

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue d'obtenir
Le diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Thème

Conception d'un logiciel
d'aide à la maintenance
base sur la fiabilité

Présenté par :

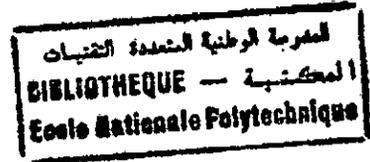
Mr. A. K HADJAMMAR
+
Abderrahmane Kaïs

Proposé par :

Mr. M. BENBRAIKLA

* Promotion 1997 / 1998 *

Ecole Nationale Polytechnique, B.P 182 16200 El-Harrach - Alger.



REMERCIEMENTS

Mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu dans l'accomplissement de mon travail.

A mes parents, à mon cousin Halim qui a grandement contribué à la réalisation du travail, à mon amie Schahéra qui a assuré la saisie du document, à M^r Ouabdesselam qui m'a fait l'honneur de siéger en tant que jury ainsi qu'à mon promoteur M^r Benbraïka pour l'originalité du sujet proposé.

Dédicace

A ceux qui chaque jour payent dans leur chair la bêtise humaine.

A ceux qui souffrent en silence.

A ceux qui dans l'adversité restent debout.

A ceux qui chaque jour se réveillent dans un monde de ténèbres, et croient en un lendemain ensoleillé.

A ceux qui croient encore en ce pays.

A ceux qui chaque jour refusent la médiocrité.

Aux femmes, aux hommes.

A ceux qui me sont chers.

Je dédie ce travail.

A. K. Hadjammam



Résumé :

Notre travail a essentiellement porté sur la maintenance et ses différentes techniques, notamment la fiabilité et le renouvellement des équipements, sur les bases desquels un logiciel de calcul a été développé.

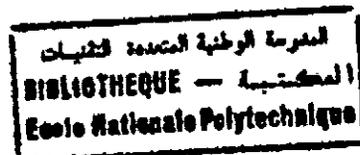
Abstract :

This work is mainly based on maintenance and various techniques, in particular reliability and equipments renewel on which a program has been developed.

ملخص :

استهدف عملنا هذا، إنجاز بحث حول صيانة وحفظ العتاد الصناعي، حيث تطرقتنا إلى مختلف التقنيات المستعملة في هذا الميدان، وذلك أساساً من فئة التقنيات (العوال والقواعد الرياضية لتجبير العتاد)، ثم إنجاز أداة حساب عن طريق الإلحاح الوهمي.

SOMMAIRE



| | |
|--|----|
| <i>Introduction générale</i> | 1 |
| <i>Chapitre 1 : Définitions, Principes et Terminologie</i> | 3 |
| 1. Définitions..... | 3 |
| 2. Définition et classification des défaillances..... | 10 |
| <i>Chapitre 2 : Mécanisme de Ruine des Matériels</i> | 14 |
| 1. Introduction..... | 14 |
| 2. Modes de rupture..... | 14 |
| 3. Ruine des matériels par fatigue..... | 15 |
| 4. Ruine des matériels par abrasion..... | 16 |
| 5. Ruine des matériels par cavitation..... | 17 |
| 6. Ruine des matériels par érosion par gouttelettes liquides..... | 17 |
| 7. Ruine par fluage..... | 18 |
| 8. Ruine par relaxation..... | 18 |
| 9. Ruine par corrosion..... | 18 |
| 10. Ruine par corrosion - érosion..... | 20 |
| 11. Mécanisme de ruine induit par la conception..... | 21 |
| 12. Mécanisme d'usure du aux frottements et aux contacts..... | 23 |
| 13. Vieillessement..... | 24 |
| <i>Chapitre 3 : Surveillance en Exploitation</i> | 25 |
| 1. Introduction..... | 25 |
| 2. Signatures vibratoires..... | 25 |
| 3. Signatures par analyse des lubrifiants..... | .. |
| 4. Signatures acoustiques..... | .. |
| 5. Signatures par émission acoustique..... | 47 |
| 6. Signatures ultrasonores..... | .. |
| 7. Signatures par courant de Foucault..... | .. |
| 8. Signatures thermiques..... | .. |
| 9. Signatures radiographiques, gammagraphiques et neutrographiques ... | .. |
| 10. Signatures temporelles..... | .. |
| 11. Signatures diverses..... | .. |

St

Chapitre 4 : Bases Mathématiques de la Maintenance.....

| | |
|---|----|
| 1. Introduction..... | 52 |
| 2. Maintenance et fiabilité..... | 52 |
| 3. Principales lois de défaillance des matériels..... | 56 |
| 4. Tests d'adéquation..... | 66 |
| 5. Fiabilité des systèmes..... | 68 |
| 6. La maintenance et la maintenabilité..... | 71 |
| 7. Renouvellement des équipements..... | 75 |
| 8. Banque de données fiabilité / maintenance..... | 79 |

Deuxième partie..... 81

Chapitre 5 : Présentation de l'Application Weibull 82

| | |
|---|----|
| 1. Introduction..... | 82 |
| 2. Présentation générale du programme Weibull | 83 |
| 3. Option de visualisation..... | 83 |
| 3.1 Fiabilité..... | 83 |
| 3.2 Renouvellement..... | 84 |
| 3.3 Stratégie de renouvellement..... | 84 |
| 3.4 Adéquation..... | 86 |
| 3.5 Lecture des données..... | 86 |
| 3.6 Option de calcul..... | 86 |
| 4. Tests..... | 88 |

Chapitre 6 : Mise en œuvre du Logiciel..... 90

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction..... | 90 |
| 2. Estimation des paramètres..... | 90 |
| 3. Tests d'adéquation..... | 91 |
| 4. Calcul du MTBF..... | 97 |
| 5. Probabilité de K renouvellements dans $[0, t]$ | 97 |
| 6. Nombre moyens dans $[0, t]$ | 97 |
| 7. Calcul des coûts de maintenance..... | 97 |
| 8. Discussion et critiques..... | 99 |
| 9. Conclusion..... | 100 |

Conclusion générale..... 103

Bibliographie..... 102

Annexe..... 104

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'âge de pierre, l'homme lutte pour sa survie, chaque jour son instinct le pousse à se « conserver » et à « s'entretenir ». Ceci pour se maintenir en état physique et moral permettant la continuité de la vie. La nourriture, l'activité, le repos et les loisirs en sont quelques expressions.

Cette idée primaire, l'homme l'étendit à ses biens et à ses outils toujours afin de mieux et de plus les conserver. Cette pratique n'a cessé depuis de progresser et de se généraliser pour donner naissance à une discipline qui sera appelée « maintenance ». En effet la maintenance au sens que nous connaissons (voir définition de la maintenance) ne méritant son appellation qu'à partir des années soixante où sous l'impulsion de l'industrie aéronautique et avec le lancement des premières bases scientifiques, elle connut son véritable essor.

Effectivement, la maintenance fût longtemps considérée comme une tâche secondaire de bas niveau, génératrice de dépenses pas toujours immédiatement justifiées. Aujourd'hui avec l'approche systémique de l'entreprise [1], qui est imposée par une production de plus en plus compétitive, la maintenance se retrouve dans toutes les étapes de la production et de l'utilisation du produit. Ainsi, on la voit s'imposer comme une fonction complexe pluridisciplinaire, jouant le rôle d'un vrai poste gain de production.

Plusieurs arguments peuvent être avancés pour justifier la place de la maintenance dans le système économique (le plus probant), parmi ceux-ci est certainement l'action favorable de la maintenance sur le coût global de possession (Life Cycle Cost L.C.C). Le coût global :

- Les Coûts de recherche et de développement
- Les Coûts de conception et de fabrication
- Les Coûts d'exploitation et de maintenance
- Les Coûts de mise en rebut et de déclassement.

Ceci est schématisé par la figure 1.1.

La figure se présente sous la forme d'un iceberg dont la partie visible représente les coûts directs que supporte le client quand il acquiert le produit, tandis que la partie immergée représente la période d'exploitation.

Ceci sans parler des autres bénéfices de la maintenance qui sont souvent inattendus et de portée imprévisible, on citera :

- Installation plus propre (plus de sécurité) et fonctionnement plus simple dans la production.
- Meilleur esprit du personnel et de moins d'incidents.
- Une meilleure prise de décision résultant de données de maintenance plus sûres [2].

Dans les pays en voie de développement là où les capitaux sont limités, la préservation des investissements est d'une importance capitale, conscient de cette nécessité nous avons voulu aborder la maintenance dans le cadre de notre étude.

Nous diviserons notre travail en deux grandes parties.

Dans la première partie, on verra les définitions et les différentes terminologies avec un exposé sur les plus importants mécanismes de ruines des matériels, on enchaînera par un chapitre concernant les techniques de surveillances en exploitation et des techniques authentiques de la maintenance (fiabilité, renouvellement).

La seconde partie sera consacrée à la conception et la mise au point d'un logiciel de calcul de fiabilité et du renouvellement des équipements.

