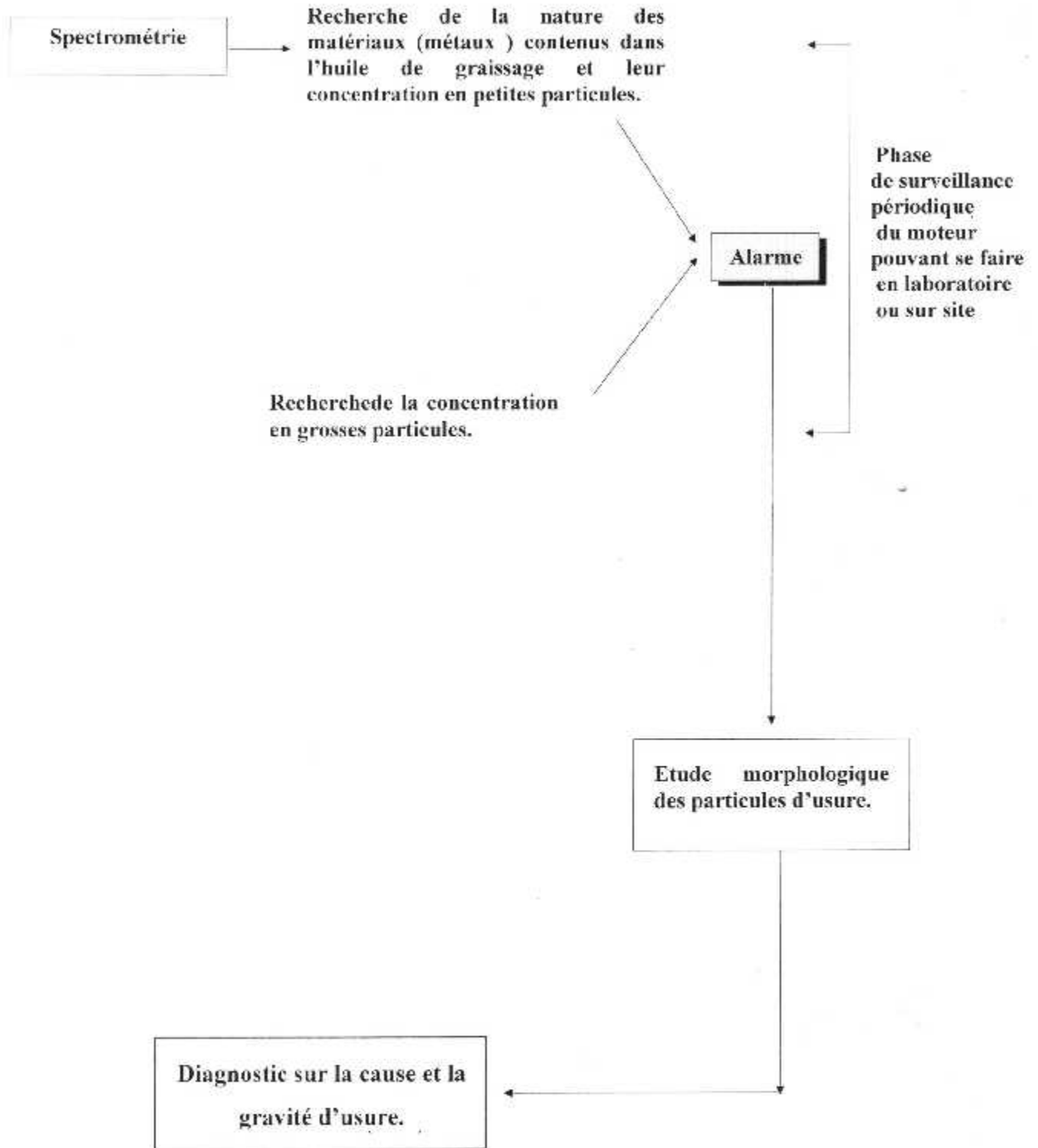


FIG (V-2) : PROGRESSION LOGIQUE DE RECHERCHE D'UNE CAUSE D'USURE

V-2-2 MISE EN ŒUVRE DES TECHNIQUES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF

V-2-2-1 TECHNIQUE DE CONTROLE ENDOSCOPIQUE

1- INTRODUCTION

L'endoscopie technique est un moyen moderne et à faible coût pour effectuer un contrôle non destructif à tous les stades de fabrication ou de maintenance. Elle permet l'inspection visuelle et non destructive des corps creux et des cavités non accessibles d'éléments de construction qui exigeraient pour être contrôlés, un démontage nécessitant beaucoup de perte de temps.

L'endoscopie assiste l'opérateur pour faire une distinction entre les conditions d'exploitation acceptables et non acceptables. Grâce à l'utilisation de la lumière froide on évite l'échauffement de la cavité à contrôler, ceci permet également l'inspection endoscopique dans des zones à risque d'explosion ou sensible à la chaleur. Aussi des visites endoscopiques peuvent être réalisées dans des milieux hostiles et dans des conditions difficiles comme par exemple à des températures ou des pressions très élevées.

Les domaines d'applications de l'endoscopie technique sont les suivants:

- Industrie aéronautique pour l'inspection des avions et des réacteurs ;
- Industrie automobile pour l'inspection des moteurs et des carrosseries ;
- Domaine militaire pour inspection des systèmes d'armement ;
- Industrie nucléaire pour l'inspection des réacteurs.

2- PRINCIPE

Le principe de l'endoscopie est très simple et consiste à exécuter une inspection visuelle de cavités ou endroits peu accessibles de machines ou d'ensembles à l'aide d'un endoscope. Si l'accès à la cavité à contrôler est droit on utilise un boroscope rigide. Par contre si les cavités et les éléments sont inaccessibles par les endoscopes rigides on utilise les fibroscopes, qui présentent une grande flexibilité.

L'équipement de base est constitué de :

- Un endoscope ;
- Un conducteur de lumière froide ;
- Un projecteur de lumière froide ;
- Accessoires vidéo et appareils photographiques.

La lumière servant à l'éclairage de la cavité à inspecter est emmenée du projecteur de lumière froide à la pointe de l'endoscope grâce à un conducteur de lumière à fibre optique. La

sortie lumière se trouve à proximité de l'objectif de l'endoscope et garantit de ce fait un excellent éclairage sans ombre de la zone à contrôler.

La transmission d'image est assurée par l'intermédiaire d'un objectif (FIG (V-5)) qui donne en B1 une image de l'objet inspecté. Cette image est reportée en B2 grâce à deux lentilles barreaux L1 et L2. Cette image B2 est de même grandeur et de sens inverse à B1 car le système de lentilles L1/L2 est inverseur. Un second système inverseur L3/L4 forme, à partir de B2, une image B3. Cette image peut être observée par l'oculaire OC. Les boroscopes de plus grande longueur comportent plusieurs de ces systèmes inverseurs.

L'équipement de base peut être complété par une vaste gamme d'accessoires et d'appareils pour la documentation et l'interprétation de résultats des contrôles endoscopiques, il s'agit de la photographie avec des boroscopes et des prises de vues vidéo.

Pour que l'inspection endoscopique soit fiable, les endoscopes utilisés doivent répondre à un certain nombre de critères obéissant aux normes et exigences de qualité. Les propriétés optiques et les propriétés mécaniques des endoscopes représentent le souci majeur des constructeurs de boroscopes

- **Propriétés optiques:**

- Brillance et pouvoir de résolution ;
- Luminosité de l'image ;
- Définition et rendu des couleurs ;
- Facteurs d'agrandissement ;
- Champ de vision ;
- Angle du champ de vision.

- **Propriétés mécaniques:**

- Tube extérieur en acier inoxydable ;
- Résistance à la pression ;
- Résistance à la température ;
- Étanche à l'eau et au gaz sur toute la longueur utile.

- **Propriétés d'adaptabilité**

- Adaptable à un appareil photographique ;
- Adaptable à une vidéo.

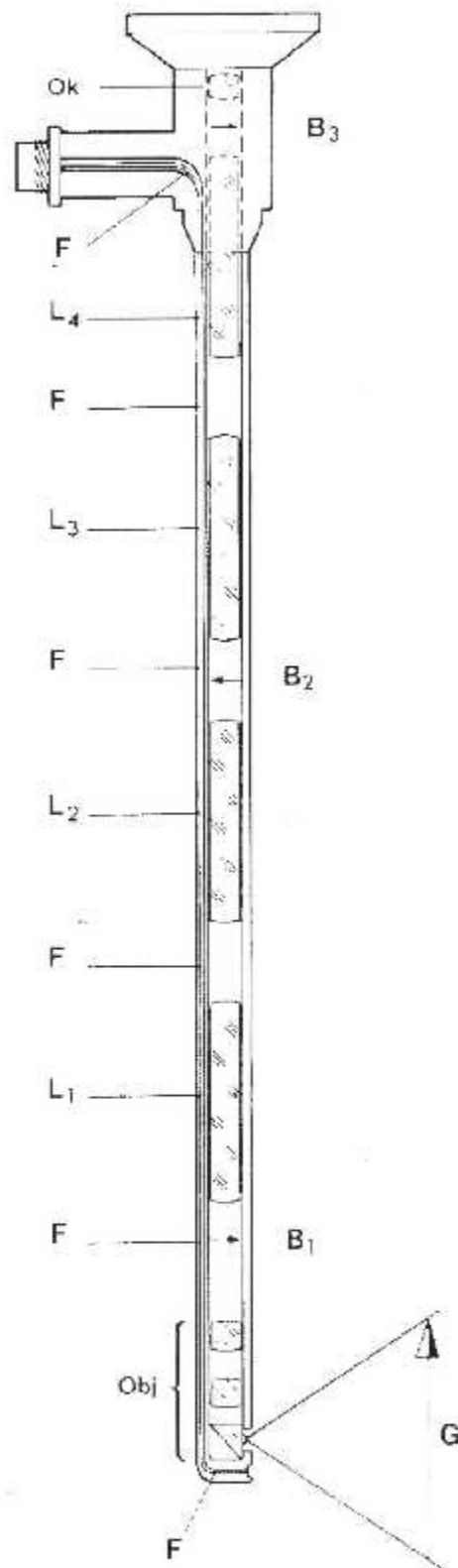


FIG (V-3) : Conception d'un endoscope

3- ELEMENTS DE TURBOMACHINES A CONTROLER

Le contrôle des matériels aéronautiques, cellule, moteur et systèmes est une opération indispensable avant et après le vol. Des inspections visuelles, sans endoscopes, sont faites sur les modules et accessoires visibles à l'œil nu, mais pour le cas des cavités non accessibles on utilise des fibroscopes, surtout au niveau de la chambre de combustion et de la turbine.

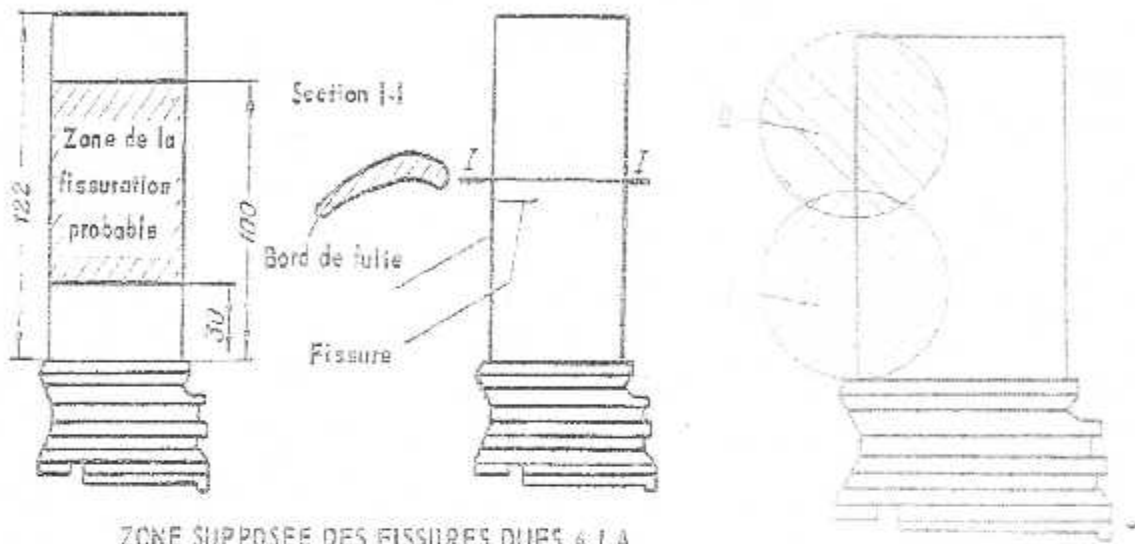
Les défauts les plus fréquents sur le matériel aéronautique sont les suivants:

- Corrosions
- Fissures
- Fuites
- Coches
- Fendilles
- Bossages
- Usures
- Desserrages
- Surchauffes
- Soufflures
- Jeux
- Débattement
- Fatigue
- Déformations
- Distorsions

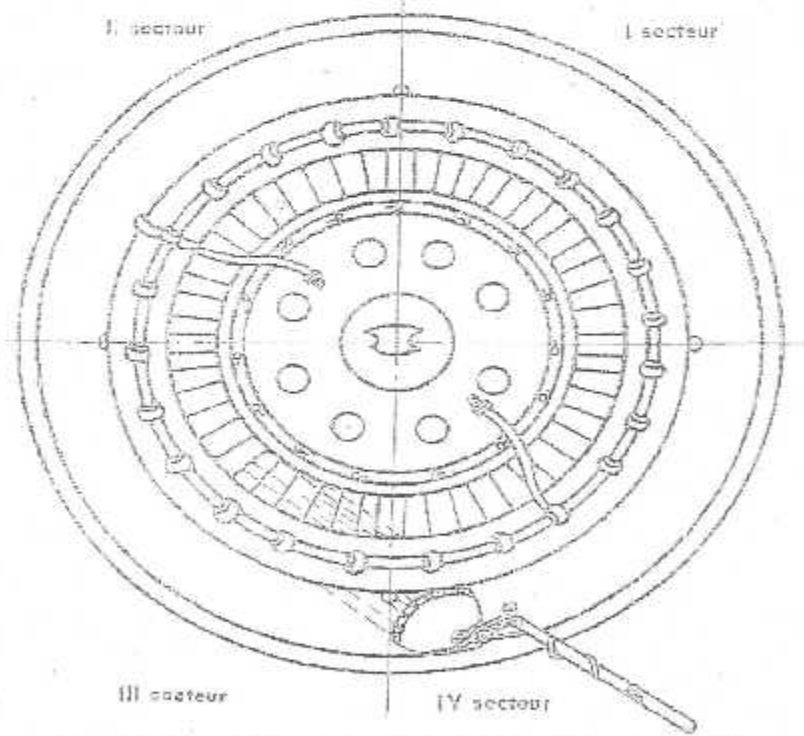
Le moteur est le siège du plus grand nombre de dégradations, pièces tournant à grandes vitesses, les modules à contrôler d'une façon continue sont surtout la turbine (FIG (V-4)), la chambre de combustion (FIG (V-5)) et le compresseur.

Les modules à vérifier pour une turbomachine aéronautique sont les suivants:

- Les grillages des entrées d'air du compresseur ;
- Entrées d'air du compresseur ;
- Roues d'entrée d'air du compresseur ;
- Rouet du compresseur ;
- Pipes d'entrée des chambres de combustion ;
- Enveloppes des chambres de combustion ;
- Tubes de flammes des chambres de combustion ;
- Aubes du distributeur ;
- Aubes de la turbine ;
- Carter de la turbine ;
- Chambre de réchauffe ;
- Volets.