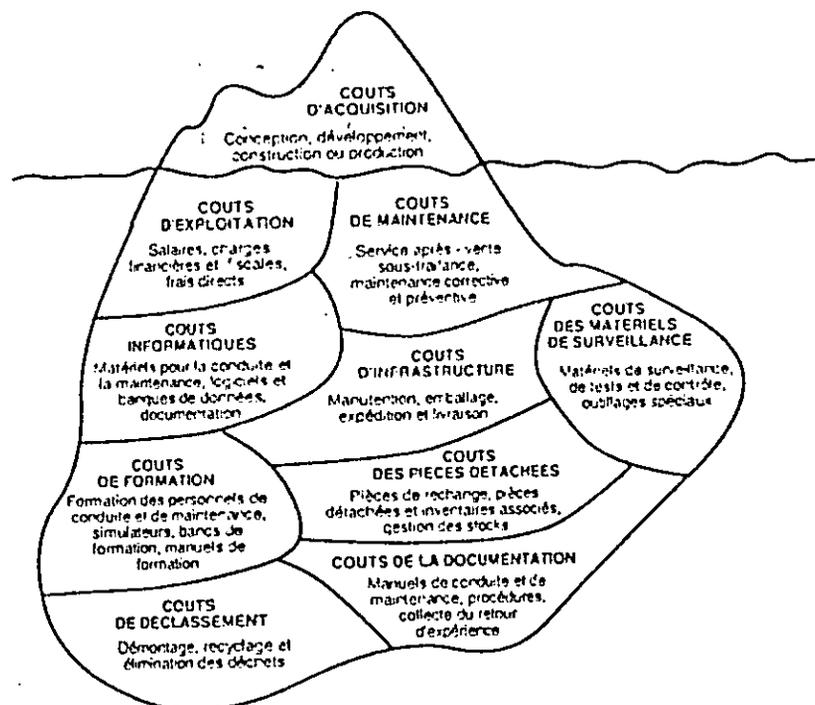


Figure 1.14. Représentation en « iceberg » du coût de possession

Chapitre 1

Définitions, Principes et Terminologie

1. Définitions [1], [3]

On abordera ici le vocabulaire et les définitions qui sont en usage en maintenance.

1.1 Maintenance

La maintenance est définie comme étant toutes les activités destinées à maintenir et à rétablir un bien, dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Les activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management, *ou (surtout optimales)*

1.2 Défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou (ses) fonction(s) requise(s) avec des performances définies dans les spécifications techniques.

1.3 Défaillance potentielle

Lorsque la valeur de défaillance a été fixée pour évaluer la dégradation d'une entité, on définit une autre valeur selon le même critère, en avance de la précédente comme étant «le point de défaillance potentielle». Cette valeur est choisie de telle sorte que si la dégradation ne l'atteint pas, le risque de défaillance avant la prochaine inspection est jugé acceptable. Il n'est donc pas nécessaire d'intervenir avant cette valeur. Ce concept est à la base des techniques modernes de maintenance (conditionnelle ou prévisionnelle).

1.4 Dégradation

Une dégradation est l'état d'une entité présentant:

- Une perte de performances, sans pour autant qu'elles soient inférieures dans les spécifications fonctionnelles, car il n'y aura plus de défaillance.
- Un sous ensemble lui-même dégradé, voire défaillant (sans conséquence fonctionnelle sur l'ensemble).

1.5 Causes de défaillance

Les causes de défaillance sont les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance. Un programme de maintenance efficace exige une maîtrise parfaite des causes de défaillance.

1.6 Modes de défaillance

Ce sont les effets par lesquels la défaillance est observée.

1.7 Taux de défaillance

C'est le nombre de défaillances réellement observées pour une catégorie donnée de composants sur une période donnée de fonctionnement.

1.8 Tâche applicable

Une tâche de maintenance est applicable si elle peut être mise en œuvre de façon pratique.

1.9 Tâche efficace

Une tâche de maintenance est efficace si elle permet de contrôler l'évolution d'une dégradation connue. Elle doit permettre de réduire le taux de défaillance ou de ramener la probabilité de défaillance à un niveau préétabli.

1.10 Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service.

Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usage (maintenance systématique), et /ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

1.10.1 Maintenance préventive systématique:

Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, la totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant.

Elle comprend le remplacement systématique de certains composants critiques en limite d'expiration de leur durée de vie. Le remplacement de composants peu coûteux pour éviter les dépenses d'évaluation de leur état. Ce type de maintenance concerne les composants dont on connaît de façon précise la durée de vie moyenne.

1.10.2 Maintenance préventive conditionnelle:

Ce type de maintenance comprend toutes les tâches de restauration de matériels composants non défaillants entreprises en application d'une évaluation d'état et de comparaison avec un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle).

1.10.3 Maintenance prévisionnelle:

Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

1.10.4 Maintenance proactive:

La maintenance *proactive* est une forme avancée de maintenance prévisionnelle consistant à déterminer les causes initiales des défaillances à partir de l'état de défaillance potentielle.

Elle requiert une très bonne connaissance des mécanismes de ruine des matériels et des relations de cause à effet entre les symptômes externes et leurs causes matérielles. La mise en œuvre de cette maintenance implique l'accumulation d'un retour d'expérience d'excellente qualité.

1.10.5 Maintenance basée sur la fiabilité (MBF):

La maintenance basée sur la fiabilité (Reliability Centered Maintenance) sélectionne des tâches efficaces et applicables de maintenance préventive pour atteindre le niveau de fiabilité requis des fonctions assurées par les matériels en optimisant les coûts de maintenance.

Fondée sur la connaissance des taux de fiabilité des matériels, elle implique une maintenance préventive ou une modification de conception uniquement pour les matériels critiques. La maintenance correctrice est la seule alternative proposée pour les matériels jugés non critiques.

1.11 Tâches de la maintenance préventive:

La classification et le contenu des tâches de maintenance préventive doivent être définies clairement pour identifier les compétences des différents intervenants amenés à réaliser la maintenance des équipements.

- Petit entretien - graissage

Les termes de « *petit entretien - graissage* » sont utilisés principalement dans le cadre de la maintenance basée sur la fiabilité. Les tâches associées consistent à vérifier le niveau des fluides et à réaliser les appoints si nécessaire. Les remplacements de joints de lampes ou de fusibles représentent des exemples d'activités de petit entretien. En principe, ces tâches n'exigent pas l'utilisation d'outillages très spécialisé.

- Contrôle

Vérification de la conformité par rapport à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle non-destructif de fissures dans les tubes des chaudières par courant de *Foucault* représente un exemple de contrôle.

Par abus de langage, on utilise souvent le terme contrôle visuel pour caractériser l'activité de maintenance exécutée pendant les rondes ou l'on constate avec des opérateurs humains (vue, ouïe, touché et odorat) d'éventuelles anomalies sur les matériels.

- Tests opérationnels

Ce terme recouvre les activités visant à assurer que le matériel fonctionne sans pour cela vérifier que les paramètres quantitatifs soient satisfaits.

- Tests fonctionnels

Les activités ont pour objectifs de vérifier que le matériel concerné, remplit sa fonction avec ses caractéristiques associés dans des conditions données d'exploitation.

- Tests pour la recherche de défaillances cachées

En présence des systèmes redondants et en particulier pour les matériels redondants qui ne sont pas actifs, il est impératif de procéder à des essais fonctionnel particuliers qui assurent le bon fonctionnement de ce matériel redondants en cas de panne.

- Surveillance en service (inspection)

Technique qui repose sur l'analyse des variations de paramètres de fonctionnement du matériels, visant à évaluer son état de dégradation pour décider de la nécessité d'une inspection ou d'une réparation préventive afin d'éviter sa défaillance.

- Visite

Opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou d'une partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance de premier niveau (réglages simples).

- Révision

Ensemble des actions d'examens de contrôle et des interventions effectués en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps donné ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

- Modification

Opération à caractère définitif effectuée sur un bien en vue d'en améliorer le fonctionnement ou d'en changer les caractéristiques d'emploi.

- Réparation

Cette activité, ne figurant pas par définition dans les activités de maintenance préventives, est l'ensemble des activités de maintenance correctrice nécessaire à la remise en état sous l'angle fonctionnel des matériels défaillants.

1.12 Maintenance correctrice

L'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au provisoirement. Ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance, son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du fonctionnement.

1.12.1 Maintenance palliative:

Activités de maintenance correctrice destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise, appelée couramment *dépannage*.

La maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

1.12.2 Maintenance curative:

Activité de maintenance correctrice ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s).

Le coût engendré et le caractère des restaurations déterminent le type de maintenance à exercer, ceci sera exposé avec plus de détails dans la suite de notre travail (chapitre 4).