ZONE SUPPOSEE DES FISSURES DUES A LA FATIGUE



VUE DES AUBES DE LA TURBINE COTE TUYERE DU MOTEUR

FIG (V-4): Contrôle de la turbine

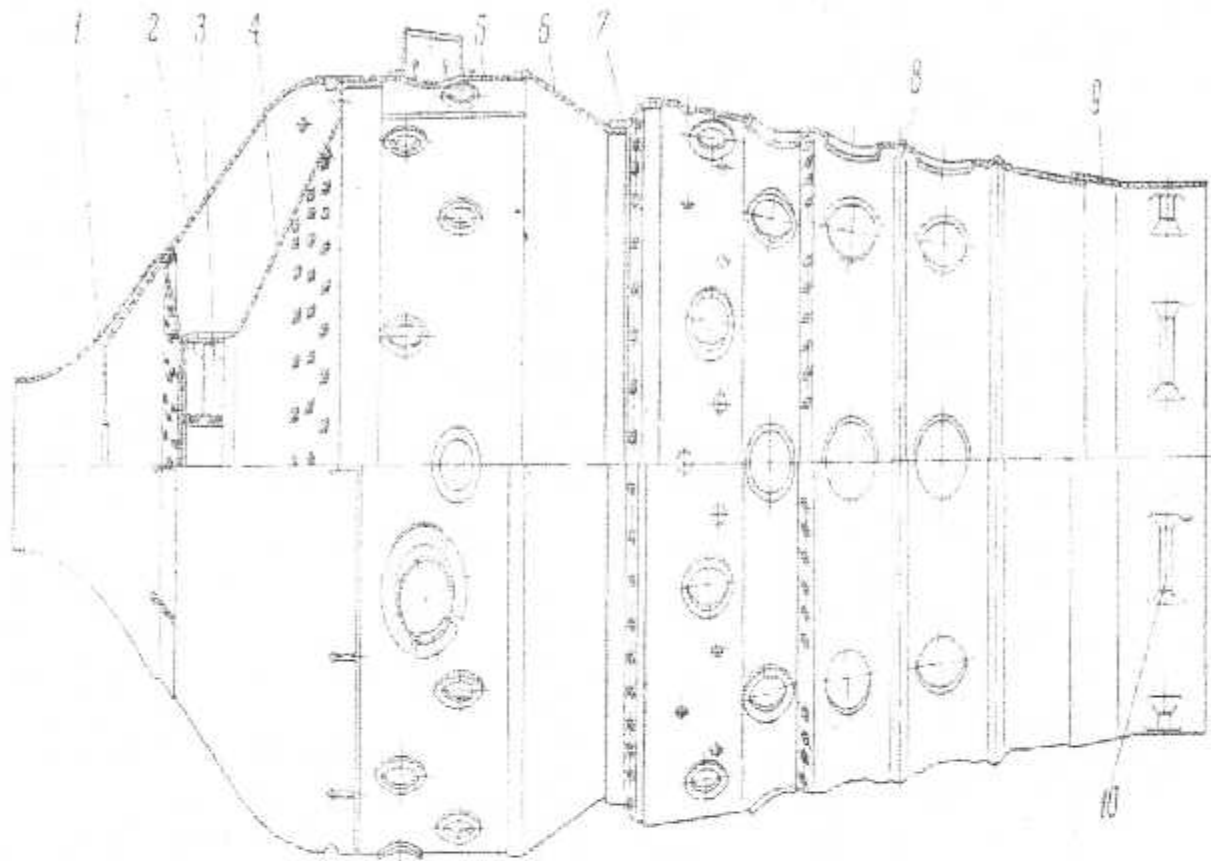


FIG (V-5): Contrôle de la chambre de combustion

V-2-2-2 TECHNIQUE DE CONTROLE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

1- INTRODUCTION

La Thermographie permet de visualiser le rayonnement infrarouge. Cette technique déjà très utilisée dans le domaine militaire et médical est en fort développement dans les applications de la maintenance prédictive dans le domaine aéronautique.

La maintenance prédictive des moteurs aéronautiques par thermographie infrarouge est un excellent complément de l'analyse vibratoire et l'analyse des huiles, elle contribue à l'augmentation de la fiabilité des équipements et de leur rendement, la réduction des arrêts de moteur et une meilleure gestion de l'énergie, et permet une amélioration de la sécurité.

Etymologiquement, thermographie signifie « écrire la chaleur » ou « écrire avec la chaleur ».

L'imagerie infrarouge, ou la thermographie, est une méthode qui permet l'acquisition du rayonnement infrarouge lié à la distribution spatiale de chaleur sur les objets examinés, ainsi qu'à la variation de cette distribution dans le temps.

2- AVANTAGES DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Les avantages qu'on peut tirer à travers l'application de la technique de thermographie infrarouge peuvent se résumer comme suit :

- Economies réalisées grâce à la vitesse, à l'adaptabilité et au faible coût du matériel ;
- Prolongation de la durée de vie des pièces par une détection rapide des anomalies ;
- Optimisation du fonctionnement du moteur par la détection précoce des anomalies et un contrôle plus serré des courbes de performances ;
- Détection d'un plus grand nombre de type d'anomalies y compris certaines anomalies difficilement décelables à l'aide des systèmes actuels, comme les fuites de joints ou de conduites, l'encrassement des injecteurs de carburant, l'érosion de la turbine, les dommages aux aubes et le grillage de la chambre de combustion.

3- PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La thermographie infrarouge permet de cartographier les configurations de chaleur des moteurs à turbine à gaz de diverses manières, à partir du plan d'échappement (extrémité arrière) jusqu'à l'avant, et selon les profils supérieurs et latéraux. Une fois qu'on a saisi et emmagasiné électroniquement une image comparative d'un moteur fonctionnant au rendement optimal, la technologie permet de générer de nouvelles images au cours des inspections régulières prescrites ; ce qui révèle moindres écarts de performance. On fait ensuite correspondre ces écarts des configurations de « problèmes connus » afin de déterminer les causes probables. La base de connaissances augmente à mesure que des problèmes de moteur sont enregistrés, ce qui permet d'offrir un guide de dépannage en constante évolution.

Les données pour références ultérieures peuvent être stockées sous forme d'images vidéo, sur support papier couleurs ou noir et blanc, ou sur support électronique.

La technique de la thermographie infrarouge est la combinaison entre plusieurs phénomènes physiques liés au rayonnement (émission et réception), aux propriétés radiatives des matériaux, à la transmission du rayonnement et aux caméras de mesure infrarouge.

4- DEMARCHE D'APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE SURVEILLANCE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La mesure s'effectue toujours sur la surface extérieure de l'objet à observer. Il sera nécessaire pour pouvoir interpréter de bien connaître les équipements que l'on mesure afin de pouvoir :

- Faire une corrélation entre les éventuelles défaillances des composants de l'équipement et le thermogramme résultant ;
- Mettre en œuvre une périodicité de mesure adéquate en fonction de défauts recherchés et de leur criticité dans le process ;
- Connaître les limites d'échauffements relatifs de composants.

La fiabilité de la mesure par thermographie infrarouge sera fonction de :

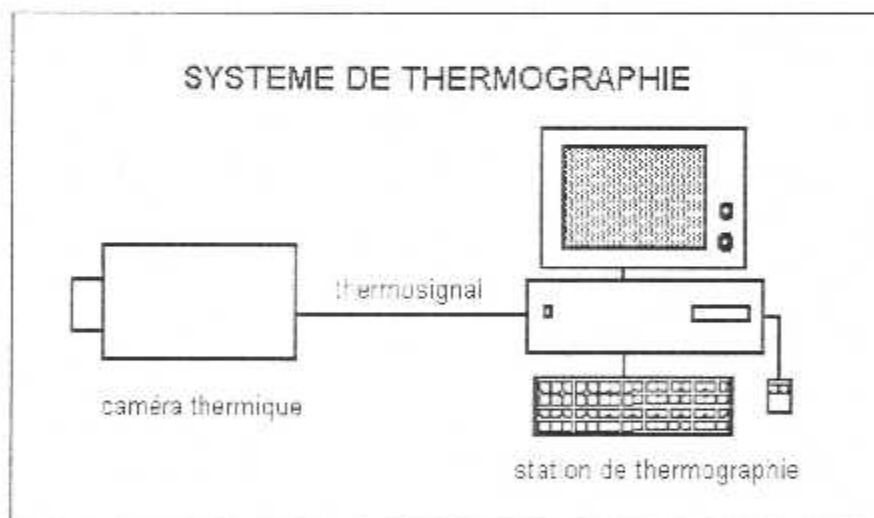
- L'initialisation de la base de données ;
- La connaissance de la machine, conditions de fonctionnement, historique, environnement ;
- La prédétermination des niveaux de température anormaux (alarmes) ;

- La mise en place de rondes de mesures en cas de suivi, en tenant compte des conditions de fonctionnement, mise en place de signature thermique de référence et suivi avec diagnostic ;
- Le choix des prises de vues, visible et infrarouge, ensemble et détail ;
- L'expérience de l'opérateur.

Il faut donc réunir les conditions et le matériel nécessaires à l'application de cette technique. Ces derniers concernent la collecte, le traitement et l'interprétation des données relatives à la thermographie infrarouge.

- **CHAINE DE MESURE :**

Un ensemble de mesure par thermographie infrarouge est composé d'un capteur de mesure étalonné, et d'un calculateur permettant de transposer les mesures de rayonnement en température. Il incombe à l'opérateur d'entrer les paramètres d'influences nécessaires au calcul.



- **LES CAMERAS INFRAROUGES :**

Le mécanisme des caméras infrarouges est constitué de matériaux transmetteurs, qui doivent avoir un très bon facteur de transmission $\tau(\lambda) \cong 1$, et de matériaux de réflexion qui doivent avoir un très bon facteur de réflexion $\rho(\lambda) \cong 1$. Ainsi donc les matériaux retenus seront aussi peu absorbants (ou émetteurs) que possible, soit : $\epsilon(\lambda) \cong 0$. Ce sont les matériaux qui la constitue qui déterminent les bandes spectrales et les plages de température d'utilisation de la caméra infrarouge.

- **CRITERE DE CHOIX D'UNE CAMERA DE MESURE INFRAROUGE :**

Pour avoir une grande précision de mesure, il faut toujours choisir le matériel le plus adéquat pour le cas qui se présente. On choisit une caméra de mesure infrarouge par rapport aux critères suivants :

- La plage de température : la température à mesurer du sujet doit être incluse dans l'intervalle de température mesurable par la caméra infrarouge ;

- La sensibilité : c'est la capacité de la caméra à mesurer les écarts de température du corps noir, pour la plage de température spécifiée ;

- La bande spectrale : la mesure thermographique doit être faite dans la bande spectrale, où le sujet se comporte de façon aussi proche que possible du corps noir pour avoir une bonne émissivité de ce dernier. En général, les caméras de mesure fonctionnent dans les bandes spectrales de bonne transmission atmosphérique ;

- La distance de mesure : la transmission atmosphérique est meilleur de 2 à 6 μ m et de 8 à 14 μ m. les critères précédents sont donc à vérifier en fonction de la distance de mesure ;

- Les options de la caméra : en dehors des caractéristiques techniques, la caméra de mesure présente d'autres facultés, comme : la robustesse, la capacité de sa mémoire de stockage des données, simplicité d'utilisation, volume, poids, prise des images réels à coté des images infrarouge, etc.

- **PRISE DE MESURES THERMIQUES :**

La caméra mesure et transcrit par l'image les rayonnements infrarouges émis par un sujet. Le fait que les rayonnements soient une fonction de la température de surface du sujet permet à la caméra de calculer et d'afficher cette température.

Cependant, les rayonnements mesurés par la caméra ne dépendent pas seulement de la température des sujets mais sont aussi fonction de l'émissivité. Les rayonnements proviennent également de l'environnement et sont réfléchis sur le sujet. Les rayonnements émanant du sujet et les rayonnements réfléchis sont également influencés par l'absorption de l'atmosphère.

Pour mesurer précisément la température, il est donc nécessaire de compenser les effets d'un certain nombre de sources de rayonnements. La caméra effectue automatiquement cette compensation en ligne. Il faut, cependant, fournir les paramètres du sujet suivant la caméra.

- **MESURE DE L'EMISSIVITE :**

- Avec un thermocouple : sélectionner un point de référence et mesurer sa température à l'aide d'un thermocouple. Modifier l'émissivité jusqu'à ce que la température mesurée par la caméra soit la même que celle du thermocouple. C'est la valeur d'émissivité du sujet de référence. Cependant, la température du sujet de référence ne doit pas être trop proche de la température ambiante pour effectuer cette opération.

- Avec une émissivité de référence : placer sur le sujet une bande ou une touche de peinture dont l'émissivité est connue. Mesurer la température de la bande ou de la peinture avec la caméra, en réglant l'émissivité à sa valeur correcte. Noter la température. Modifier l'émissivité jusqu'à ce que la zone non recouverte par la bande ou par la peinture, dont l'émissivité est inconnue, donne la même indication de température. La valeur d'émissivité peut maintenant être lue. Là aussi la température du sujet de référence ne doit pas être trop proche de la température ambiante pour effectuer cette opération.

- **MESURE DE LA TEMPERATURE D'ENVIRONNEMENT :**

Ce paramètre sert à compenser les rayonnements réfléchis sur le sujet et les rayonnements émis par l'atmosphère entre la caméra et le sujet.

Si l'émissivité est trop faible, la distance très longue et la température du sujet relativement proche de la température ambiante il faut nécessairement régler et compenser correctement la température de l'environnement.

- **MESURE DE LA DISTANCE ET DE L'HUMIDITE RELATIVE :**

La distance est la distance entre le sujet et la caméra. Ce paramètre sert à corriger le fait que les rayonnements sont absorbés entre le sujet et la caméra et que la transmittance est faiblit avec la distance.

La caméra compense aussi le fait que la transmittance est extrêmement dépendante de l'humidité relative de l'atmosphère. Pour cela régler l'humidité relative à la valeur correcte.

Pour de courtes distances et une humidité normale, l'humidité relative peut normalement être conservée à une valeur par défaut de 50 %.

5- REGLES D'INTERPRETATION

Après collecte, il convient d'interpréter l'ensemble des données recueillies lors de la ronde en tenant compte du fonctionnement du process. Cette interprétation peut également s'effectuer par comparaison avec un thermogramme précédent, en cas de suivi. Bien souvent, un phénomène nouveau peut apparaître qui pourra nécessiter une étude plus approfondie de ce phénomène afin de donner une interprétation adéquate.

• **VISUALISATION ET TRAITEMENT DES THERMOGRAMMES :**

Les systèmes de traitement proposent un ensemble de fonction d'analyse et de visualisation :

- Noir et blanc ou couleur : le noir et blanc donne une meilleure reconnaissance qualitative et une meilleure finesse d'appréciation spatial de la scène thermique. La couleur permet une meilleure discrimination quantitative et visuelle de niveaux thermographiquement proches ;

- Isothermes : cette fonction consiste en la mise en surbrillance, sur le thermogramme visualisé, des zones d'égal température ;

- Profil thermique : c'est la visualisation en XY sur un oscilloscope du signal vidéo d'une ligne de balayage ;

- Mesure ponctuelle : l'opérateur pose un réticule sur l'écran en un point donné : la température calculée de ce point s'affiche à l'écran ;

- Histogramme : c'est un tracé des fréquences relatives des différentes températures ou luminances d'un thermogramme, en fonction de ces températures ou des ces luminances ;

- Gradient thermique : c'est le calcul du gradient sur une ligne définie par l'opérateur ;

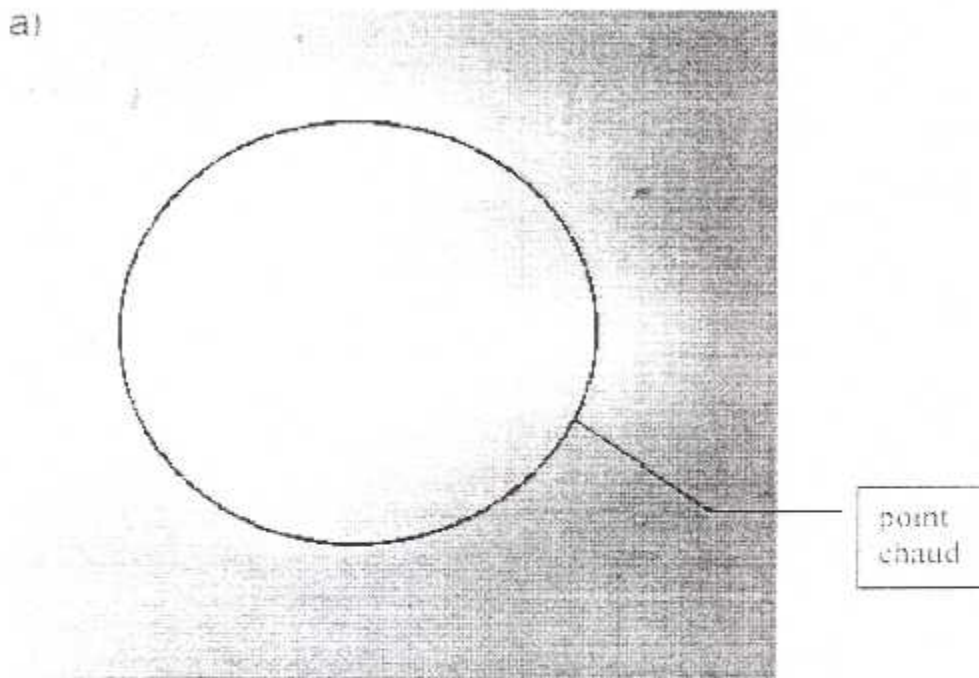
- Zoom spatial et zoom thermique : le zoom spatial n'ajoute aucune information sur l'écran, mais peut permettre une meilleur visualisation des détails. Par contre le zoom thermique permet d'accéder à des informations thermiques plus fines ;

- Fenêtre thermique : c'est une extension de la fonction isotherme à toute plage thermique comprise entre deux températures choisies par l'opérateur, les différences de température sont maintenues dans les zones restantes ;

- Soustraction des thermogrammes : elle permet de repérer des différences entre deux phénomènes thermiques sur une scène géométriquement statique ;

- Filtrage passe - haut ou passe - bas : destinés à visualiser les forts gradients thermiques, au contraire, à atténuer le bruit sur thermogramme.

Dans l'exemple de la figure ci-après, on a chauffé la pièce tout en observant sa surface à l'aide d'une caméra infrarouge. Si la pièce était intacte, la chaleur diffuserait à l'intérieur de la pièce de façon homogène. Dans ce cas, on voit une tache plus claire et donc plus chaude au centre de l'image qui indique une délamination de la barrière thermique.



Détection des défauts par thermographie infrarouge IR

La figure ci-après est une image prise par thermographie infrarouge sur un aube de turbine. Cet aube a subi un endommagement local suite à des arrachements de matière. Ces arrachements sont visibles à l'œil nu, mais la délamination consécutive de la barrière thermique n'est pas visible a priori. L'utilisation de contrôle non destructif par thermographie a permis de la mettre en évidence.

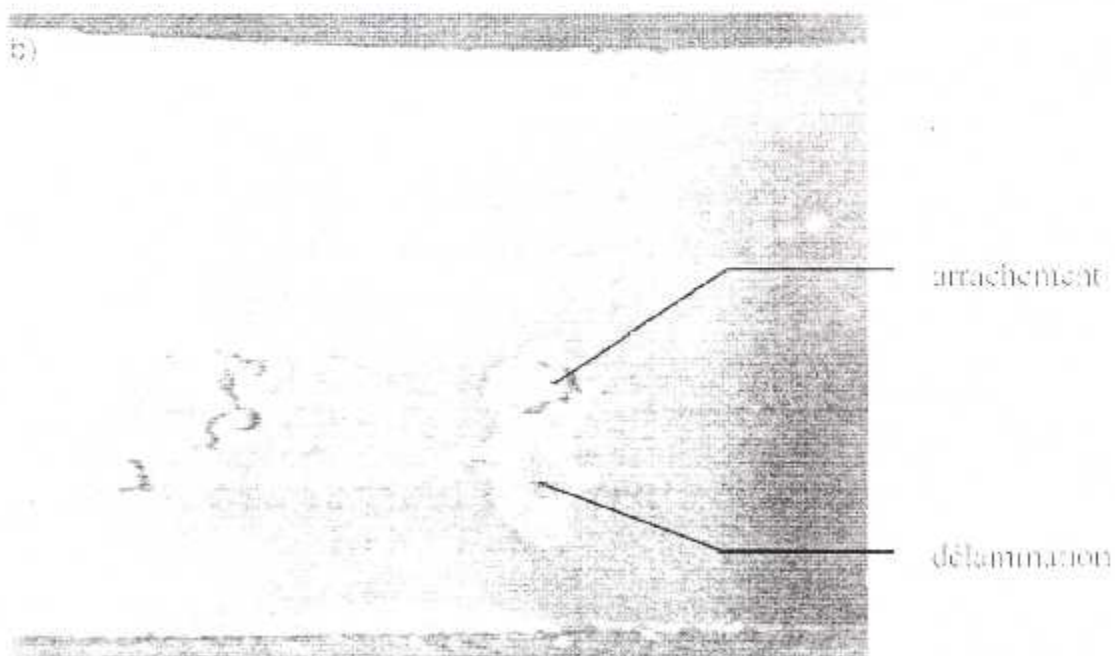


image IR d'un aube de turbine montrant la délamination consécutive à un arrachement de matière

EMISSIVITE DE QUELQUES MATERIAUX USUELS
POUR UN ANGLE D'OBSERVATION DE 0° A $\lambda = 5\mu\text{M}$

MATERIAU	TEMPERATURE (°C)	EMISSIVITE
Aluminium poli	100	0.05
Aluminium anodisé	100	0.55
Laiton poli	100	0.03
Laiton oxydé	100	0.61
Cuivre poli	100	0.05
Cuivre oxydé	20	0.78
Or poli	100	0.02
Fer, fonte, polis	40	0.21
Fer, fonte, oxydé	100	0.64
Fer, fonte, très rouillés	20	0.69
Magnésium poli	20	0.07
Nickel poli	20	0.05
Nickel oxydé	200	0.37
Argent poli	100	0.03
Acier inoxydable 18/8 poli	20	0.16
Acier oxydé	60	0.85
Acier poli	100	0.07
Acier oxydé à 800 °C	200	0.79
Fer blanc	100	0.07

V-2-3 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE DE SURVEILLANCE DES TENDANCES DES PERFORMANCES MOTEUR

1-INTRODUCTION

La surveillance de l'état du moteur consistait, auparavant, à contrôler principalement certains accessoires tels que les filtres d'huile, la pression d'huile, les températures de fonctionnement, les niveaux de vibration et l'examen des bouchons magnétiques pour contrôler les débris métalliques dans le circuit de graissage. Ces données étaient enregistrées manuellement et l'analyse des débris exigeait l'assistance d'un personnel qualifié. La surveillance de l'état est devenue standard avec l'apparition de grands turboréacteurs à double flux pour les nouveaux avions de ligne à fuselage élargi tel que le Boeing 747 ou le Lockheed tri star. Ces moteurs conçus sous forme modulaire, permettent aux sections d'un moteur d'être enlevées et réparées quand il est nécessaire, facilitant le suivi des parties internes importantes du moteur. Leur inspection se faisant sans enlever le moteur du fuselage et sans démontage au sol. La caractéristique la plus importante était l'emploi étendu des orifices pour l'inspection des modules moteur par borescope.

Les capteurs remplissant le même rôle de prélèvement des paramètres comme la température, la pression ou les paramètres de vibration, sont beaucoup plus fiable et précis que par le passé. Les systèmes numériques ont permis d'augmenter le nombre de paramètre à mesurer ainsi que la plage de prise de mesure. La commande du moteur est devenue plus aisée avec l'introduction des système modernes de régulation automatique du carburant FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*). Grâce aux systèmes d'acquisition et de transmission de données installés sur les avions de ligne les plus récents, il est devenu possible d'identifier les pannes électriques interne et discerner les faux signaux des sondes et autres problèmes de maintenance.

Les progrès technologiques, comme évoqué plus haut, sont essentiellement le fruit de l'évolution réalisée dans les domaines de l'électronique et de l'informatique. Ces progrès sont, notamment, caractérisés par :

- Plusieurs accès sont prévus pour les inspections endoscopiques des éléments rotatifs et des injecteurs de tubes à flammes. Les images endoscopiques sont transférées à un

groupe d'experts qui donneront les indications sur l'état du moteur et les orientations nécessaires de maintenance, sans déposer le moteur de l'avion ;

- Les turboréacteurs actuels utilisent des systèmes de régulation automatique (FADEC) plus évolués qui peuvent gérer plusieurs fonctions en même temps. Le nouveau FADEC inclus outre la régulation automatique du carburant utilisée sur les anciens moteurs RB 211, un *self-test* des unités électroniques, tout en assurant la transmission des messages de maintenance par le système électronique de contrôle ;
- Les tendances de performance sont prise en compte et vont servir à la surveillance individuelle des performances de chaque module moteur ;
- Utilisation de détecteur (bouchons magnétiques) de débris métalliques dans le circuit d'huile de graissage ;
- La surveillance des niveaux de vibration et des indications standards du moteur en vol.

Le monitoring a évolué de façon à diminuer l'action humaine sur l'analyse et l'expertise des données et cela en le remplaçant par un ordinateur qui transforme les données recueillies en informations utiles. Cependant, la présence d'ingénieurs habiles reste indispensable pour la traduction des informations en actions fiables de maintenance ainsi que pour la définition des règles d'interprétation aidant le système à gérer ces dernières.

L'intelligence artificielle consiste à transférer les procédures des experts à un système de gestion de données sur ordinateur, ce qui permet à ces experts d'aborder des domaines nouveaux et non automatisés. Des compagnies aériennes ont investi dans le domaine de l'intelligence artificielle depuis plusieurs années, d'autres étudient la possibilité d'utiliser les techniques de programmation, de surveillance et de maintenance, sur avions.

2-OBJECTIFS DE LA TECHNIQUE

Le monitoring des paramètres de performance (surveillance des tendances) a pour objectif d'améliorer l'efficacité et d'optimiser les opérations de maintenance. Ceci a pour conséquence de lever l'indisponibilité opérationnelle du matériel. Il permet, par le biais des données récoltées, de prendre les décisions les plus stratégiques comme l'éventuelle prorogation des moteurs. Les critères de base à ces décisions sont liés directement aux

modifications des performances plutôt que d'attendre l'avènement de problèmes mécaniques ou autres.

Les progrès enregistrés dans le domaine du monitoring des paramètres de performance et du suivi de l'état des moteurs sont, avant tout, largement motivés par des raisons économiques. Le but essentiel recherché est d'exploiter les moteurs le plus longtemps possible en minimisant les coûts de maintenance et en optimisant les performances tout en évitant la dépose aléatoire avec les préjudices qu'elle induit, que la dépose systématique sont évitées. Le monitoring des paramètres de performance permet également d'optimiser la consommation du carburant et conduit par là à une maintenance et une exploitation rentables.

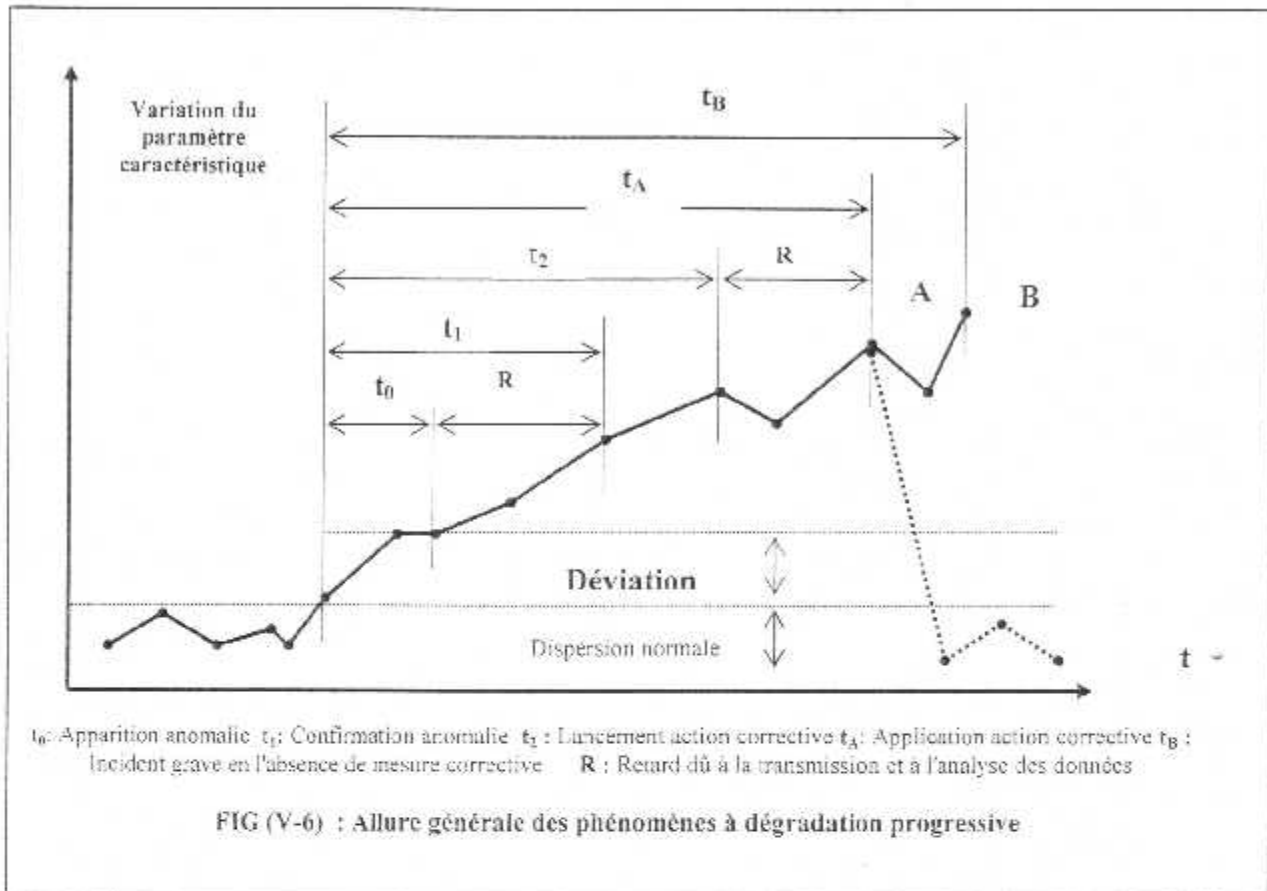
Il devient possible de répondre aux exigences des vols particuliers de l'aéronef. Des moteurs équipés de capteurs appropriés de surveillance de la consommation sont déposés dès qu'une consommation excessive est enregistrée, évitant leur détérioration.

Ces techniques de surveillance des moteurs ont permis aux grandes compagnies aériennes d'exploiter leurs équipements d'une façon remarquable, en réduisant les durées des déposes motrices. A titre d'exemple, six moteurs Rolls-Royce RB211-535E 4 de l'Amérique Ouest ont accompli 18000 heures sans dépose, soit huit million de miles pour chaque moteur.