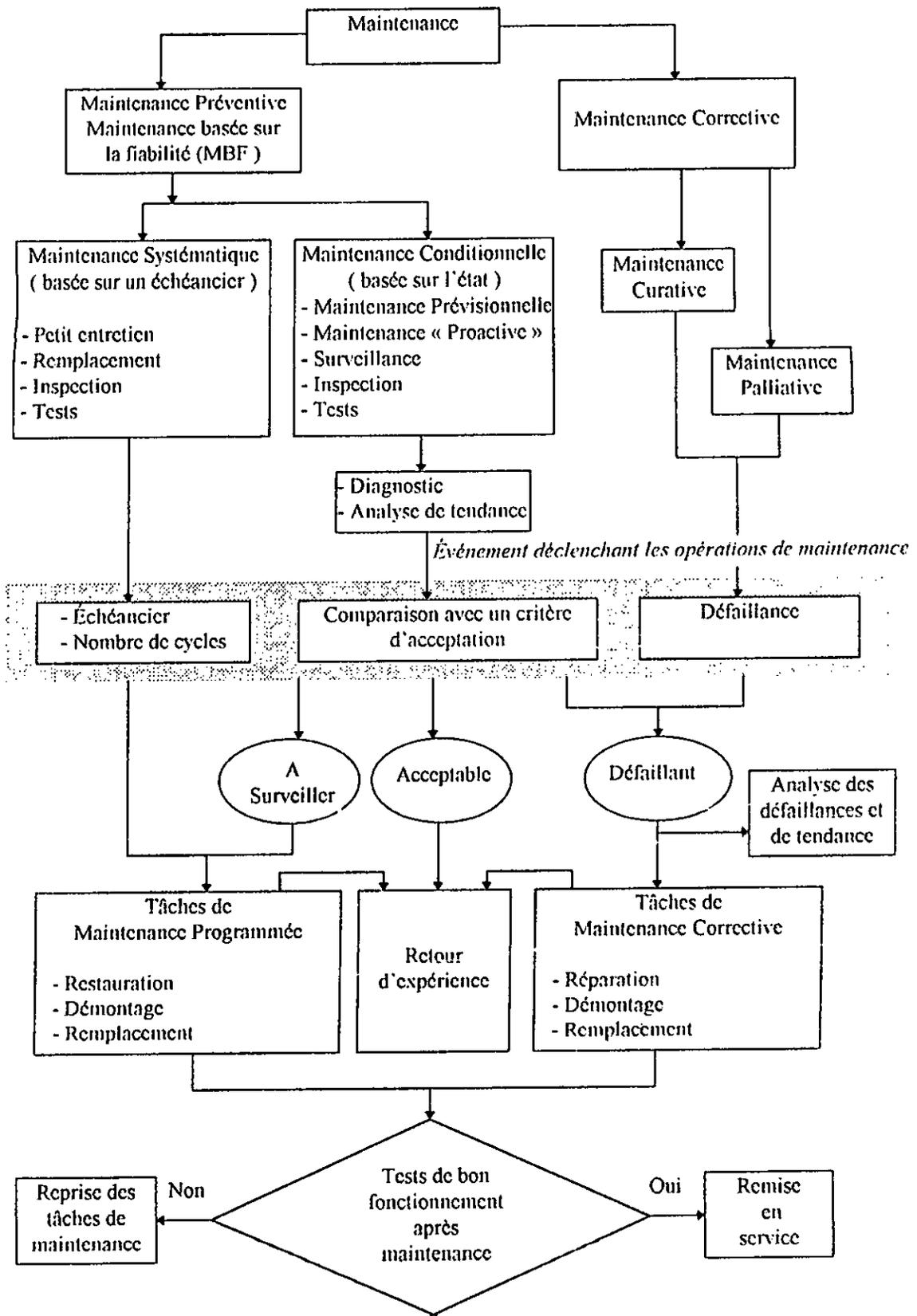


Figure 1.2 : Diagramme des différents concepts de maintenance

1.13 Classification des niveaux de maintenance [3] :

Les cinq niveaux normalisés sont donnés à titre indicatif pour servir de guide et leur utilisation pratique est recommandée entre les partenaires selon le type de bien à maintenir.

Niveau 1:

Réglage simple prévu par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échange d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles etc.

Niveau 2:

Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance et à l'aide de ces mêmes instructions.

Niveau 3:

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive tels que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

Niveau 4:

Tous les travaux importants de maintenance correctrice ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi, le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé, doté d'un outillage général (moyens mécaniques, de câblage, de nettoyage, etc.), éventuellement de bancs de mesure et étalon de travail nécessaire et à l'aide de toutes documentations générales ou particulières.

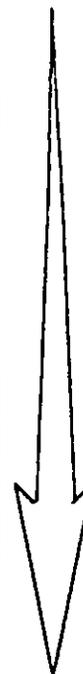
Niveau 5:

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier ou à une unité extérieure. Ce type de travaux est effectué par le constructeur, avec les moyens nécessaires.

En général, les qualifications des personnels et les coûts associés s'accroissent avec le niveau de maintenance. Ceci est illustré par le tableau suivant:

Tableau 1.1 : Niveau de maintenance AFNOR

| NIVEAU | ACTIVITES |
|----------|--|
| Niveau 1 | Ronde, petit entretien, graissage |
| Niveau 2 | Échange standard, contrôle du bon fonctionnement |
| Niveau 3 | Diagnostic, petites réparations, opérations mineures préventives |
| Niveau 4 | Travaux de maintenance préventive et correctrice, réglage des moyens de mesure |
| Niveau 5 | Rénovation, reconstruction et réparation importante |



2. Définition et classification des défaillances [3]

2.1 Introduction

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble d'accomplir sa (ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques. L'ensemble est indisponible suite à la défaillance.

Plusieurs critères sont utilisés pour classer les défaillances, on citera ici les plus importants :

2.2 Classification des défaillances

2.2.1 Classification en fonction des causes

a) Défaillance due à un mauvais emploi

Défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du dispositif.

b) Défaillance due à une faiblesse inhérente

Défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au delà des possibilités données du dispositif. C'est le cas d'une faiblesse de la conception.

c) Défaillance première

Défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif. Par exemple ceci correspond à la défaillance du palier du vilebrequin d'un moteur.

d) Défaillance seconde

Défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre dispositif. En reprenant l'exemple précédent, si la défaillance du palier est liée à la défaillance du système de lubrification, alors il y a défaillance seconde.

2.2.2 Classification en fonction des degrés

a) Défaillance partielle

Défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.

b) Défaillance complète

Défaillance suite à laquelle le système perd toute aptitude à accomplir sa fonction.

c) Défaillance intermittente

Défaillance d'un dispositif subsistant pendant une durée limitée, à la fin de laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir sa fonction requise, sans avoir été soumis à une action corrective externe quelconque.

2.2.3 Classification en fonction des vitesses d'apparition

a) Défaillance soudaine

Défaillance qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure. Ce type de défaillance ne peut pas se détecter par un examen de l'évolution des caractéristiques du dispositif.

b) Défaillance progressive

Défaillance qui aurait pu être prévue par un examen ou une surveillance en exploitation.

2.2.4 Classification en fonction de la vitesse d'apparition et du degré**a) Défaillance catalectique**

Défaillance qui est à la fois soudaine et complète.

b) Défaillance par dégradation

Défaillance qui est à la fois progressive et partielle.

A la longue une telle défaillance peut devenir une défaillance complète.

2.2.5 Classification en fonction de la date d'apparition

Cette classification concerne les défaillances le long de la durée de vie d'un équipement, on distingue:

a) Défaillances de jeunesse**b) Défaillances à taux constant****c) Défaillance d'usure**

Pour plus d'explication voir chapitre 4.

2.2.6 Classification par rapport aux conséquences

La rapidité de l'intervention de maintenance dépend du degré de gravité de la défaillance, on distingue:

a) Défaillance mineure

Défaillance autre que critique, qui ne réduit pas l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir sa fonction requise. Elle nuit au bon fonctionnement du dispositif en causant des dommages négligeables soit au système, soit à l'environnement.

b) Défaillance majeure

Défaillance, autre que critique, qui risque de réduire l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir sa fonction requise.

Elle est appelée également défaillance significative. Elle ne cause pas de dommage notable au système, à l'environnement ou à l'homme. A titre d'exemple nous citons :

c) Défaillance critique

Défaillance qui risque de causer des blessures à des personnes ou des dégâts importants aux matériels. Elle entraîne la perte d'une ou des fonctions essentielles du dispositif avec un impact sur l'environnement, les systèmes et les personnes.

La rupture d'une bielle dans un moteur correspond à ce type de défaillance.

d) Défaillance catastrophique

Défaillance qui entraîne la perte d'une (ou des) fonction(s) essentielle(s) d'un dispositif, en causant des dommages importants au dit système, à l'environnement et peut entraîner la mort d'hommes.

La classification qui a été présentée s'appuie intégralement sur la norme :
UTE C 20-13.10.

Chapitre 2

Mécanisme de Ruine des Matériels

1. Introduction

La compréhension des mécanismes de ruine qui sont susceptibles d'apparaître sur les éléments constitutifs d'un matériel est une démarche primordiale à entreprendre pour établir les tâches de maintenance préventive dans le cadre d'une politique de maintenance basée sur la fiabilité.

2. Modes de rupture [4]

L'analyse des modes de rupture d'un élément d'une pièce mécanique est très importante pour anticiper sur les conséquences et les délais d'apparition de la défaillance. Ce paragraphe fournit l'essentiel des contenus des descriptions des modes de ruine et de leurs causes physiques.

2.1 Rupture fragile

Le mode de rupture fragile survient quand on applique un choc important sur la pièce composée d'un matériau fragile par nature. L'analyse au microscope ou à la loupe de la cassure fragile permet aux experts de classer le mode de rupture en deux catégories: la rupture fragile transcristalline ou la décohésion des cristaux se fait suivant des plans de clivage, ce qui se traduit visuellement par des facettes planes brillantes, la rupture intercristalline au contraire présente un aspect différent avec des facettes courbés.

2.2 Rupture semi-fragile

Ce mode de rupture concerne principalement les grandes structures qui sont capables d'emmagasiner une très grande énergie. En présence d'un point faible ou d'une déchirure, l'énergie se libère très rapidement, se propageant avec une vitesse de l'ordre de 1500 m/s.

2.3 Rupture ductile

En présence d'effort appliqué en tension à une pièce métallique rectiligne telle qu'une tige de métal, on observe un phénomène de ductilité: en fonction du temps d'application, on constate tout d'abord un allongement de la tige puis la naissance d'un amincissement appelé striction. En prolongeant l'application de la force, la pièce se rompt par rupture ductile au niveau de la zone de striction.

3. Ruine des matériels par fatigue [5]

La rupture d'une structure métallique par fatigue est la conséquence principale d'efforts cycliques liés aux conditions d'exploitation. Elle se traduit par l'apparition de fissures. La présence d'une telle fatigue est souvent difficile à identifier sans moyen spécialisés. En effet ce mécanisme de ruine est relativement sournois, dans la mesure où il n'affecte pas la forme externe de la pièce. Les paramètres principaux qui influent sur ce phénomène sont nombreux:

3.1 Paramètres influents sur le phénomène de fatigue

3.1.1 Contraintes mécaniques :

Lorsque le matériau est soumis à des contraintes mécaniques cycliques, le mode de fatigue est appelé oligo-cyclique. En métallurgie, pour ce genre de phénomène on admet qu'un matériau donné possède une limite d'endurance à la rupture, qui dépend à la fois du nombre de cycles et de l'intensité de la contrainte. Lorsque l'on aura "consommé" cette limite, le matériau aura une très forte probabilité de rupture. En pratique, cette rupture peut survenir entre quelques dizaines de cycles à plusieurs dizaines de milliers de cycles. Certains secteurs industriels ont développé des fatiguemètres pour évaluer la consommation de la fatigue pendant la durée de vie du matériau.