3-PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

L'avancée technologique dans le domaine de la surveillance et du suivi des turboréacteurs a permis l'émergence de plusieurs techniques favorisant du coup, la réduction des coûts associés aux opérations de maintenance et d'entretien des moteurs d'une manière très appréciable.

Le monitoring des paramètres est l'outil de maintenance le plus performant. Il consiste à faire la surveillance continue des paramètres de fonctionnement dans le but de déceler tout indice de dégradation progressive. L'incident est anticipé par dépose de l'équipement à un seuil de déviation fixé par l'expérience cette technique suppose que l'incident prend un certain temps pour se développer, permettant ainsi le lancement d'actions correctives ou préventives avant la phase finale de dégradation et la confirmation de la signature de la panne (FIG (V-6)).



4- DEMARCHE D'APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE SURVEILLANCE DES TENDANCES

Le suivi de l'état des moteurs dépend de la collecte, du stockage et du traitement des données fournis par les équipements sur un temps spécifiquement réparti. Dès lors que ces trois stades sont convenablement réalisés, la technique devient un outil de décision très efficace pour la définition de la politique d'exploitation des équipements et de leur maintenance. Il devient aisé aux exploitants de prendre les précautions appropriées pour éviter tout événement inattendu et d'organiser la dépose du moteur dans le respect des exigences de fonctionnement.

Les systèmes du monitoring comptent sur l'efficacité de l'interface humaine et doivent être d'une grande précision pour répondre aux besoins des utilisateurs exigeants de plus en plus. Ces systèmes doivent alors :

- Inclure les indications sur les opérations de vol ;
- Inclure les données moteur ;

- Fournir les données de maintenance, de contrôle et de réparation ;
- Etre conçus de façon que leur exploitation soit possible par le personnel de maintenance et non par les experts et les constructeurs d'ordinateurs seulement.

4-1 COLLECTE ET ACQUISITION DE DONNEES

Le relevé de paramètre réacteur se fait en régime de croisière sur un formulaire (relevé de vol et mouvement) dans des conditions de stabilité bien définies. Plus le nombre de relevés est important plus la qualité du suivi (monitoring) est bonne. Les relevés sont transmis au centre de traitement informatique par message télégraphique ou les informations sont alors stockées par le programme.

Les paramètres nécessaires au suivi monitoring sont les suivants :

- *paramètres de vol* : ces paramètres vont servir à ramener les paramètres thermodynamiques aux conditions standard par un calcul de réduction, pour permettre une comparaison entre des vols s'effectuant chacun dans des conditions de pression, température et mach différentes. Ce sont :

- TAT : température totale ;
- M : mach ;
- PAIT : altitude pression ;
- Conditions de soutirage (conditionnement d'air).

- *paramètres thermodynamiques* : ces paramètres, caractéristiques du rendement thermodynamique global du moteur, varient en fonction des détériorations de l'état mécanique des pièces affectant le passage des gaz, telles que chambre de combustion, ailettes de turbine et autres. Ce sont :

- N1 : vitesse de rotation de l'attelage basse pression ;
- N2 : vitesse de rotation de l'attelage haute pression ;
- EGT : température de sortie des gaz de turbine HP ;
- FF : débit carburant.

▪ Paramètres mécaniques : ces paramètres sont représentatifs des dégradations mécaniques. Ce sont :

- *Les vibrations* : sont détectées par des capteurs situés sur l'enceinte de roulements, sur le carter inter turbines ou sur le carter de compresseur. Une augmentation de vibrations est le signe d'une détérioration d'un élément tournant (ailette, roulement,...) ;
- *Position de l'angle des aubes du stator variable (VSV)* : sur les moteurs qui sont équipés de la chaîne de mesure adéquate, l'angle des VSV est enregistré. Son suivi permet de détecter les détériorations du réglage des VSV qui influe largement sur la consommation spécifique des réacteurs ;
- *Position manette* : La position de la manette de poussée est enregistrée et ses anomalies de comportement ont permis de mettre en évidence une détérioration importante du corps haute pression. Cette indication reste néanmoins rarement exploitable ;
- *Circuit d'huile* : les paramètres température et pression d'huile sont mesurés en amont de l'échangeur thermique huile/carburant. Ils permettent de contrôler le fonctionnement du circuit d'huile.

P_0 : pression d'huile ;

T_0 : Température d'huile.

4-2 TRANSMISSION DES DONNEES

Dans certains cas, les avions sont dotés de systèmes d'acquisition embarqués, les données sont alors capturées par le **DFDAU** (digital flight data acquisition unit) et passent automatiquement à un système de transmission automatique de données. Le système **ACARS** (aircraft communications addressing and reporting system) transmet les données collectées à des stations de traitement au sol via des messages sur ondes VHF. Si l'avion se trouve loin des stations de réception, les données sont alors stockées. Les paramètres du décollage et de la montée sont transmis immédiatement, si on est dans la zone d'émission, tandis que les données de croisière ne sont transmises que vingt minutes avant l'arrivée à destination. L'efficacité de la méthode repose donc largement sur la rapidité de transmission des données et la prise en compte du maximum d'informations.

4-3 TRAITEMENT DES DONNEES

On procède en plusieurs étapes :

1. Etablissement des références:

- *Paramètres thermodynamiques :*

Les valeurs des paramètres thermodynamiques sont relevées, vol après vol, et comparées à des valeurs de référence calculées pour les conditions du vol. L'écart entre la valeur brute du paramètre et la valeur qu'il devrait avoir dans les conditions de vol est exprimée en pourcentage sauf pour l'EGT qui est en °C,

- *Paramètres mécaniques :*

- Les vibrations sont suivies en valeur absolue,
- La position manette est comparée à la moyenne des positions manettes des moteurs de l'avion et l'écart porté est en valeur absolue,
- La température d'huile est suivie en valeur absolue,
- La pression d'huile est suivie en valeur absolue.

En outre, un écart de pression DOP (delta oil pressure) est calculé par comparaison de la valeur brute à une pression de référence calculée en fonction de N2.

2- Interprétation des données

L'interprétation des résultats obtenus doit se faire en prenant en compte les évolutions simultanées de tous les paramètres, en essayant de rapprocher, après analyse d'après les règles fondamentales exposées ci-après, le cas examiné d'une signature type.

Les signatures des paramètres thermodynamiques et mécaniques sont en principe indépendantes. Mais il convient en premier lieu de s'assurer que la dérive des paramètres n'est pas due à des problèmes d'instrumentation.

- ⊗ *Dégradations instrumentales :* une erreur instrumentale se détecte en principe par l'aspect caractéristique de l'évolution des paramètres :
- ⊗ *Dégradations thermodynamiques :* les évolutions de paramètres thermodynamiques dues à des dégradations des ensembles rotatifs ou statiques de la veine d'air obéissent à certaines règles générales.

- Une dégradation de l'écoulement dans la veine d'air a pour conséquence une diminution du rendement thermodynamique, c'est-à-dire à débit d'air constant ($N1$ constant), une augmentation d'EGT et de FF. En effet, l'énergie dissipée étant plus grande, le moteur a besoin d'en produire plus pour maintenir le débit d'air constant, le $N1$ étant le paramètre de pilotage du moteur. Cette perte de rendement s'accompagne d'une augmentation de $N2$ dans le cas d'une anomalie compresseur diminuée, le maintien d'un débit d'air constant implique une production d'énergie supplémentaire donc une augmentation de $N2$;
 - Par contre, une anomalie de turbine HP diminue l'énergie récupérée et la vitesse de rotation $N2$ diminue également ;
 - Les dégradations de compresseur HP entraînant une signature nette de paramètres. Elles ont pour effet une augmentation d'EGT, en principe accompagnée d'une augmentation de $N2$ et d'une augmentation de FF ;
 - Un problème de partie chaude, que ce soit la chambre de combustion ou la turbine HP, a pour conséquence une diminution du rendement thermodynamique global qui se traduit, à puissance constante, par une augmentation d'EGT et (en principe) du FF, le $N2$ restant stable ou même allant jusqu'à diminuer.
- o *Dégradations mécaniques :*
- Une augmentation des vibrations au monitoring non corroborée par un niveau de vibration réel constaté en vol par l'équipage aura pour origine un problème d'indication (capteur, indicateur). Ceci est valable aussi bien pour les vibrations fan que turbine ;
 - Une augmentation des vibrations fan ou turbine, avec ou sans signature thermodynamique, est la plupart du temps le signe d'un balourd engendré soit par un défaut d'équilibrage des pièces tournantes, soit par une perturbation d'origine mécanique de cet équilibrage (aillette impactée par exemple) ;
 - Une augmentation de l'écart de pression d'huile rapide ou le passage au –delà du zéro signifie que la pression d'huile augmente de façon anormale, et c'est le signe d'une obstruction progressive d'un élément du circuit. L'exemple type est la cokéfaction de la tuyauterie d'alimentation.

V-2-3 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE D'ANALYSE VIBRATOIRE

1- INTRODUCTION

Dans la surveillance des moteurs, les vibrations sont considérées comme le paramètre le plus important dont l'évolution est significative de manifestation d'anomalies ou défauts qui peuvent se développer jusqu'à entraîner une indisponibilité. En effet, toute anomalie survenant sur des pièces en rotation ou en contact avec le rotor tels que le détachement de fragments d'aubes, l'usure dans les paliers ou la mauvaise lubrification, s'annonce par une augmentation du niveau des vibrations. C'est pourquoi le suivi vibratoire est largement utilisé en tant que technique de surveillance dans la maintenance conditionnelle. Justement, il permet entre autres :

- D'augmenter la durée de vie des modules du moteur ;
- D'effectuer des opérations de maintenance moins coûteuses ;
- De réduire les risques d'incidents et d'en déceler l'origine.

Donc, l'avantage majeur d'un bon suivi vibratoire est d'améliorer la longévité des pièces d'usure et leur maintien en service jusqu'à leurs limites réelles. Aussi, il offre la possibilité de programmer des actions de maintenance précise et anticipatives, et ce de façon à éliminer les anomalies qui risquent de dégénérer en catastrophe.

2- OBJECTIFS DU SUIVI VIBRATOIRE :

- **Détection précoce des anomalies** : un accroissement du niveau global de vibration peut mettre en évidence une manifestation d'anomalie à un stade précoce ;
- **Diagnostic des défauts** : la fréquence à travers laquelle le défaut se manifeste renseigne sur la nature des organes détériorés. Pour chaque point surveillé, les balourds, les défauts d'alignement, le vieillissement des roulements et l'endommagement des dents des pignons ont leurs caractéristiques fréquentielles, qui apparaissent lors de l'analyse de fréquence.
- **Prévision des pannes** : le tracé de l'accroissement du niveau d'une ou de plusieurs composantes fréquentielles sur la base de prises de mesures périodiques permet une lecture de l'évolution des défauts. Les courbes obtenues indiquent, par extrapolation, le moment auquel il faudra programmer la prochaine révision avant que la période critique ne soit atteinte.

3- PRINCIPE DE L'ANALYSE VIBRATOIRE

La sécurité en vol se trouve étroitement liée au bon fonctionnement des systèmes dynamiques de la turbo machine tels que le compresseur, la turbine, les paliers, etc. Les techniques de suivi et d'analyse vibratoire offrent la possibilité de connaître, avec une très grande précision et à temps réel, l'état fonctionnel des systèmes dynamiques. Toute anomalie survenant sur un organe dynamique est, quelque part, consignée à travers le spectre vibratoire relevé. L'analyse vibratoire permet, à travers des séries de mesures, de situer l'anomalie responsable de la fluctuation des vibrations.

On désigne par vibration la variation dans le temps d'une grandeur quelconque. Il existe de nombreux exemples, qu'ils soient artificiels ou naturels, pour les quels on observe un tel phénomène de va-et-vient autour d'une position de repos. Elle se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes :

- Déplacement ;
- Vitesse ;
- Accélération.

La grandeur retenue par la mesure est appelée paramètre ou indicateur de surveillance. Ainsi, par rapport à une mesure effectuée en mode vitesse, la mesure en mode déplacement aura pour effet d'atténuer toutes les composantes moyennes et haute fréquence et d'amplifier les composantes basses fréquences. En revanche, la mesure en mode accélération aura pour effet d'atténuer les composantes basses fréquences et d'amplifier les composantes hautes fréquences.

Un phénomène vibratoire induit par un phénomène donné se traduira par un déplacement significatif si sa fréquence est faible. C'est la raison pour laquelle la mesure en mode déplacement n'est généralement utilisée que pour mettre en évidence des phénomènes basse fréquence ou dont les composantes prépondérantes se situent à 1 ou 2 fois la fréquence de rotation (déséquilibre, déformation, désalignement, desserrage,...), voir en dessous de la fréquence de rotation (instabilité, frottement,...).

La mesure en mode vitesse permet d'observer correctement des phénomènes dont la fréquence n'est pas trop élevée, c'est-à-dire ne dépassant pas 4000 à 5000 HZ (passage de

pales d'un ventilateur ou d'une pompe, engrènement sur réducteur, défauts de roulements dans le cas d'écaillage localisés,...), et bien évidemment les défauts traditionnels des lignes d'arbre (déséquilibre, désalignement, déformation, instabilité, frottement,...).

La mesure en mode accélération (directement proportionnelle aux forces dynamique induisant le mouvement) permet de mettre en évidence des phénomènes dont les fréquences sont élevées (engrènement sur un multiplicateur, passage d'encoques sur un moteur,...) on qui génèrent des signaux impulsionnels de courte durée, riches en composantes haute fréquence (écaillage de roulements, jeu, cavitation).

4- DEMARCHE D'APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE L'ANALYSE VIBRATOIRE

• PROCESSUS DE SURVEILLANCE

De façon générale, la surveillance du moteur par la technique de suivi vibratoire s'effectue selon le processus suivant :

- Relevé des signatures initiales des vibrations, de chaque module concerné par le suivi dans les différents régimes de fonctionnement, par exemple lors de la mise en service du moteur juste après sa révision ;
- Identification des composantes des spectres vibratoires initiaux ;
- Prélèvement, périodique ou occasionnel, des spectres vibratoires dans les différents régimes de fonctionnement du moteur, et ce moyennant les capteurs placés dans des points de mesure appropriés ;
- Comparaison des spectres prélevés avec ceux initiaux afin de déceler, éventuellement, une quelconque évolution de l'amplitude des vibrations ou l'apparition de nouvelles raies spectrales ;
- Etablissement de diagnostic, par exemple en faisant varier les points de mesure, pour situer l'anomalie survenant dans le moteur qui est responsable de l'augmentation du niveau des vibrations ;
- A vrai dire, il n'y a pas de règle précise pour établir un diagnostic. La localisation des anomalies à partir des spectres vibratoires dépend du cumul d'expérience et de maîtrise dans le domaine des vibrations.

- **CHAÎNE DE MESURE**

Une chaîne de mesure vibratoire doit remplir les fonctions suivantes :

1- Transformer la vibration mécanique en un signal électrique

C'est le rôle du capteur. Le signal délivré peut être exprimé à l'aide des grandeurs suivantes :

- La tension électrique (en mv/g , $\text{mv}/\mu\text{m}$,...) pour les capteurs de tension ;
- La charge électrique (en pc/g) pour les accéléromètres piézoélectriques.

2- Amplifier le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable

C'est le rôle du préamplificateur, indispensable pour les accéléromètres piézoélectriques, il donne, soit une amplification simple de la tension de sortie du capteur (amplificateur de tension), soit une transformation de la charge électrique en tension avant son amplification (convertisseur charge-tension improprement appelé préamplificateur de charge).