3.1.2 Contraintes thermiques

Un matériau soumis à de fortes températures voit baisser son niveau d'endurance. Le matériau est soumis à une dilatation en régime statique qui se traduit par le phénomène de fluage (450 °C - 600 °C). Ce phénomène s'amplifie lorsque l'on effectue en plus, des cyclages entraînant des contraintes. Des études de fatigue - fluage et de fatigue-relaxation sur des éprouvettes permettent d'obtenir les temps d'utilisation avant rupture. Lorsque les éléments soumis à la température sont bloqués mécaniquement, on peut obtenir après un certain nombre de cycle une rupture par fatigue thermique.

3.1.3 Contraintes liées à l'environnement

Les matériaux des systèmes industriels, sont toujours en contact avec l'environnement. suivant la nature du milieu, il existe toujours une interaction chimique entre le matériau soumis à la fatigue. La vitesse de propagation d'une fissure - par les mécanismes de réaction chimique ceci se traduit par le phénomène de corrosion.

3.1.4 Contraintes liées à des contacts superficiels

Un certain nombre de matériels mécaniques possèdent des composants sur lesquels on observe des contacts intermittents, liés aux vibrations ou à leur nature (dents d'engrenage). Le champ de contraintes superficielle apparaissant dans les circonstances fait apparaître des dégradations appelées corrosion par contact, corrosion par frottement (fretting) ou par petits débattements.

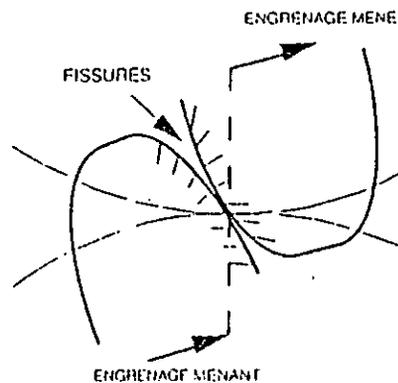


Figure 2.1 : Usure des lignes de fissure d'un engrenage

Les dégradations par « faux effet Brunell » se rangent dans la catégorie de la corrosion par contact. Elles se rencontrent principalement dans les contacts ayant lieu dans les paliers, des machines à l'arrêt, soumis, cependant à des vibrations (moteurs, turbines, etc.).

Les dégradations par pitting (pit: trou en anglais) se produisent lorsque le champ de contraintes superficielles est important et cyclique. Pour les engrenages les trous observés sont la conséquence de micro-fissures, entraînées par la fatigue superficielle.

4. Ruine des matériels par abrasion [6]

Le phénomène de ruine des matériels par abrasion peut se définir comme l'enlèvement de matière, consécutif à des frottements ou à des contacts avec des particules abrasives on distingue:

- L'abrasion par enlèvement de métal (gorgeage) par effet de coupe sous l'effet de chocs importants. Appelée « gorging » en anglais, elle se manifeste sur certaines machines-outils ou en présence de l'impact de pièces mécanique sur des structures.
- L'abrasion due à des champs importants de pression appelé grinding en anglais ; on rencontre ce phénomène dans les industries où l'on transforme des matières premières par broyage ou concassage.
- Érosion par abrasion, qui met en jeu des fluides chargés circulant à haute vitesse avec des champs de pression faibles. Sous l'impact des particules dures et abrasives circulant à très haute vitesse, on arrache des parties du matériau impacté. Les machines de sablage destinées au nettoyage de murs d'immeubles mettent en œuvre ce principe.

5. Ruine par cavitation [7]

Le phénomène de cavitation se produit dans des matériels en contact avec un fluide (pompes, hélices de bateaux foilers de planches à voiles). En présence d'une baisse de pression brutale du fluide à proximité de la surface du matériel, il se produit des bulles de vapeur qui apparaissent très rapidement (quelques millisecondes) et qui implosent ensuite, elles provoquent ainsi des ondes de pression très brèves (de 10^{-4} à 10^{-5} s) mais très intenses (10^5 à 10^6 bars). Ces ordres de pression détruisent la structure du matériau, entraînant ainsi la perte de matière (voir schéma) [6].

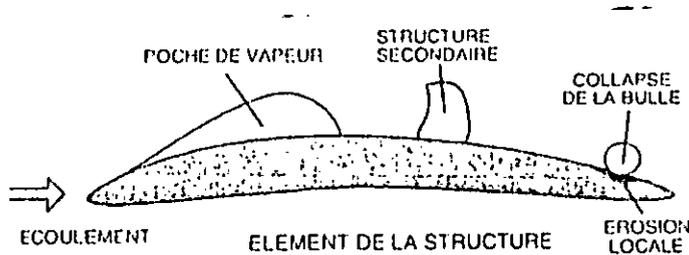


Figure 2.2 : Phénomène d'érosion par cavitation

Trois phénomènes thermodynamique expliquent l'érosion par cavitation comme le représente la figure suivante :

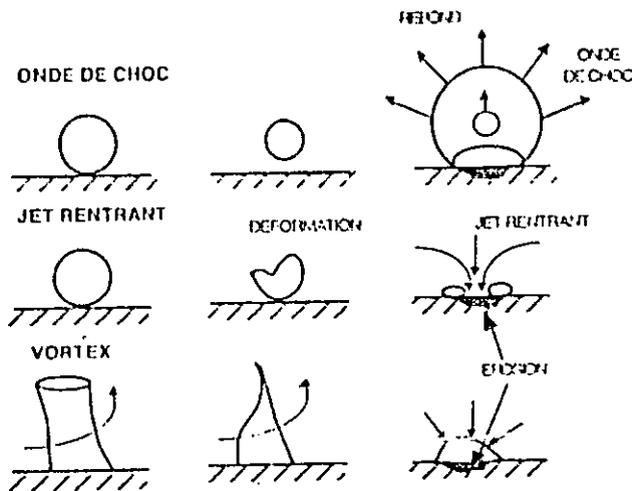


Figure 2.3 : Les modes d'érosion par cavitation

6. Ruine par érosion par gouttelettes liquides [8]

Ce phénomène se rencontre principalement dans des matériels où l'on trouve de la vapeur non sèche, circulant à haute vitesse (turbines, compresseur, tuyauteries). Sous l'effet de l'énergie cinétique très élevée des gouttelettes contenues dans le fluide; les structures du matériau subissent des dégradations se traduisant par des pertes de matière. Lors d'un arrêt pour révision d'une centrale électrique, on observe que l'extrémité des tubes de la turbine a l'apparence d'une éponge.

7. Ruine par fluage [4]

Le fluage d'un matériau métallique dépend principalement de la température d'exploitation. On constate que si la température de fusion de l'alliage est égale en K_0 (en degré Kelvin), le fluage apparaît à partir d'une température de $0.4 K_0$.

Sous le régime de fluage, le matériau est l'objet d'une déformation plastique qui peut se traduire rapidement (fluage rapide) ou lentement (fluage lent) par une rupture.

La rupture ductile que l'on observe est consécutive à un allongement de la pièce qui provoque une perte de la section, ceci entraîne la rupture par striction. Ce sont principalement les caractéristiques métallurgiques qui définissent les paramètres de résistance à la rupture ductile par fluage.

8. Ruine par relaxation [9]

Lorsqu'un matériel est maintenu mécaniquement sous contraintes en fonctionnement normal (boulonneries, soudures), il se produit un phénomène de relaxation des contraintes quand on le libère. Ce phénomène va se traduire par un allongement, dans le cas de la boulonnerie, ou bien par des contraintes résiduelles dans les soudures. Après remontage, si des précautions ne sont pas prises pour rétablir le champ de contraintes, on risque de voir apparaître la rupture des éléments concernés. Les remèdes à apporter consisteront à rétablir la mise sous contrainte, mécaniquement ou par traitement thermique.

9. Ruine par corrosion [10], [11]

La corrosion est un phénomène général, qui se traduit par la perte de matière d'une paroi métallique sous l'effet d'un ou plusieurs facteur(s) d'agression contenu(s) dans le fluide à son contact. Ce paragraphe décrit les principaux modes de corrosion observés sur les systèmes thermodynamiques.

9.1 Corrosion généralisée

L'enlèvement de matière par corrosion généralisée présente la particularité d'être uniforme sur toute la paroi. Il provient de réactions électrochimiques de réduction et d'oxydation dans le milieu aqueux où est entièrement plongé le métal.

Les différentes hétérogénéités dans le matériau constituent des micro-cathodes et micro-anodes qui entraînent par électrolyse la dissolution du métal. Pour contrer cette corrosion, on peut soit protéger le métal par une surface isolante, soit utiliser des produits chimiques, pour inhiber la corrosion ou bien conditionner chimiquement l'eau.

9.2 Corrosion par aération différentielle

Le phénomène se rencontre par exemple, quand une paroi métallique est baignée dans un milieu contenant de l'oxygène et se couvre de gouttes. La présence d'une alternance de gouttes et de surfaces libres, contribue à la création d'un ensemble de micro-piles (effet dit d'Evans). Ces micro-piles vont entraîner par électrolyse au bord des gouttes, une dissolution du métal. C'est ce type de corrosion que l'on rencontre sur des matériels baignés dans un brouillard salin (bateau).

9.3 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique intervient chaque fois que des assemblages de pièces métalliques sont immergés dans un milieu électrolytique. Lorsque l'on immerge une pièce constituée d'un métal unique, il s'établit, après un certain temps, un potentiel électrique appelé potentiel de dissolution. Ce potentiel dépend du métal et de l'électrolyte et sera d'autant plus élevé que le métal est noble.

Dans des conditions molaires particulières de l'électrolyte, on caractérise le métal par son potentiel d'équilibre.

En présence d'un assemblage composé de deux métaux différents, les potentiels d'équilibre étant différents, celui-ci se comporte comme une pile, où l'un des métaux sera consommé par électrolyse. Le métal à plus faible potentiel d'équilibre servira d'anode et sera consommé, alors que le métal le plus noble sera protégé cathodiquement. On parle alors de corrosion galvanique; c'est ce phénomène que l'on observe en présence d'humidité sur une automobile, à l'endroit des systèmes de fermeture des portes, fixés sur la carrosserie.