3- Intégrer le signal

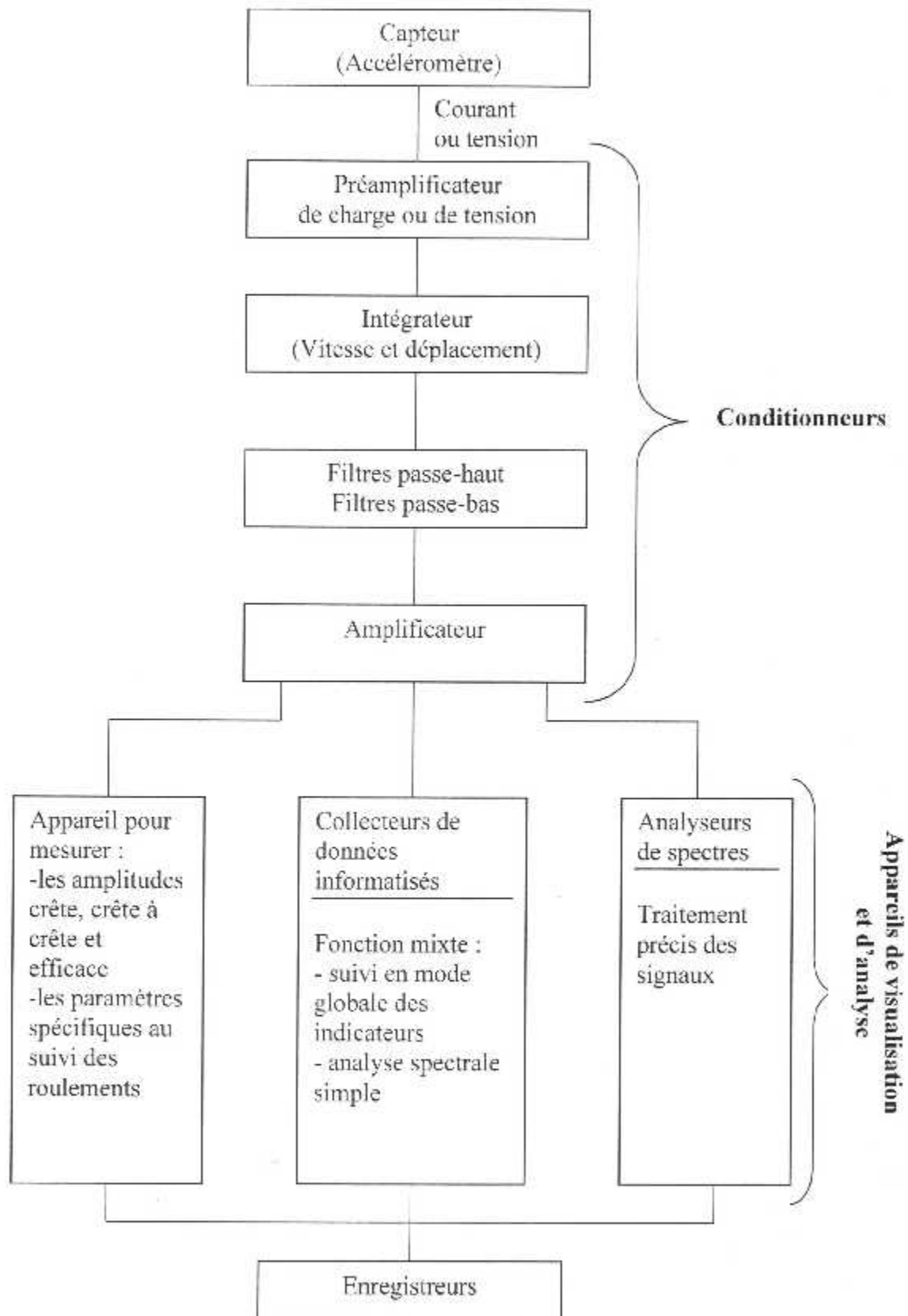
Cette opération permet de transformer, si nécessaire, les accélérations mesurées avec un accéléromètre en déplacements ou vitesses ou encore les vitesses mesurées avec un vélocimètre en déplacements.

4- Limiter la plage de fréquences du signal :

C'est le rôle des filtres passe-haut ou passe-bas à fréquences de coupure ajustable ou non. Cette opération permet de réduire l'influence de composantes hautes ou basses fréquences jugées indésirables, de concentrer l'étude sur une plage de fréquence définie, ou d'effectuer des mesures selon les spécifications d'une norme.

5- Amplifier de nouveau le signal obtenu pour le transmettre

- Soit à un appareil de détection et d'affichage en mode global ;
- Soit à un convertisseur analogique/numérique pour un traitement numérique des données (collecteurs de données informatisés) ;
- Soit à un analyseur de spectre ou à une unité de stockage (enregistreur magnétique ou numérique) pour un traitement différé des signaux.



Chaîne de mesure type

• **DEFAUTS A DETECTER**

A travers la technique du suivi vibratoire, plusieurs défauts qui risquent d'affecter le bon fonctionnement des moteurs, peuvent être détectés et localisés, et ce de façon précoce. Il s'agit entre autres de :

- Défaillance partielle sur les aubes du compresseur ou de turbine engendrée par un défaut d'équilibrage ;
- Dégradation dans les roulements ;
- Fuite d'huile au niveau du compresseur ;
- Frottement aux extrémités des aubes ;
- Mésalignement des arbres d'accouplement ;
- Desserrage des boulons de fixation du compresseur ;
- Mauvais emplacement des aubes.

A titre indicatif, le tableau suivant présente les principales causes de vibration et les fréquences correspondantes.

Type d'anomalies	Vibration		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 f_{rot}	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydrodynamiques à grande vitesse
Balourd	$1 \times f_{rot}$	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	$1, 2, 3, 4 \times f_{rot}$	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures orthogonales
Défaut d'alignement	$2 \times f_{rot}$	Axiale et radiale	Vibration axiale est en général plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	$1, 2, 3, 4 \times 50 \text{ Hz}$	Axiale et radiale	Vibration disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite
Courroie en mauvais état	$1, 2, 3, 4 \times f_p$	Radiale	
Engrenage endommagé	Fréquence d'engrènement : $F_c = z \times f_{rot \text{ arbre}}$	Radiale et axiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement. Aide possible par analyse du « cepstre »
Faux-rond d'un pignon	$F_e \pm f_{rot \text{ pignon}}$	Radiale et axiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement dues au faux-rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Radiale et axiale	
Détérioration des roulements	Hautes fréquences	Radiale et axiale	Ondes de choc dues aux écaillages. Aide possible par « détection d'enveloppe »

VI- ELABORATION D'UNE BASE DE DONNEES

VI-1 IMPORTANCE DE L'INFORMATISATION DE LA FONCTION

MAINTENANCE

L'introduction de l'outil informatique dans les différentes fonctions de production de l'entreprise a débuté très lentement mais n'a pris de l'ampleur qu'à partir des années 80, cela en raison des changements intervenus dans l'environnement social, économique et technique dans les entreprises industrielles, et plus particulièrement dans l'industrie aéronautique.

La généralisation de l'informatique et surtout de la notion de temps réel a fait que n'importe quelle règle de gestion est applicable sans défaillance. De plus, moyennant des coûts très faibles, il est possible de procéder à des calculs longs, complexes et fréquents qu'il n'est pas rentable de faire manuellement, sans compter bien sûr les erreurs de manipulation.

La fonction maintenance à l'instar des autres fonctions de l'entreprise doit être informatisée, pour réaliser ses missions et atteindre ses objectifs dans les plus brefs délais.

Cette informatisation passe par l'automatisation de tous les documents de maintenance, par l'introduction des outils de la maintenance assistée par ordinateur (MAO), et par l'élaboration de bases de données pour permettre :

- Un accès rapide aux informations ;
- Un suivi efficace et permanent des stocks ;
- Un allègement du travail des gestionnaires ;
- Une diminution des pertes de temps dues aux travaux manuels...

VI-2 SYSTEME DE GESTION DE BASE DE DONNEES ACCESS

Travailler avec des bases de données et des objets de base de données est une tâche impressionnante. Une base de données est une collection d'informations relatives à un sujet ou un objectif particulier, tels que le suivi des commandes ou la gestion d'une collection. Pour des raisons de convivialité d'utilisation, le logiciel Microsoft Access sous Windows, a été choisi comme utilitaire de conception de la base de données.

Avec Microsoft Access, on peut gérer toutes les informations à partir d'un seul fichier de base de données. Au sein de ce fichier, on peut utiliser :

- Des tables pour stocker les données ;

- Des requêtes pour rechercher et extraire les données dont on a besoin uniquement ;
- Des formulaires pour afficher, ajouter et mettre à jour des données dans des tables ;
- Des états pour analyser ou imprimer des données dans une configuration spécifique ;
- Des pages d'accès aux données pour afficher, mettre à jour ou analyser les données de la base de données à partir d'Internet ou d'un intranet.

VI-3 ELEMENTS D'UNE BASE DE DONNEES ACCESS

L'ensemble des informations est enregistré et manipulé par les objets de la base de données qui sont :

Tables et relations

Pour stocker les données, on crée une table pour chaque type d'information qu'on veut suivre. Pour rassembler les données de plusieurs tables dans une requête, un formulaire, un état ou une page d'accès aux données, on définit des relations entre les tables ;

Requêtes

Pour ne rechercher et n'extraire que les données réunissant les conditions qu'on veut spécifier, notamment des données de plusieurs tables, on crée une requête. Une requête peut également mettre à jour ou supprimer plusieurs enregistrements simultanément, et effectuer des calculs prédéfinis ou personnalisés sur les données ;

Formulaires

Pour afficher, saisir et modifier aisément des données directement dans une table, on crée un formulaire. Lorsque on ouvre un formulaire, Microsoft Access extrait les données d'une ou plusieurs tables, puis les affiche à l'écran avec la disposition qu'on veut avoir choisie dans l'Assistant Formulaire, ou une disposition qu'on crée de toutes pièces ;

Etats

Pour analyser les données ou les présenter d'une certaine manière à l'impression, on crée un état. Par exemple, on peut imprimer un état qui regroupe des données et calcule des totaux, et un autre contenant diverses données mises en forme pour l'impression d'étiquettes de publipostage ;

Macros :

Les macros sont des ensembles d'actions que peut créer pour automatiser des tâches courantes. En utilisant des groupes de macros, on peut effectuer plusieurs tâches en une seule fois ;

Modules :

Un module est principalement une collection de déclarations, d'instructions et de procédures stockées ensemble sous un même nom, pour organiser un code Microsoft Visual Basic. Microsoft Access a deux types de modules : les modules standard et les modules de classe.

VI-4 PRESENTATION DE SGS-OM

La base de données élaborée contient toutes les informations qu'on peut trouver dans les documents permanents et semi permanents, en plus des documents liés aux nouvelles techniques de la maintenance prédictive.

4-1 LISTE DES TABLES

1- Caractéristiques du matériel aéronautique

- Aéronef ;
- Moteur ;
- Systèmes ;
- Caractéristiques principales de l'aéronef ;
- Caractéristiques principales du moteur.

2- Contrôle des opérations de vol

- Renseignements généraux ;
- Contrôle de l'activité aérienne ;
- Contrôle des opérations d'entretien et de remise en état ;
- Contrôle des pleins ;
- Remarques du pilote ou du chef de piste.

3-Contrôle des opérations de maintenance

- Rapports techniques ;
- Demande et contrôle des opérations d'entretien et de remise en état
 - Renseignements généraux ;
 - Echanges équipements ;

- Travaux effectués.

4- Technique d'analyse des huiles

- Fiche de prélèvement d'huile ;
- Fiche d'analyse physico-chimique ;
- Fiche d'analyse spectrométrique d'huile ;
- Fiche d'interprétation des analyses physico-chimiques des huiles ;
- Fiche d'interprétation des analyses spectrométriques des huiles.

5-Technique d'analyse vibratoire

- Fiche de contrôle vibratoire ;
- Fiche d'interprétation d'analyse vibratoire.

6-Technique de contrôle endoscopique

- Fiche de contrôle par endoscopie ;
- Fiche d'interprétation de contrôle endoscopique.

7-Technique de contrôle thermographique

- Fiche de contrôle thermographique ;
- Fiche d'interprétation d'analyse thermographique.

8-Technique de surveillance des tendances des performances moteur

- Fiche de contrôle des opérations de vol ;
- Fiche de performance moteur ;
- Fiche de surveillance des paramètres de vol.

4-2 LISTE DES FORMULAIRES

1-Caractéristiques du matériel aéronautique

- Aéronef ;
- Moteur ;
- Systèmes ;
- Caractéristiques principales de l'aéronef ;
- Caractéristiques principales du moteur .

2-Contrôle des opérations de vol

- Renseignements généraux ;
- Contrôle de l'activité aérienne ;
- Contrôle des opérations d'entretien et de remise en état ;
- Contrôle des pleins ;
- Remarques du pilote ou du chef de piste.

3-Contrôle des opérations de maintenance

- Rapports techniques ;
- Demande et contrôle des opérations d'entretien et de remise en état
 - Renseignements généraux ;
 - Echanges équipements ;
 - Travaux effectués.

4-Technique d'analyse des huiles

- Fiche de prélèvement d'huile ;
- Fiche d'analyse physico-chimique ;
- Fiche d'analyse spectrométrique d'huile ;
- Fiche d'interprétation des analyses physico-chimiques des huiles ;
- Fiche d'interprétation des analyses spectrométriques des huiles.

5-Technique d'analyse vibratoire

- Fiche de contrôle vibratoire ;
- Fiche d'interprétation d'analyse vibratoire.

6-Technique de contrôle endoscopique

- Fiche de contrôle par endoscopie ;
- Fiche d'interprétation de contrôle endoscopique.