9.4 Corrosion par piqûre

Ce type de corrosion se manifeste souvent quand un métal contenant des hétérogénéités, dues à des inclusions non-métalliques, et est plongé dans un milieu électrolytique. Au niveau de ces inclusions, on observe la création de phénomènes d'électrolyse, qui vont induire la création de piqûre, même si le métal a été traité pour le rendre passif. La vitesse de propagation de ces piqûres peut être importante en fonction des surfaces des inclusions. Plusieurs effets contribuent à aggraver la situation: diminution de la teneur en oxygène, acidification de la solution ou augmentation de la densité de courant d'électrolyse.

9.5 Corrosion caverneuse

Cette corrosion se manifeste pour les pièces constituées de métaux différents et maintenues par des boulons ou des rivets. S'il existe des inclusions ou des occlusions à l'interface des deux métaux, on obtient une corrosion caverneuse entraînant des pertes de matières. Suivant la nature des métaux, il est possible de ralentir ce type de corrosion, par traitement chimique ou par protection galvanique.

9.6 Corrosion intercrystalline

Elle est le résultat pour les aciers austénitiques, soit du processus de fabrication, soit des conditions d'utilisation. Elle est due aux températures élevées (400 °C - 800 °C), et se traduit par un phénomène de précipitation intercrystalline des composés chimiques tels que les carbures. Cela entraîne une modification de la topologie des réseaux cristallins, qui provoque une forte sensibilité aux attaques galvaniques. Les seuls remèdes constituent à utiliser des aciers à faible teneur en carbone, à additionner du molybdène ou à assurer un traitement thermique de plus longue durée.

9.7 Corrosion sous tension

Ce phénomène apparaît quand un matériau est soumis en même temps, à une tension et à un milieu aqueux. Elle se traduit par des fissurations des matériaux. Elle se rencontre en présence d'hydrogène ou, lorsque le film de passivation se détériore.

9.8 Corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne se produit quand le métal est baigné dans un liquide qui ne possède pas de garantie de non-pollution par des germes externes. Elle se rencontre aussi bien dans l'industrie agro-alimentaire que dans les autres secteurs industriels.

Les bactéries contenues dans les eaux industrielles, consommant, non seulement des éléments organiques, mais aussi des éléments métalliques, entraînant ainsi des pertes de matière. La prolifération des bactéries peut également réduire les performances des surfaces d'échange et quelquefois conduire à des bouchages de tuyauteries. Les mesures pour éviter la prolifération de bactéries consistent à maintenir la propreté des circuits à l'aide de bactéricides et à éviter la formation de zone tranquille.

10. Ruine par corrosion-érosion [10]

La corrosion-érosion est provoquée lorsque la surface d'un métal fonctionnant à haute température est baignée dans un milieu (liquide ou gazeux), circulant avec une vitesse donnée. Les mécanismes de corrosion-érosion sont très complexes et s'expliquent par les échanges d'ions entre le métal et le milieu. Plusieurs théories ont été développées pour expliquer ce phénomène. Elles reposent sur trois étapes résumées sur la figure suivante:

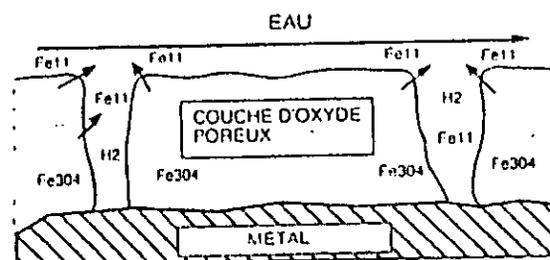


Figure 3.15. Explication du phénomène d'érosion-corrosion

- Oxydation de l'acier par l'eau et production des différents oxydes.
- Diffusion dans l'eau de la fraction de fer soluble dégagé par les réactions chimiques.
- Transport par le fluide (érosion) des éléments ferriques dégagés par les réactions chimiques se propageant à la surface du métal.

De nombreux paramètres influent sur la cinétique de la corrosion-érosion: pH de l'eau; teneur en oxygène, composition de l'acier, température de fonctionnement et vitesse du fluide. Les mesures conservatoires pour éviter la corrosion-érosion doivent être prises à la conception, ou à l'aide de modifications de l'environnement opératoire[11].

11. Mécanismes de ruines induits par la conception [1]

Une politique de maintenance basée sur la fiabilité des matériels doit impérativement prendre en compte les paramètres qui ont été retenus lors de leurs conception et de leur fabrication. En effet, la connaissance précise des matériaux et des méthodes de fabrication se montre à l'usage très bénéfique pour identifier et ainsi anticiper l'apparition des dégradations, cela avant qu'elles n'entraînent des défaillances.

Les causes potentielles de défaillances trouvent leurs origines aussi bien dans des raisons techniques qu'organisationnelles comme le résume le schéma suivant :

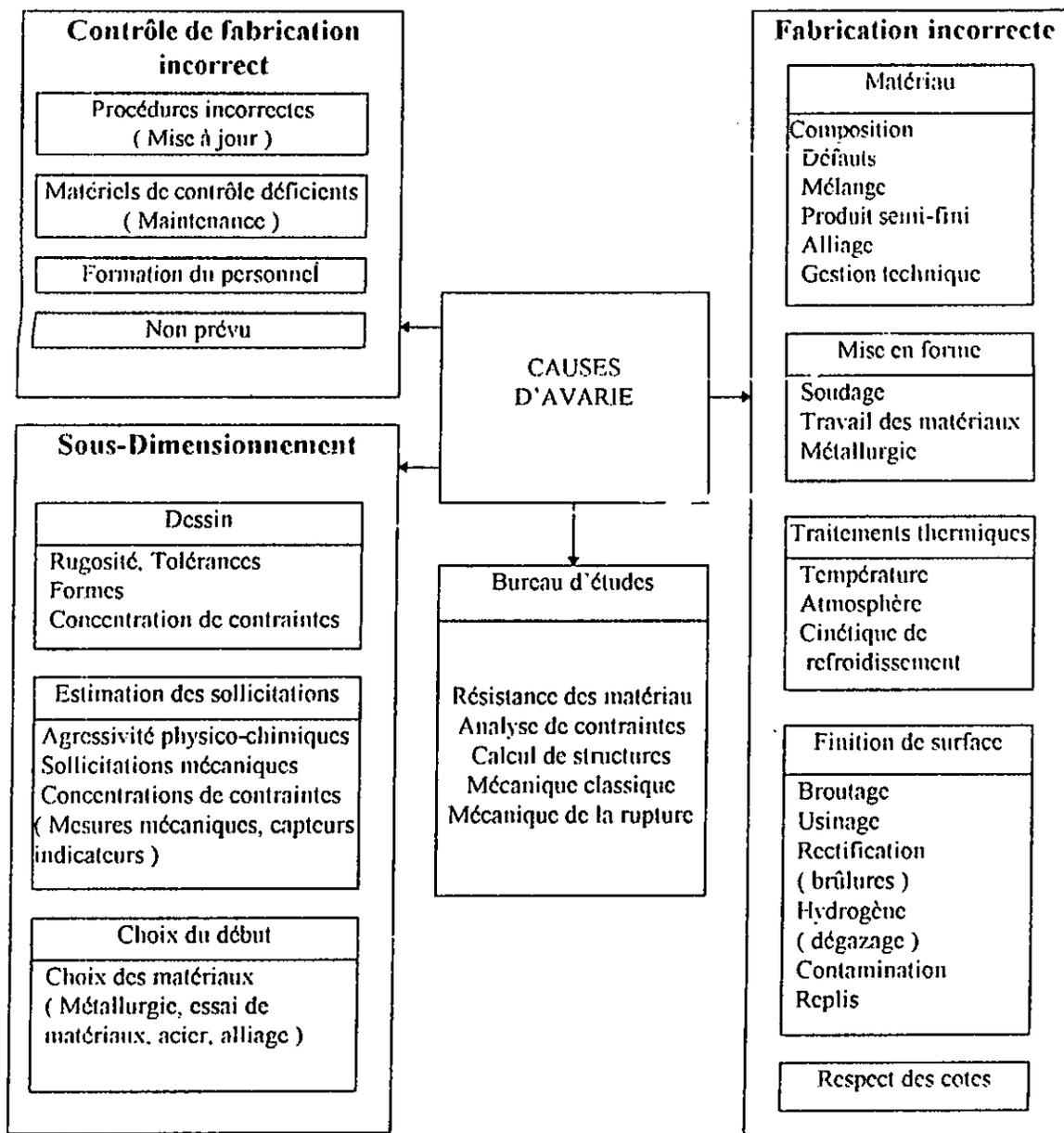


Figure n°2.5 : Causes d'avarie

12. Mécanismes d'usure dus aux frottements et aux contacts des matériels mécaniques [6], [12]

Pour étudier les mécanismes d'usure des matériels composés de pièces mobiles dont l'interface de contact est assurée par un film de séparation assurant sa lubrification, l'étude de la tribologie est indispensable pour identifier et comprendre les mécanismes de dégradation et d'usure.

La tribologie regroupe un ensemble de disciplines et de technologies qui s'intéressent aux surfaces qui interagissent en présence de leurs mouvements relatifs, elle inclut:

- Les phénomènes physiques, chimiques, mécaniques et métallurgiques qui surviennent lors de l'interaction des surfaces en mouvement relatif. Ils incluent les phénomènes de frottement d'usure.
- La lubrification par film fluide: hydrostatique, hydrodynamique, aérostatique et aérodynamique.
- La lubrification en présence de conditions spéciales telles que la déformation ou un procédé de coupe.
- Les propriétés et le comportement en fonctionnement des différents type de paliers.
- La conception, la réalisation et le fonctionnement de paliers ou de surfaces de contact (roulement, segments de piston, glissières, dents d'engrenages...etc.)
- Les propriétés et le comportement en fonctionnement de différents types de lubrifiants (liquides, graisses, gaz, matériaux, solides)
- Le contrôle et l'assurance qualité des lubrifiants.
- La manutention et l'application sur les matériels des lubrifiants.
- La gestion et le stockage des lubrifiants.