7-Technique de contrôle thermographique

- Fiche de contrôle thermographique
- Fiche d'interprétation d'analyse thermographique

8-Technique de surveillance des tendances des performances moteur

- Fiche de contrôle des opérations de vol
- Fiche de performance moteur
- Fiche de surveillance des paramètres de vol

9-Les concepts

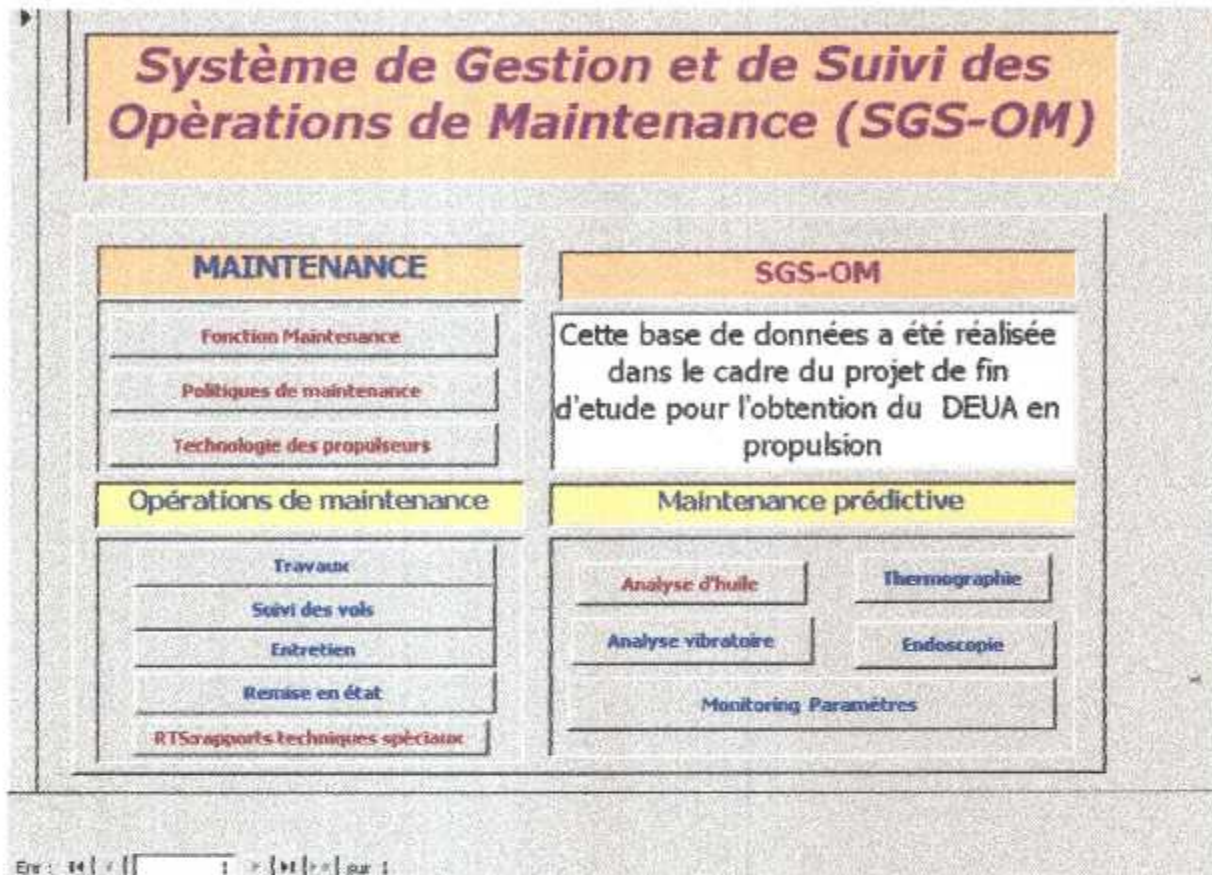
- La fonction maintenance
- Les politiques maintenance
- La technologie des propulseurs

10- Menus

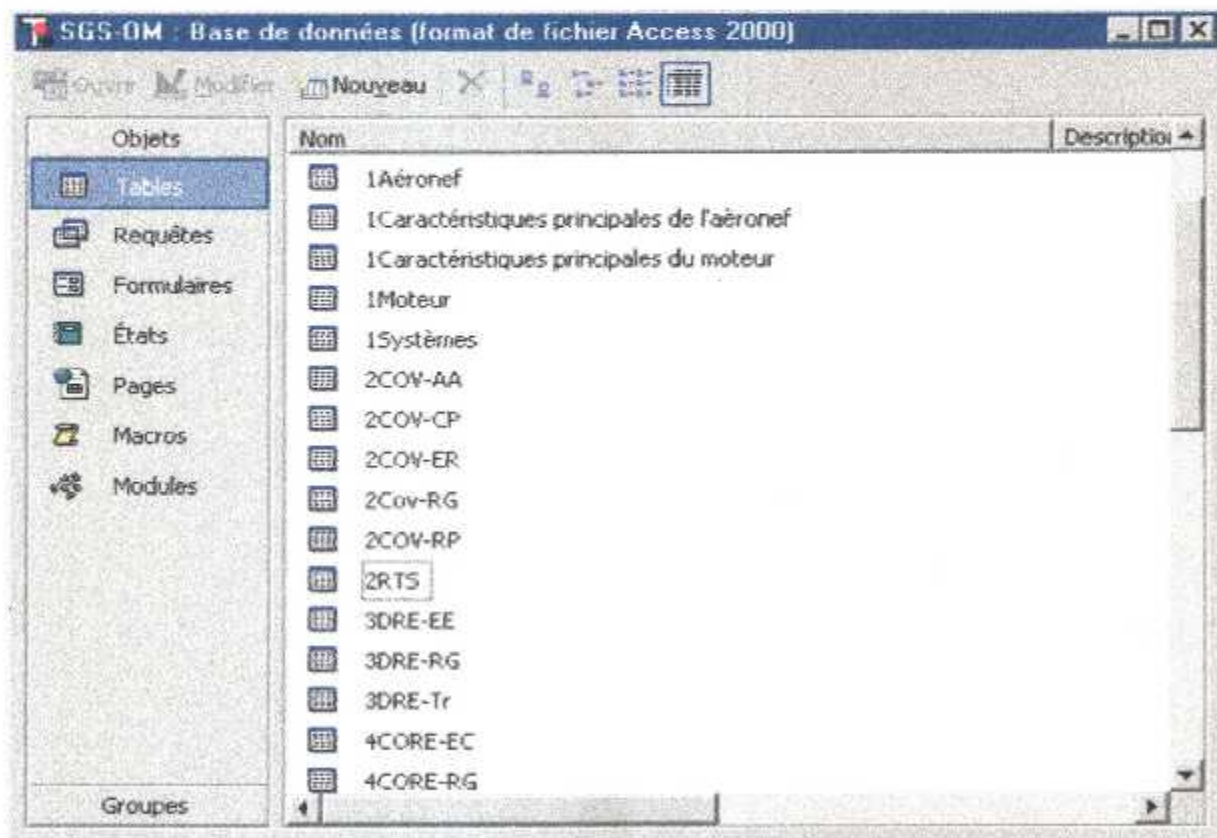
- Menu démarrage

The image shows a presentation slide with a header containing the text 'MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE', 'UNIVERSITE DE BLIDA', and 'INSTITUT AERONAUTIQUE'. The main content features a photograph of a cutaway aircraft engine. Below the photo, the title 'Optimisation d'un programme de maintenance d'une turbomachine aéronautique par les techniques de detection des défaillances' is written in orange. At the bottom, it says 'Réalisée par: BALEH Yasmina' and includes an 'Ouvrir' button. A footer at the very bottom indicates 'Ecr: 14 / 1' and '1 sur 1'.

- Menu principal

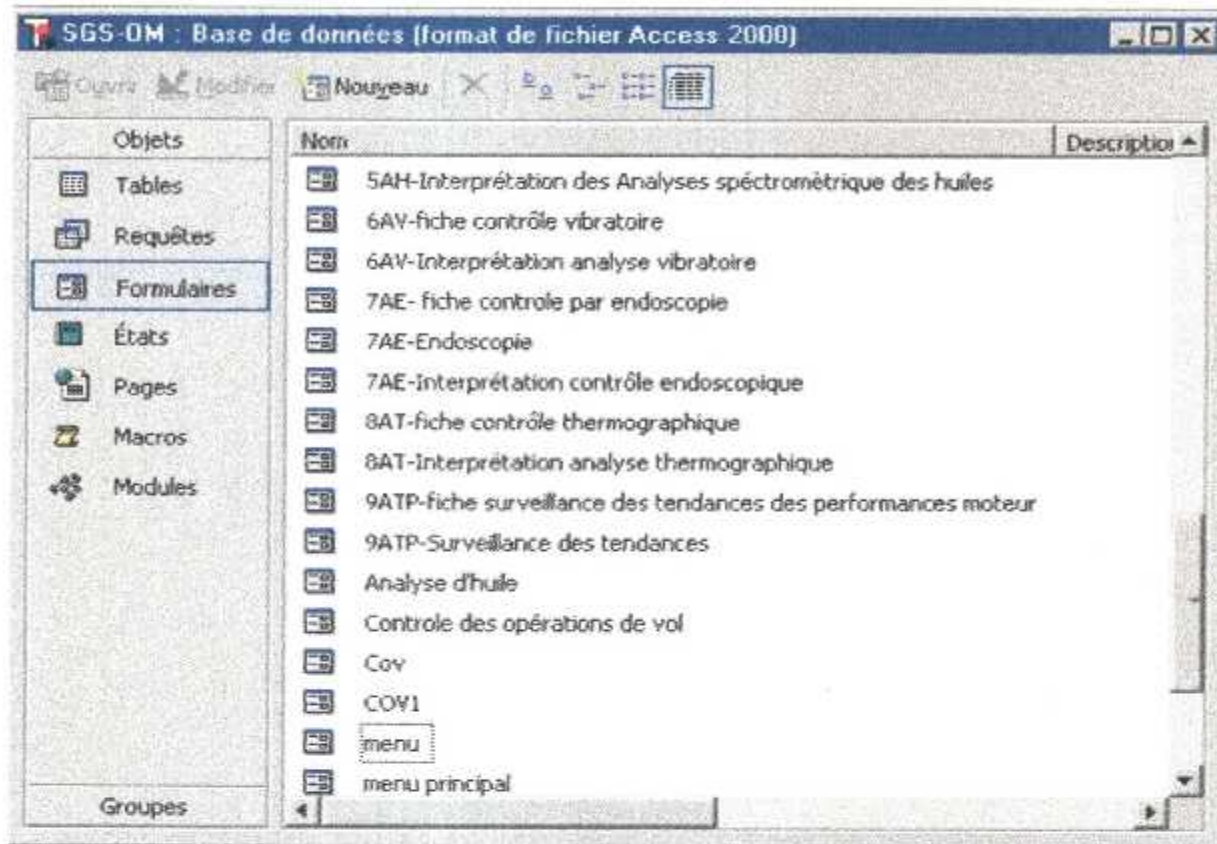


- Fenêtre base de données (**Tables**)



- Fenêtre base de données (**Formulaires**)

- Fenêtre base de données (**Formulaires**)



VII- CONCLUSION

De l'étude effectuée dans le cadre du projet « optimisation d'un programme de maintenance d'une turbomachine aéronautique par les techniques de détection et diagnostique des défaillances », nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Ce travail représente une contribution à l'amélioration de la fonction maintenance et à l'augmentation de la disponibilité et de la durée de vie des turbomachines aéronautiques, par l'introduction des techniques modernes de détection et de diagnostique des défaillances, et par l'informatisation de la fonction maintenance et l'élaboration d'un système de gestion et de suivi des opérations de maintenance des turbomachines en exploitation ;
- La maintenance tend à devenir un levier majeur de la performance des équipements en évoluant vers l'expertise. Cela est rendu possible grâce aux techniques de la maintenance prédictive dont la finalité est d'éviter les pannes et non de les corriger ;
- Le concept de la maintenance prédictive se distingue des autres concepts par son aptitude à améliorer la sécurité et la disponibilité et à diminuer les coûts de maintenance. Mais son introduction ne peut être que progressive et vient en complément aux concepts de maintenance systématique et curative ;
- Nous espérons que ce travail pourra être exploité pour l'amélioration des conditions et des outils de travail dans les services de maintenance, et qu'il sera complété par des études sur l'auto diagnostique des pannes dans les turbomachines aéronautiques.

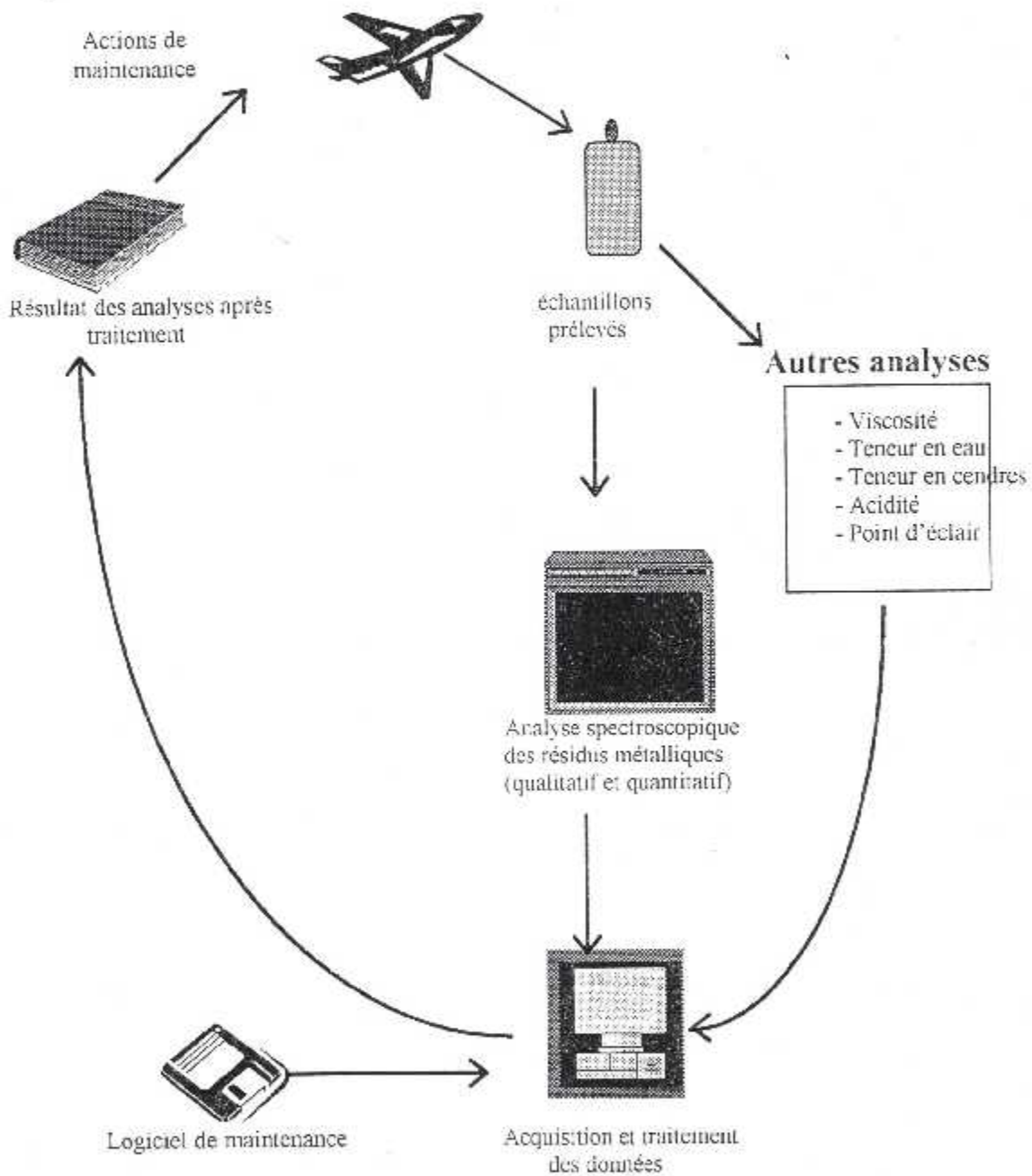
VIII- BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.C. CORDE, P.CASTELLANI, "Essais et mesures dans les turbomachines", 1987.
- [2] T.M. HUNT, "Condition monitoring of mechanical and hydraulic plant", Ed. CHAPMAN & HALL, 1996.
- [3] S. WEBER, "Méthodes de surveillance en continu des réacteurs avionnés CF6/CFM", 1991.
- [4] GROUPE DE REFLEXION ET D'ORIENTATION EN MAINTENANCE, "Réussir sa maintenance", Ed. MARE NOSTRUM, 1996.
- [5] P. PLETSCHACHER, "La maintenance des avions commerciaux en Allemagne", INTERAVIA N° 2, 1985, p. 123-125.
- [6] P. LEPOURRY, R.CIRYCI, "Propulseurs Aéronautiques", Ed. Cépaduès, 1991.
- [7] A. BOULENGER, C. PACHAUD, "Surveillance des machines par analyse des vibrations", Ed. AFNOR, 1998.
- [8] LEHMANN, LEPOURRY, "le turbopropulseur", 1981.
- [9] LEHMANN, LEPOURRY, "le turboréacteur", 1975.
- [10] B. MAAMAR, "Les opérations de maintenance programmées et non programmées du réacteur GE CF6-80_A3", Mémoire de fin d'étude.
- [11] C. KHICHANE, "Microsoft ACCESS 2000 pratique", Ed. EL MAARIFA, 2000
- [12] A. OPPENAHIM, "théorie générale des machines", Ed. MASSON, 1989.
- [13] "Les turbines à gaz". GROUPE LABINAL, Division TURBOMECA, 1993.
- [14] H. COHEN, "Gas Turbine Theory", Ed LONGMAN, 1996