12.1 Régime de lubrification [12]

Les machines tournantes industrielles utilisent des principes de lubrification en fonction de leurs tailles et de leurs vitesses de rotation. Les surfaces en mouvement relatif sont le siège de frottement et d'usure. Le frottement résulte de la résistance au mouvement et l'usure provient de la perte de matière des parties en contact. Les surfaces sont séparées par un lubrifiant conçu pour diminuer le frottement et réduire l'usure en interposant un film d'épaisseur suffisante pour éviter le contact direct métal-métal.

Le maintien d'un tel film dans le cas d'un lubrifiant liquide peut être réalisé soit par un système de mise sous pression (lubrification hydrostatique), par des géométries appropriées de surface ou bien par une vitesse suffisante d'entraînement (lubrification hydrodynamique). La lubrification élastodynamique apparaît lorsqu'au point de contact se crée de très fortes pressions (cas des engrenages). Sous l'effet de la pression, la vitesse augmente de façon exponentielle, rendant le lubrifiant presque solide. On obtient ainsi un film très fin (0,25 - 1,25 μm) dont la rigidité est plus importante que celle des métaux, séparant les pièces en contact et évitant ainsi le contact sec.

Des additifs sont souvent ajoutés dans le lubrifiant afin de diminuer les forces de frottement. Le lubrifiant perd naturellement avec le temps ces caractéristiques de lubrification, des vidanges doivent être par conséquent prévus. Cependant, des conditions défavorables d'utilisation provoqueront la dégradation du lubrifiant plus rapidement que prévu, ces conditions défavorables :

- charges excessives
- vitesses faibles
- hautes températures
- manque de lubrifiant
- débris solides provenant de l'usure des matériaux.

Ce dernier point concerne les différents modes de ruine des matériaux (présence des débris solides). Nous citerons ici deux types d'usure provoquées par ces débris :

- Usure abrasive

L'usure abrasive se produit lors du déplacement de matière d'une des deux surfaces qui sont en mouvement relatif. L'usure est causée par la présence de protubérances dures sur la deuxième surface ou par des particules dures entre les surfaces. La sévérité de l'usure dépend de la taille et la nature des particules ou protubérances.

- Usure adhésive

L'usure adhésive survient quand la couche formée par le film de lubrifiant et située entre les aspérités des deux surfaces se trouve déplacée. Ces aspérités en contact se déforment par contact mutuel et dans certains cas peuvent entraîner des soudures froides entre elles, causant ainsi l'arrachement de matière [12].

13. Vieillessement [5]

Une politique de maintenances efficace, et en particulier, la maintenance basée sur la fiabilité, ne peuvent pas faire l'économie de l'analyse des phénomènes de vieillissement affectant les matériaux pendant leur durée de vie.

Le phénomène de vieillissement d'un élément débute à partir du moment où il sort des chaînes de fabrication. Il se poursuit ensuite, pendant la phase de stockage et continue pendant toute la durée de fonctionnement du composant. Il se traduit par le changement des caractéristiques physiques des matériaux avec lesquels est construit le composant : dimensions, dureté, ductilité, résilience, conductivité, etc.

Il est important de noter que sous l'effet du vieillissement certains matériaux s'améliorent (cas du béton). Néanmoins, dans la majorité des cas, on observe une détérioration.

Chapitre 3

Surveillance en Exploitation

1. Introduction

La maintenance basée sur la ^{fiabilité} donnant la priorité absolue aux tâches de maintenance préventive à la fois applicables, efficaces et économiques, il est important de définir les activités de maintenance et de maîtriser les technologies et les méthodes préventives conditionnelles.

Comme nous l'avons souligné au chapitre 1, la maintenance conditionnelle prévisionnelle a pour objectif de détecter le point de défaillance potentiel par des mesures de l'état de santé de la machine. La variété des technologies mises en œuvre dans les matériels industriels est telle qu'il faut disposer d'une panoplie très étendue de moyens de mesure et de traitement de l'information.

L'objet de ce chapitre est de décrire les principales technologies et méthodes de maintenance conditionnelle susceptibles d'être utilisées dans la maintenance basée sur la fiabilité.

2. Signature vibratoire [1], [13], [14] et [15]

Classée première au hit parade des techniques de maintenance conditionnelle (avec 50 % de part de marché), la surveillance vibratoire est spécialement captée à la détection d'anomalies affectant des ensembles mécaniques dont les éléments structuraux sont soumis soit à des efforts mécaniques dynamiques (machines tournantes, machines alternatives, ...) ou bien à un matériel statique (structure, tuyauteries, ...).

Le captage, la transmission, l'amplification et l'analyse des signaux sont effectués par des dispositifs électroniques. La miniaturisation, la vitesse et la capacité de traitement des données sans cesse grandissantes a permis l'intégration de ces systèmes de surveillance aux matériels observés, c'est ce qu'on appelle «surveillance intégrée».

Actuellement, avec les réseaux informatiques, on se dirige vers la «télémessure», permettant l'observation et la prise de décision à distance.

Nous suivrons dans ce paragraphe, les étapes qui parcourent le signal de la collecte à l'interprétation.

2.1 Captage de la valeur mesurée

On distingue deux grandes familles de capteurs différents de part leurs principe et construction:

- Capteurs passifs : ils nécessitent une alimentation en courant.
- Capteur actifs : ils ne nécessitent pas d'alimentation en courant.

2.1.1 Capteurs passifs

Jauge de déformation : (Tensiomètre chimique)

Son élément actif est un fil de diamètre 40µm environ. Ce fil change sa résistance quand il est étiré, cette variation est exprimée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = S \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (3.1)$$

où R : résistance

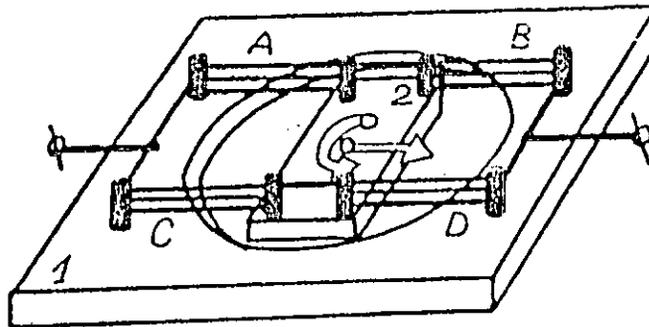
l : longueur du fil non déformé

Δl : accroissement de la longueur du fil pendant la traction

ΔR : accroissement de la résistance

S : facteur de proportion.

En pratique, on utilise deux types de tensiomètres chimiques: étendus et collés. Un exemple du tensiomètre étendu est présenté sur la figure



Les quatre ensembles de fils résistants A, B, C, D forment quatre parties du pont de Wheatstone. Ils sont fixés avec une tension préliminaire, sur les consoles entre un châssis (1) et un élément mobile (2). Les déplacements de l'élément (2) par rapport au châssis (1) entraînent des déformations des fils et des changements de leurs résistances.

Les tensiomètres étendus sont utilisés pour la mesure des mouvements des techniques grands et pour les fréquences plus basses que 1000 Hz.

Les tensiomètres collés sont utilisés surtout pour les examens de machines et de mécanismes (figure 3.2).

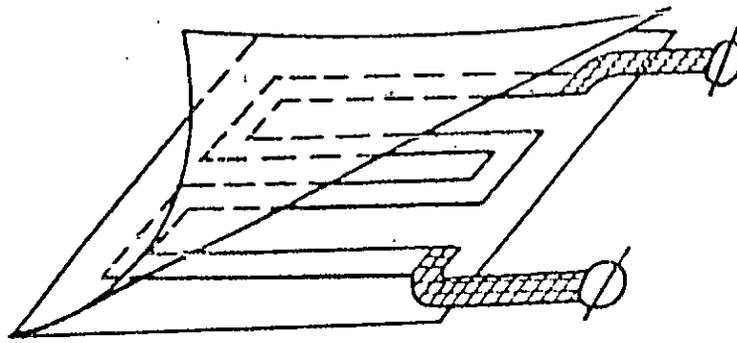


Figure 3.2 :

L'élément actif du tensiomètre collé est un fil ou une bande de feuille collée sur un papier ou sur une feuille de matière plastique. Les fils d'alimentation sont soudés aux deux bouts de la feuille. L'ensemble est couvert par un deuxième morceau de feuille plastique. Tout le tensiomètre est collé sur l'élément mesuré d'une machine ou d'un mécanisme. Les déformations qui peuvent être mesurées sont jusqu'à 70µm.

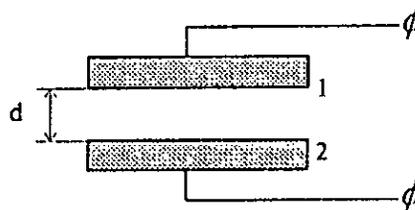
La bande passante des tensiomètres collés peut être de 0 à 10 000 Hz, mais en pratique on utilise une bande passante de 0 à 2000 - 3000 Hz.

Les principales causes d'erreurs sont :

- Variation de température
- Influence de l'humidité
- Influence des champs électromagnétiques.

Capteur capacitif

Il est constitué de deux plaques (1) et (2), situées à une distance d l'une de l'autre, séparées par un diélectrique de perméabilité électrique relative ϵ_r .



La capacité C d'un tel condensateur est donné par

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (3.2)$$

où

A : surface des plaques

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m perméabilité du vide.

L'idée de capteur est d'utiliser la variation de la capacité due à la variation de la distance séparant les deux plaques. Plusieurs types de capteurs ont été développés sur la base du capteur capacitif.

Capteur à courant de Foucaut

Il s'agit d'un capteur passif qui n'est fonctionnel que quand il est raccordé à l'électronique adéquate. Le capteur se compose d'une bobine dont la géométrie est bien définie et qui est partie intégrale d'un circuit oscillant à haute fréquence. Un corps métallique, par exemple, l'arbre d'une machine placé devant la bobine du capteur influence les caractéristiques du circuit oscillant dans le sens que la fréquence et l'amplitude du signal fourni par le capteur sont fonction de la distance entre la bobine et la cible (objet métallique). Cette variation du signal est traitée par le préamplificateur qui fournit à sa sortie un signal tension proportionnel au déplacement relatif cible-capteur.

L'application pratique de ces capteurs se situe entre 0 - 10 KHz et plus et une température ambiante allant jusqu'à 450 °C. Le choix de l'endroit de la mesure ainsi que le soin apporté au montage des capteurs influent dans une grande mesure les résultats de mesure.

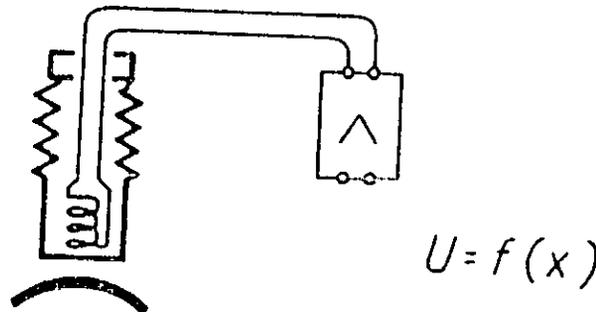


Figure 3.4 :

2.1.2 Capteurs actifs

Capteur électromagnétique de vitesse de vibration

La figure représente le principe des capteurs de vibration les plus utilisés dans l'industrie. Il s'agit d'un capteur sismique se composant essentiellement d'une bobine et d'un aimant. Lorsque cet ensemble est soumis à des vibrations, il en résulte un mouvement relatif entre la bobine et l'aimant d'où induction d'une tension proportionnelle à la vitesse de vibration.

Le champ fréquentiel d'application pour ce type d'appareil se situe entre 10 et 100 Hz et une température d'exploitation maximale d'environ 300 °C. En plus de leur gamme de fréquence et de température limitée, ces capteurs sont de part les pièces en mouvement qu'ils conviennent de robustesse et de durée de vie limitée.

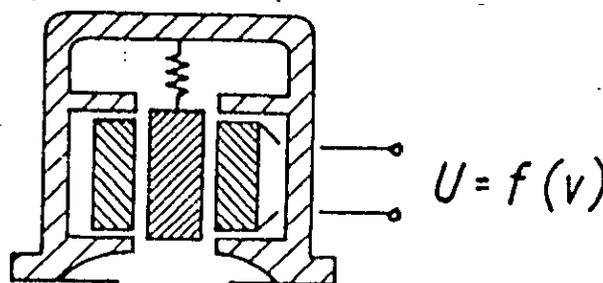


Figure 3.3 :

Accéléromètre piézo-électrique

Il s'agit également d'un capteur sismique, se composant d'un quartz en cristal de céramique et d'une masse sismique. Lorsque cet ensemble est soumis à des vibrations, une contrainte mécanique intermittente prend naissance sur les pastilles de cristal situées entre le balai du capteur et la masse sismique précontrainte. De part l'effet piézo-électrique, une charge électrique, proportionnelle à l'accélération apparaît à la surface des pastilles de cristal. Leur champ d'application pratique se situe entre 3 et 20 KHz et plus et une température de -200 °C à +600 °C.

Ces capteurs, du fait qu'ils ne contiennent aucune pièce en mouvement, sont très robustes, ne nécessitent aucun entretien et travaillent dans n'importe quelle position.

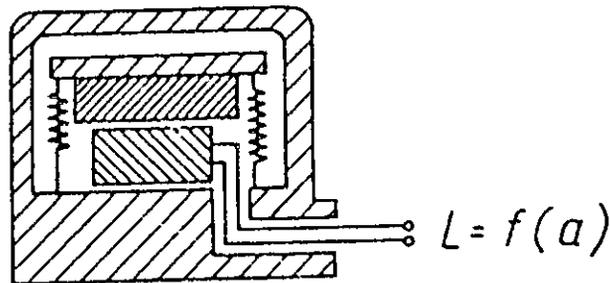


Figure 3.5 :

2.2 Influence du mode de fixation du capteur

Souvent négligé ou ignoré, le mode de fixation d'un capteur sur une structure exige des précautions élémentaires. Le capteur peut être en effet vissé, soudé, collé, maintenu par une pastille magnétique ou tenu à la main.

Pour un capteur d'accélération, dont les spécifications du fournisseur indiquent une fréquence de résonance à 30 KHz, la figure 3.6 reproduit les bandes passantes en fonction des moyens de fixation, on constate ainsi qu'il est illusoire de penser détecter des vibrations au delà de 2 KHz avec un capteur à pointe de touche tenu à la main.

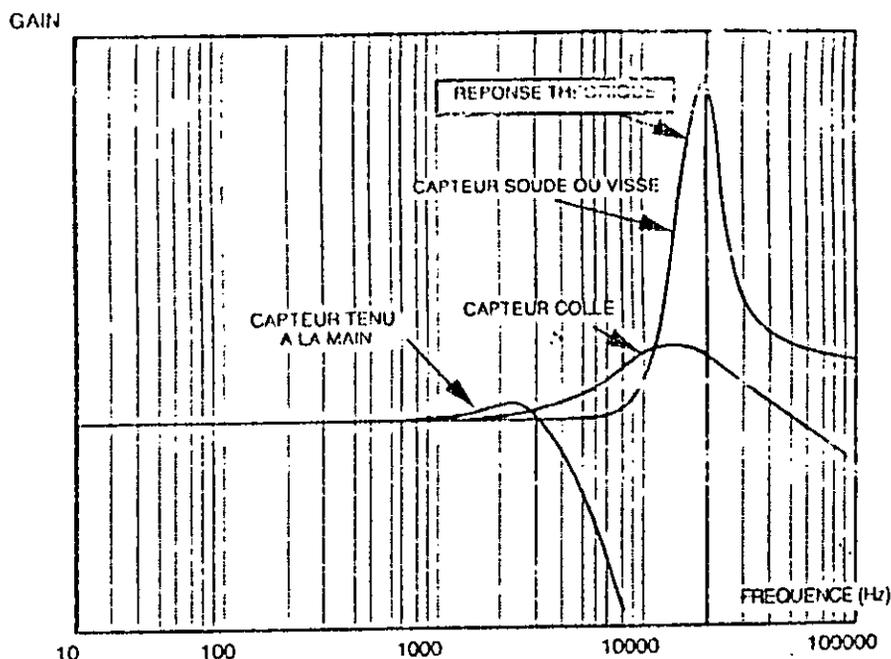


Figure 3.6. Influence du moyen de fixation sur la réponse fréquentielle

2.3 Application de la surveillance vibratoire aux machines tournantes

Spécialement adaptée au diagnostic des machines tournantes, la surveillance vibratoire fait appel à trois types de mesures dans ce cas :

2.3.1 Vibration absolue

Par vibration absolue, on désigne les mouvements vibratoires d'une machine, ou partie de celle-ci, par rapport à l'environnement ambiant.

Les capteurs sont en général montés sur l'enveloppe extérieure des paliers, cette disposition présente des avantages non négligeables :

- très bonne accessibilité.
- montage aisé et sur du capteur.

D'excellents résultats pratiques ont été obtenus ainsi.

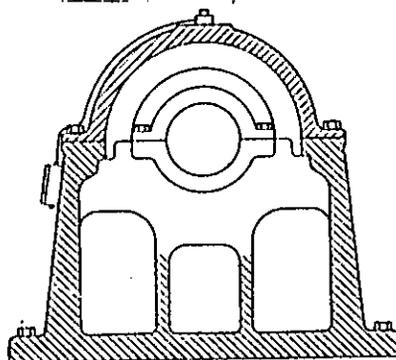


Figure 3.7 :

Cependant pour la surveillance des hautes fréquences elle ne donne pas les résultats escomptés. Il est conseillé dans ce cas de procéder à des mesures avec un équipement portatif, par exemple, afin de déterminer l'endroit le plus propice pour l'emplacement du capteur.

Pour les machines de grande dimensions, le capteur peut être logé à l'intérieur des paliers. Concernant le choix de capteur à utiliser, trois critères principaux sont à considérer :

- L'ambiance à l'endroit du capteur (atmosphère explosible)
- La température à l'endroit du capteur
 - normales jusqu'à 150 °C ,
 - moyennes jusqu'à 450 °C
 - hautes jusqu'à 650 °C.
- La gamme de fréquence à mesurer jusqu'à environ 5 KHz pratiquement tous les types de capteurs suffisent, au dessus et jusqu'à environ 20 KHz, les capteurs sont à choisir parmi la gamme haute fréquence.

Pour toutes les applications industrielles de mesure et de surveillance des vibrations, il est recommandé de travailler avec des capteurs de la série CE. C'est à dire avec électronique d'amplification incorporée. Dans les cas où les conditions d'ambiance (généralement température) ne permettent pas d'utiliser cette série, on pourra utiliser des capteurs de la série CA avec amplificateur séparé.

En ce qui concerne la gamme de fréquence à mesurer, il n'y aura pas de règle bien définie applicable, le choix dépend fortement du genre de machine à surveiller. A titre indicatif l'on peut considérer une gamme de 8 à 1000 Hz comme la plus répandue pour la surveillance des machines à paliers lisses ou des machines dont on tient à surveiller le balourd. Les gammes de fréquence de 1 KHz et plus sont indiquées pour la surveillance de l'état des paliers à roulements ou des engrenages des réducteurs ou multiplicateurs de vitesse.

2.3.2 Vibrations relatives

Par vibration relative, l'on désigne le mouvement vibratoire d'une partie de machine par rapport à un point de référence qui n'est pas absolu mais qui peut être soumis à un mouvement vibratoire absolu par rapport à l'espace. Une application typique étant la mesure de la vibration relative des arbres par rapport à leurs paliers.