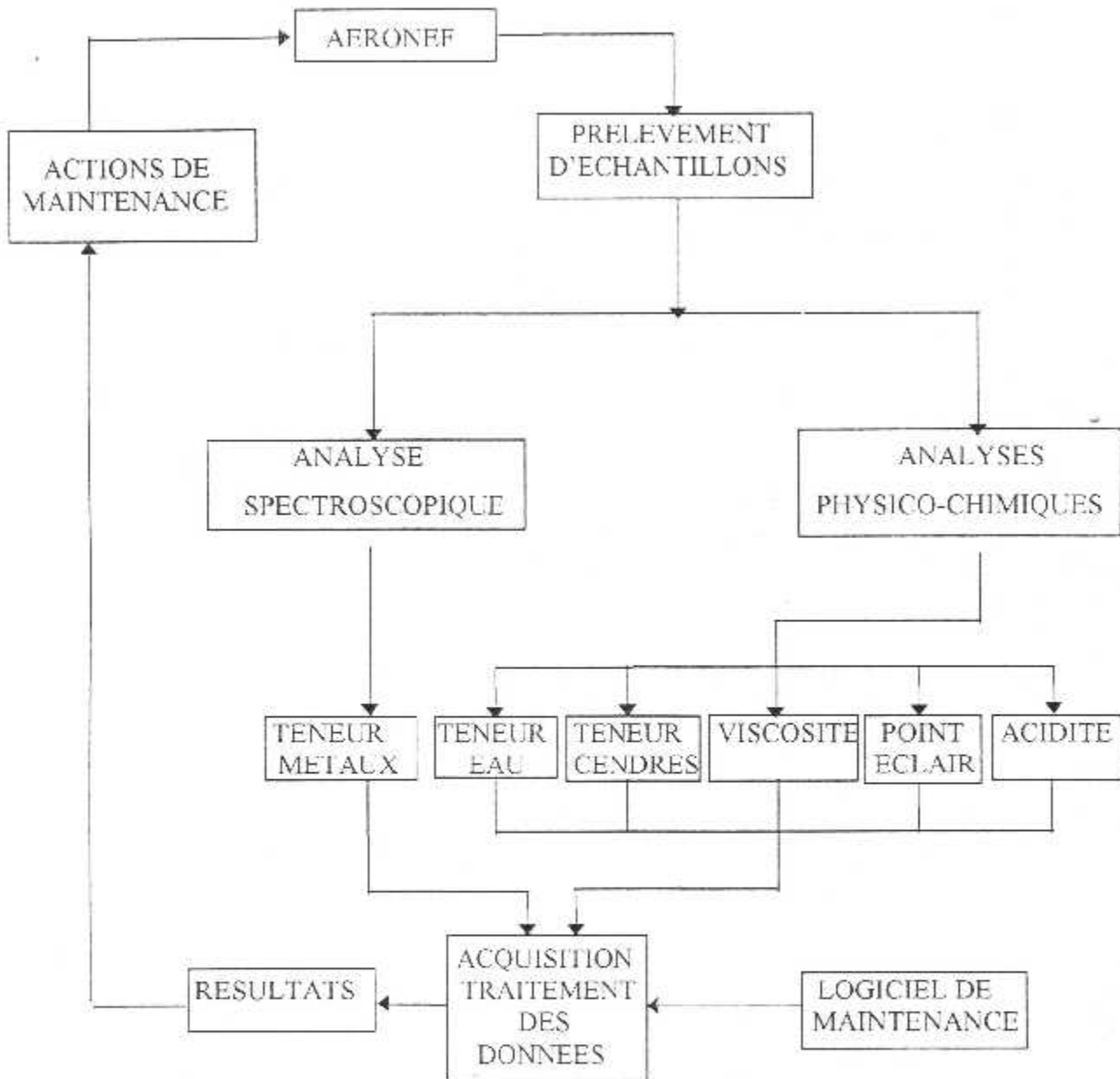
IX- ANNEXE

**PROCEDURES ET FICHES DE CONTROLE ET D'ANALYSE
DES TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE**

ANALYSE DES HUILES MOTEUR



PROCEDURES DE L'ANALYSE D'HUILE



FICHE DE PRELEVEMENT D'HUILE

MATERIEL		PRELEVEMENT	
Aéronef		Numéro de prélèvement	
Numéro de bord			
Désignation			
Type		Date de prélèvement	
Numéro de série			
Ressource alloué			
Totale d'heure de fonctionnement depuis sa mise en exploitation		Quantité de prélèvement	
Nombre RG			
Date de la dernière réparation			
Ressource de la dernière réparation		Prélèvement effectué par	
Totale d'heure après la dernière réparation			
HUILE			
Type d'huile			
Durée d'utilisation depuis le dernier vidange			
Durée d'utilisation d'huile depuis le dernier prélèvement			
Date de remplissage			
Quantité de remplissage			

FICHE D'ANALYSE PHYSCO-CHIMIQUE D'HUILE

MODULE		ANALYSE	
Aéronef		Numéro de prélèvement	
Numéro de bord		Numéro d'analyse	
Désignation		Date d'analyse	
Type		Matériel d'analyse	
Numéro de série		Lieu d'analyse	
Type d'huile			

TENEUR

Caractéristique	Couleur	Densité	Viscosité cinématique	Acidité	Point d'éclair	Teneur en eau	Résidu de carbone
Référence							
Résultat							
Ecart							
Effectué par							
Date							

**FICHE D'INTERPRETATION
DU CONTROLE PHYSCO- CHIMIQUE**

Aéronef		Numéro de bord	
Désignation		Numéro de série	
Type		Numéro de contrôle	

OBSERVATIONS

CAUSES PROBABLES

REMEDES

Signé par :

Le :

**FICHE D'INTERPRETATION
DU CONTROLE SPECTROMETRIQUE DES HUILES**

Aéronef		Numéro de bord	
Désignation		Numéro de série	
Type		Numéro de contrôle	

OBSERVATIONS

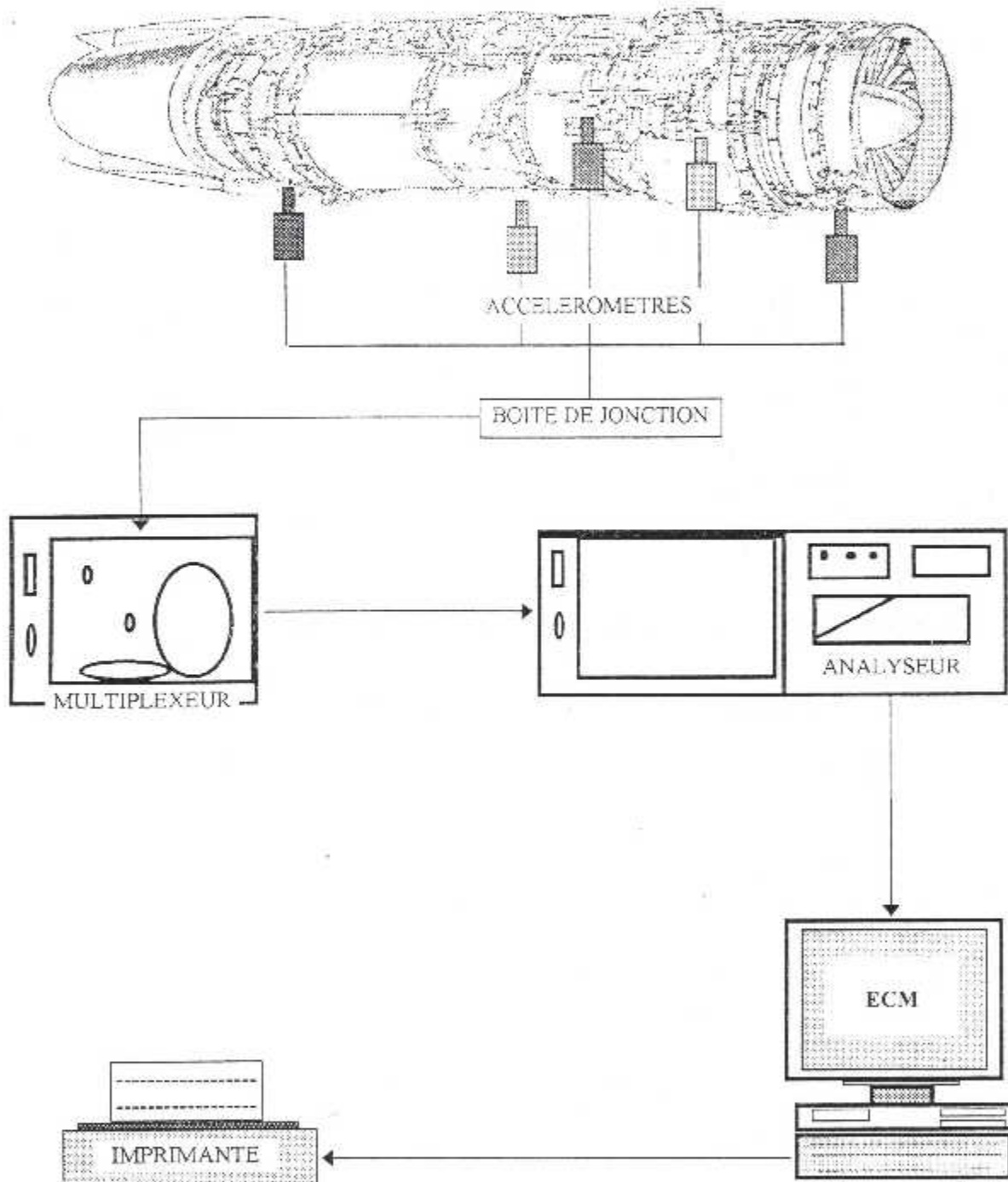
CAUSES PROBABLES

REMEDES

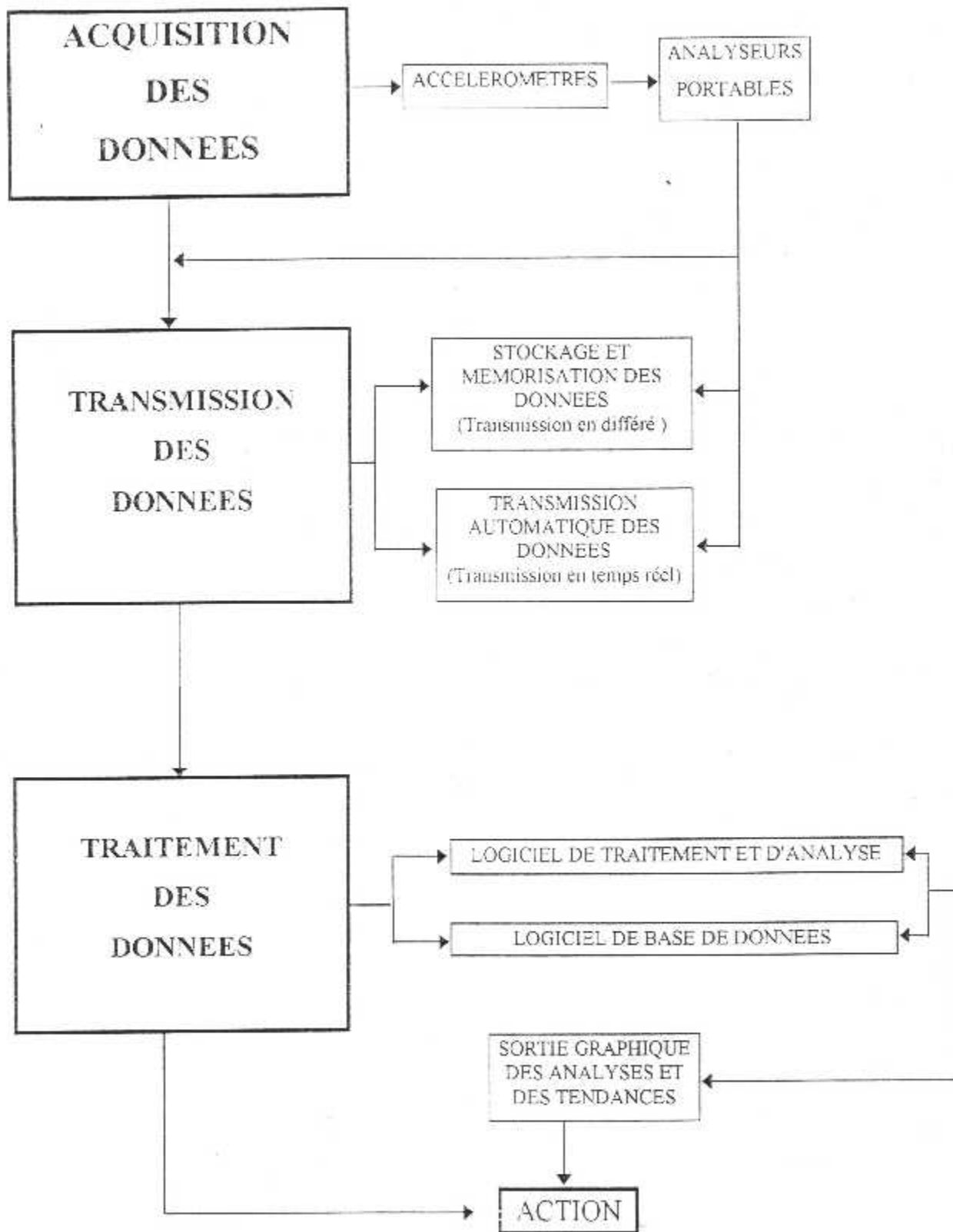
Signé par :

Le :

ANALYSE DES VIBRATIONS MOTEUR



PROCEDURES DE L'ANALYSE VIBRATOIRE



FICHE CONTROLE VIBRATOIRE

<i>Numéro de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Date de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Matériel de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Contrôle effectué par</i>	<input type="text"/>
<i>Aéronef</i>	<input type="text"/>
<i>Numéro de bord</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation</i>	<input type="text"/>
<i>Type</i>	<input type="text"/>
<i>Numéro de série</i>	<input type="text"/>
<i>Ressource allouée</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre d'heures de fonctionnement depuis sa mise en exploitation</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre RG</i>	<input type="text"/>
<i>Date de la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Ressource de la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre d'heures de fonctionnement après la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 1er point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle1</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée1</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence1</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 2ème point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle2</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée2</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence2</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 3ème point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle3</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée3</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence3</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 4ème point de mesure</i>	<input type="text"/>

**FICHE D'INTERPRETATION
DU CONTROLE VIBRATOIRE**

Aéronef		Numéro de bord	
Désignation		Numéro de série	
Type		Numéro de contrôle	

OBSERVATIONS

CAUSES PROBABLES

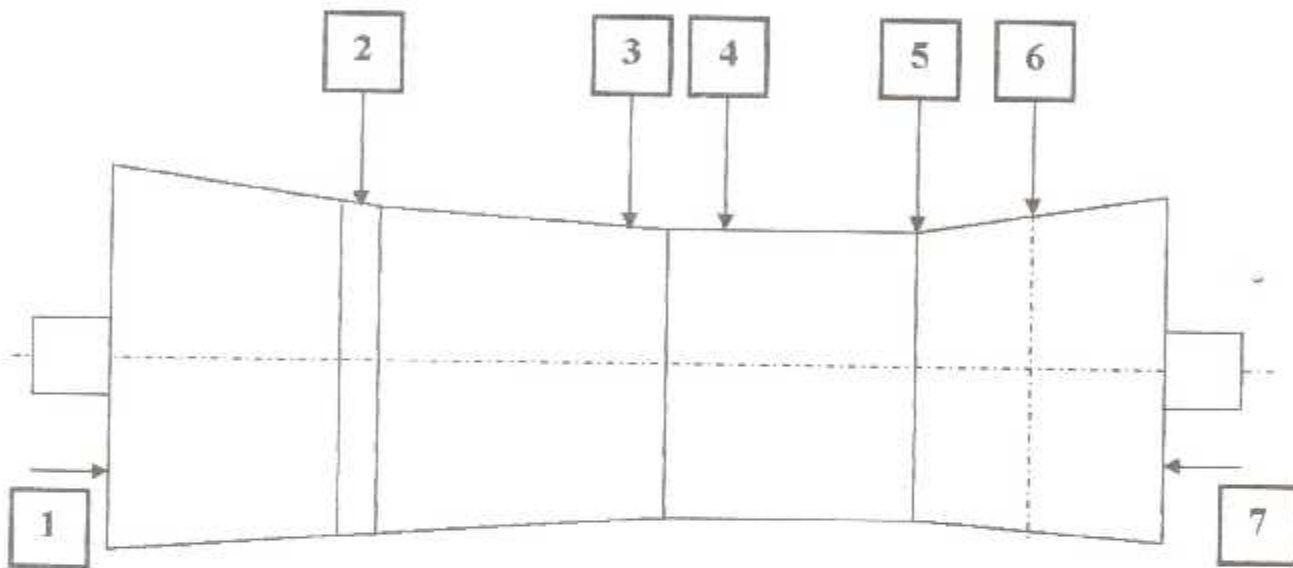
REMEDES

Signé par :

Le :

CONTROLE ENDOSCOPIQUE

1 TURBOPROPULSEUR

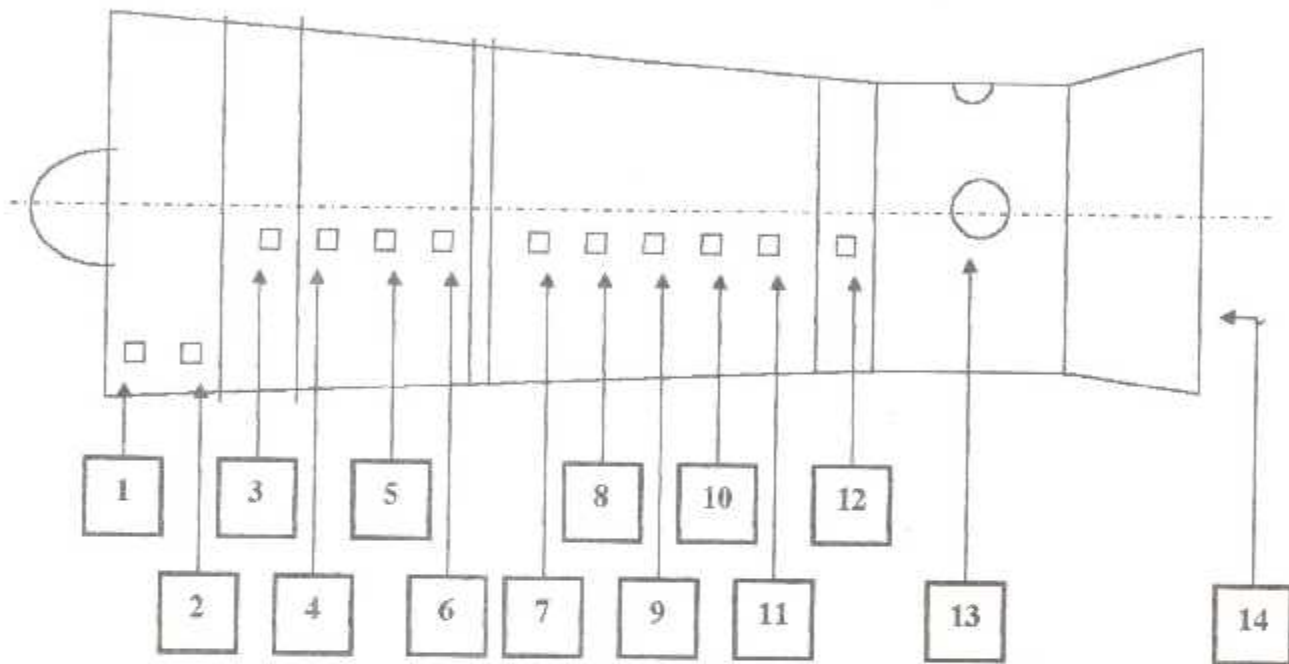


Dessin du moteur avec ports d'accès

- 1: Entrée d'air
- 2: Orifice de décharge
- 3: Port boroscope
- 4: Port allumeur
- 5: Position T/C
- 6: Port boroscope
- 7: Echappement

CONTROLE ENDOSCOPIQUE

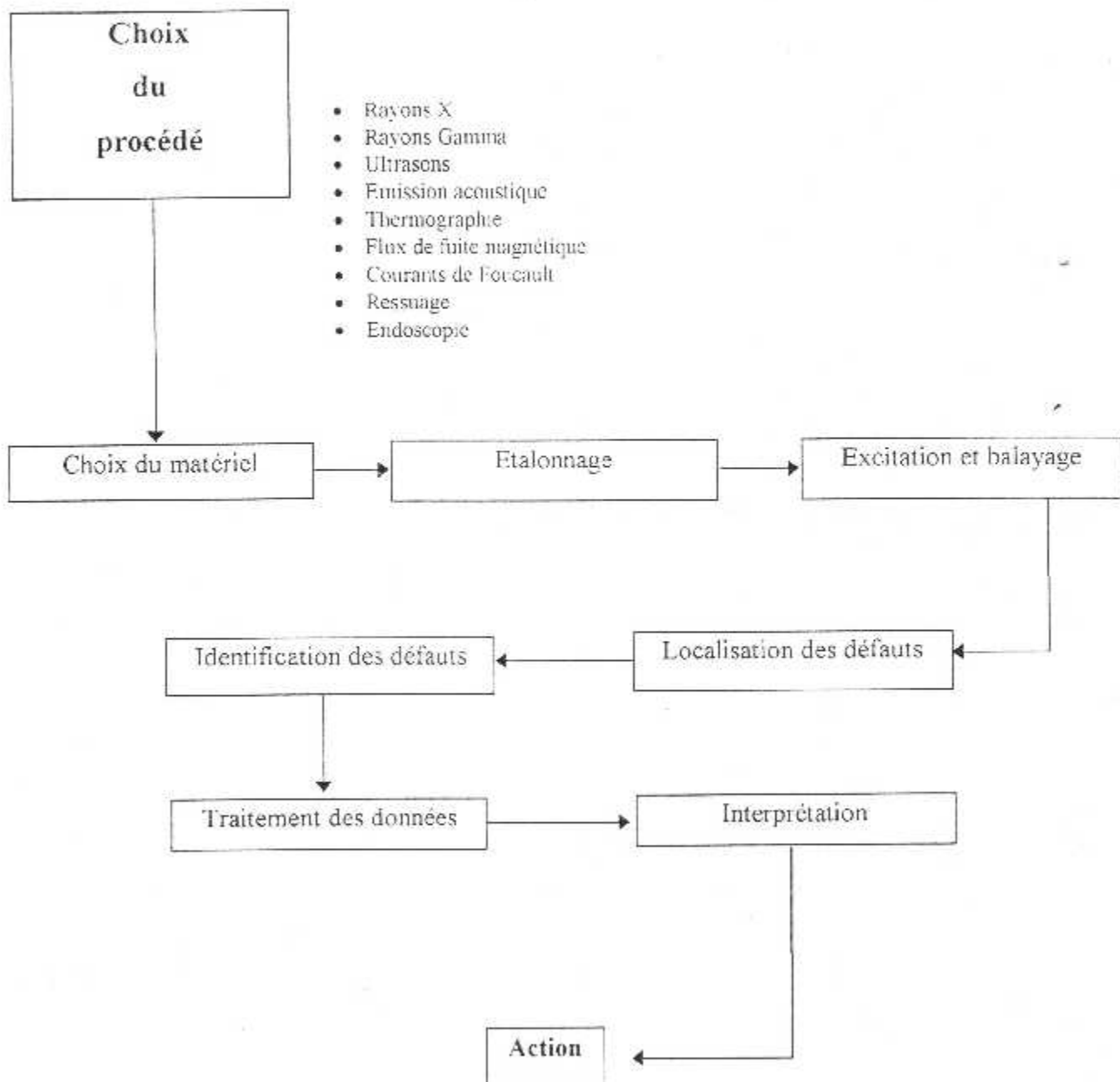
2- TURBOREACTEUR



Dessin du moteur avec ports d'accès

- 1 : Trou de boroscope
- 2 : Trou de boroscope
- 3 : Trou de boroscope
- 4 : Trou de boroscope
- 5 : Trou de boroscope
- 6 : Trou de boroscope
- 7 : Trou de boroscope
- 8 : Trou de boroscope
- 9 : Trou de boroscope
- 10 : Trou de boroscope
- 11 : Trou de boroscope
- 12 : Trou de boroscope
- 13 : Les trous d'entrée de la chambre de combustion
- 14 : Le plenum d'échappement

PROCEDURES DU CONTROLE NON-DESTRUCTIF



FICHE DE CONTROLE PAR ENDOSCOPIE

MATERIEL		CONTROLE			
Aéronef		Numéro de contrôle			
Numéro de bord					
Désignation					
Type		Date de contrôle			
Numéro de série					
Ressource alloué					
Totale d'heure de fonctionnement depuis sa mise en exploitation		Matériel de contrôle			
Nombre RG					
Date de la dernière réparation					
Ressource de la dernière réparation		Contrôle effectué par			
Totale d'heure après la dernière réparation					
RESULTATS DU CONTROLE					
Elément	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
Désignation					
Défaut constaté					
Dimension					
Localisation					
Référence					

**FICHE D'INTERPRETATION
DU CONTROLE ENDOSCOPIQUE**

Aéronef		Numéro de bord	
Désignation		Numéro de série	
Type		Numéro de contrôle	

OBSERVATIONS

CAUSES PROBABLES

REMEDES

Signé par :

Le :

FICHE CONTROLE THERMOGRAPHIQUE

<i>Numéro de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Date de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Matériel de contrôle</i>	<input type="text"/>
<i>Contrôle effectué par</i>	<input type="text"/>
<i>Aéronef</i>	<input type="text"/>
<i>Numéro de bord</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation</i>	<input type="text"/>
<i>Type</i>	<input type="text"/>
<i>Numéro de série</i>	<input type="text"/>
<i>Ressource allouée</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre d'heures de fonctionnement depuis sa mise en exploitation</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre RG</i>	<input type="text"/>
<i>Date de la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Ressource de la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Nombre d'heures de fonctionnement après la dernière réparation</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 1er point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle1</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée1</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence1</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 2ème point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle2</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée2</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence2</i>	<input type="text"/>
<i>Désignation du 3ème point de mesure</i>	<input type="text"/>
<i>Paramètre de contrôle3</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur mesurée3</i>	<input type="text"/>
<i>Valeur de référence3</i>	<input type="text"/>

Désignation du 4ème point de mesure

Paramètre de contrôle4

Valeur mesurée4

Valeur de référence4

Désignation du 5ème point de mesure

Paramètre de contrôle5

Valeur mesurée5

Valeur de référence5

Désignation du 6ème point de mesure

Paramètre de contrôle6

Valeur mesurée6

Valeur de référence6

Emissivité

Distance du sujet (m)

Température d'environnement (°C)

**FICHE D'INTERPRETATION
DU CONTROLE THERMOGRAPHIQUE**

Aéronef		Numéro de bord	
Désignation		Numéro de série	
Type		Numéro de contrôle	

OBSERVATIONS

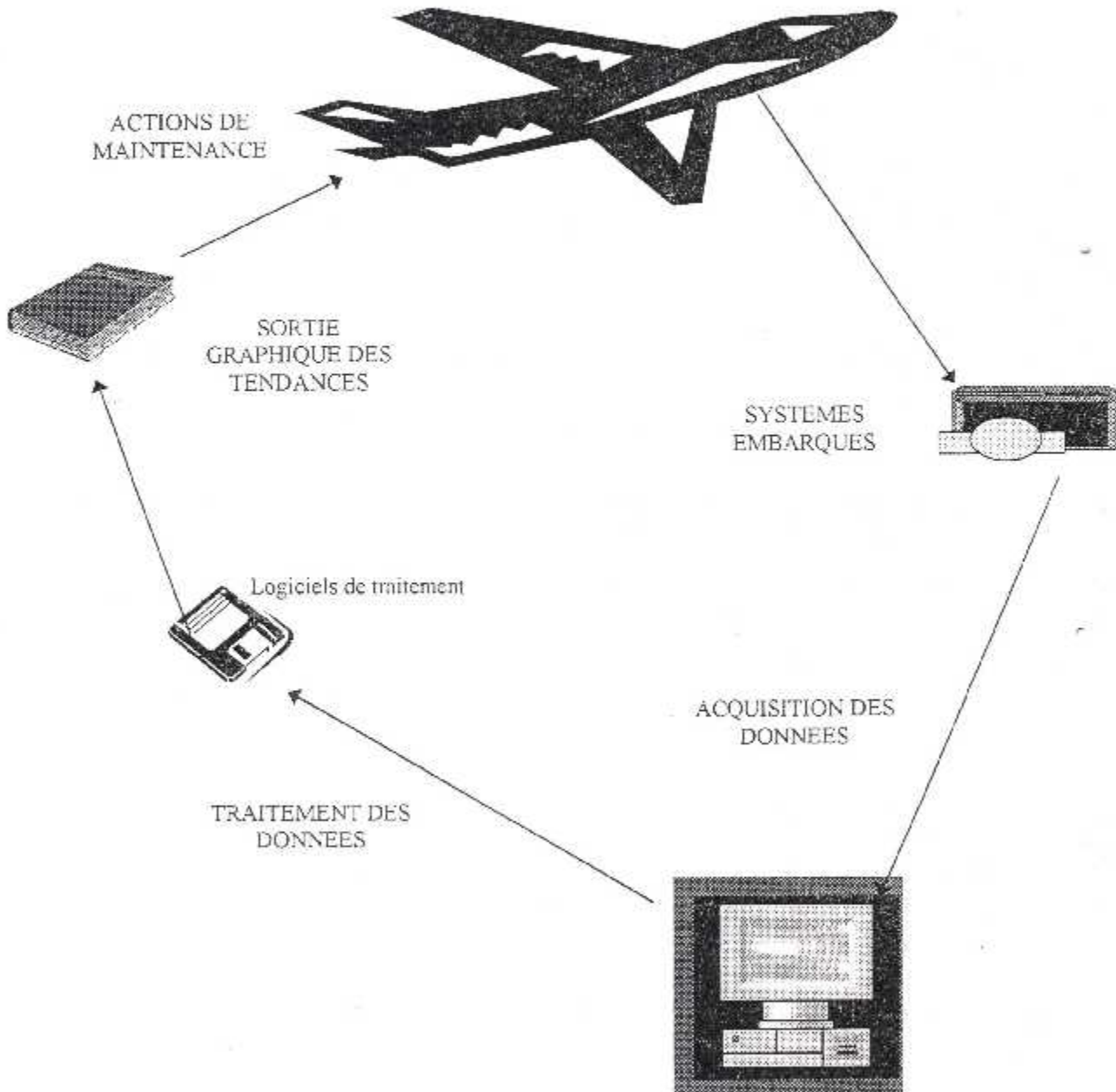
CAUSES PROBABLES

REMEDES

Signé par :

Le :

MONITORING DES PARAMETRES MOTEUR



PROCEDURES DU MONITORING DES PARAMETRES