Les capteurs sans contact à courant de Foucault mesurent le déplacement relatif de la cible (arbre) par rapport à la face avant du capteur et ceci dans axe de ce dernier. Pour les machines de petites et moyennes tailles, les capteurs de vibrations relatives sont généralement tenus par des adaptateurs qui a leur tour sont fixés sur le couvercle des paliers comme l'indique la figure 3.8.

Le bon accès à l'adaptateur, voire l'échange pendant la marche de la machine d'un capteur défaillant ainsi que la possibilité de réglage de l'entrefer initial du capteur lors de la mise en service sans découvrir le palier en font une méthode très répandue, bien que les vibrations absolues du point de référence (le couvercle du palier) peuvent conduire à des résultats erronés surtout s'il s'agit de paliers souples ou de couvercles mineurs pouvant présenter des phénomènes de résonance à certaines fréquences.

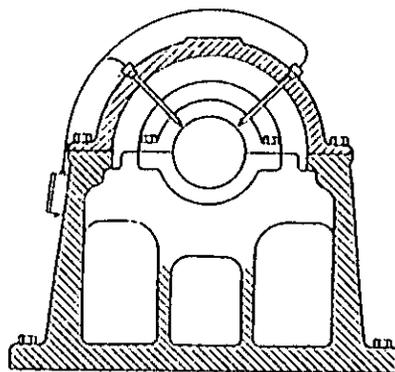


Figure 3.8 :

Concernant le choix du capteur ; en plus des critères précédemment cités :

- Il est à signaler, que les capteurs sont aptes à travailler de 0 à 10 KHz.
- Les conditions de places ainsi que l'étendue de la mesure déterminent les dimensions mécaniques du capteur. Dans le cas de machines de grandes dimensions, les capteurs peuvent être logés à l'intérieur des paliers.

2.3.3 Vibrations absolues d'arbre

Le problème essentiel de la mesure des vibrations absolues d'arbre réside dans le fait que l'arbre d'une machine en exploitation tourne. Ce sont donc des mesures sans contact qui fournissent les informations sur les vibrations relatives d'arbre. C'est à dire que pour les vibrations absolues d'arbre, il faudra tenir compte des vibrations du point de référence (fixation du capteur).

Une électronique adéquate additionne, en tenant compte des phases respectives des signaux, les signaux vibration relative et vibration absolue et fournit un signal de vibration absolue de l'arbre.

2.4 Transmission du signal

Le signal capté est conduit après amplification à travers des dispositifs de transmission vers l'électronique d'analyse où il est traité et finalement les résultats sont visionnés sur une interface. Le choix des dispositifs de transmission doit se faire avec un soin particulier, ceci en tenant compte des conditions d'exploitation, afin d'éviter toute déformation ou perturbation du signal, qui induirait des erreurs d'interprétation certaines.

Quant à l'évaluation du signal, elle peut se faire soit par comparaison à des signaux de référence, ou bien par l'analyse spectrale, qui aboutirait à l'identification des causes du comportement anormal de la machine.

2.5 Analyse du signal [16], [17]

La compréhension des phénomènes vibratoires rend indispensable l'acquisition de la connaissance et de la manipulation des signaux de base.

Un signal vibratoire pur peut être modéliser par la fonction sinusoïdale :

$$x(t) = A \sin (\omega t + \varphi) \quad (3.3)$$

où

A : est l'amplitude du signal

ω : est la pulsation

φ : est le déphasage.

Le tracé de $x(t)$ est donné par la figure :

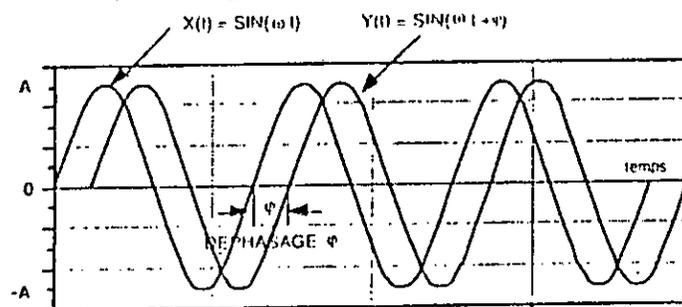


Figure 3.9 :

La période T est liée à la pulsation par la relation :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.4)$$

La fréquence exprimée en Hertz est donnée par :

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.5)$$

L'amplitude crête à crête A_c est donnée par :

$$A_c = 2A \quad (3.6)$$

La valeur RMS (Root Mean Square) ou valeur efficace de A vaut

$$A_{eff} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = 0,707 \quad (3.7)$$

La valeur moyenne de l'amplitude

$$A_m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = 0,637 \quad (3.8)$$

La vitesse instantanée $V(t)$ se déduit par dérivation de $x(t)$ par rapport au temps :

$$V(t) = -A\omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.9)$$

L'accélération instantanée $\gamma(t)$ est obtenue en dérivant la vitesse $V(t)$ par rapport au temps

$$\gamma(t) = -\omega^2 x(t) \quad (3.10)$$

Il est à noter que certaines grandeurs sont souvent exprimées en amplitude simple (accélération, vitesse) alors que d'autres sont en amplitude double (déplacement).

Pour déterminer l'état vibratoire des machines tournantes , des abaques, appelés nomogrammes, ont été construits. Ils permettent d'obtenir pour une valeur connue de la fréquence, la valeur des deux grandeurs, sachants que la troisième est connue. (figure 3.10).

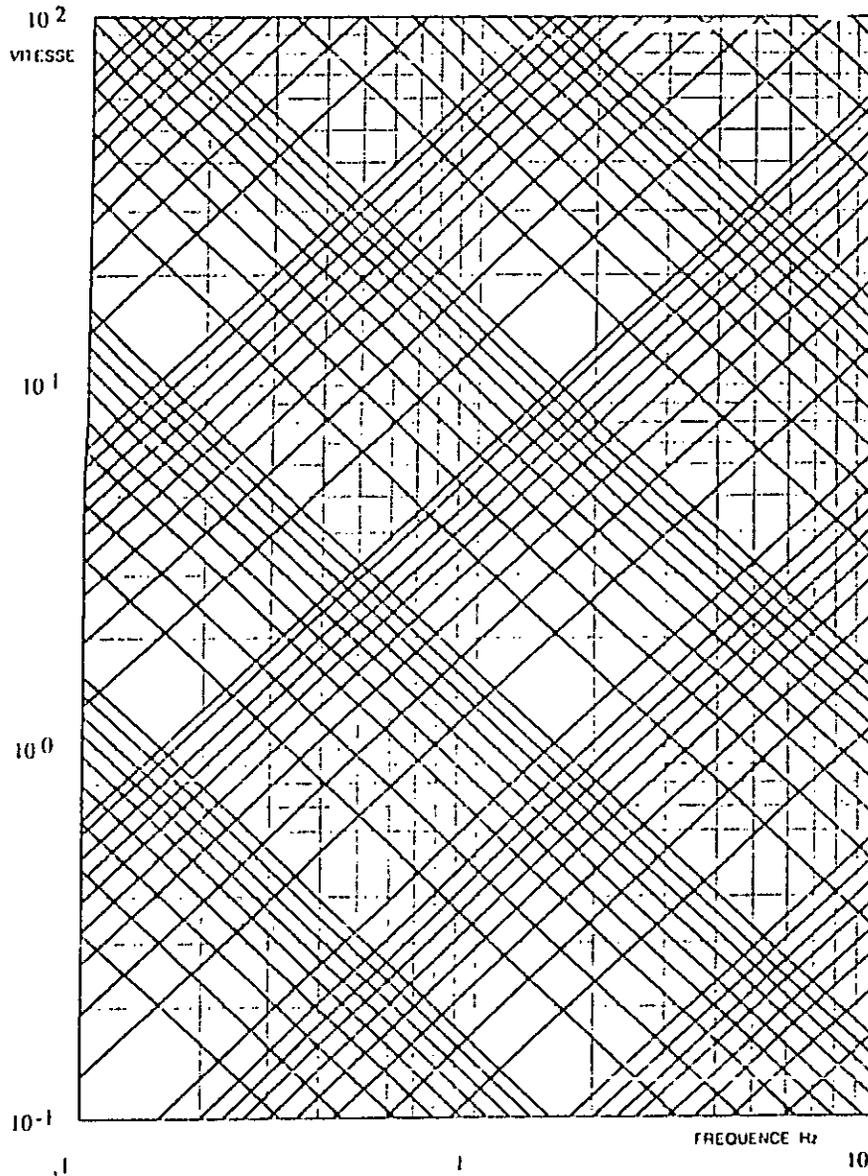


Figure 3.10 : Nomogramme

Pour les applications industrielles, la réalité est plus complexe car les signaux vibratoires sont des combinaisons de signaux sinusoïdaux avec pulsation et phases différentes perturbées par des bruits parasites (figure 3.11).

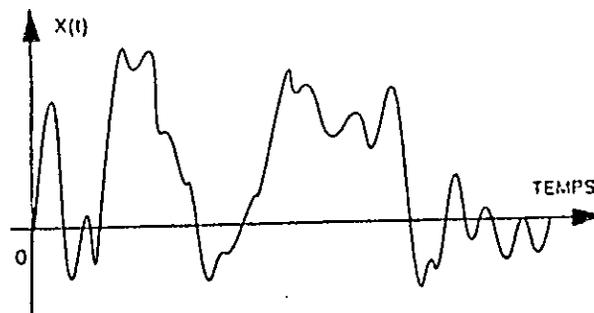


Figure 3.11 : Allure d'un signal complexe quelconque

L'analyse spectrale permet la séparation de la composante utile du signal perturbé et ainsi de déterminer les caractéristiques du signal, afin d'établir le diagnostic.

Le spectre de Fourier est le plus utilisé dans le domaine, son principe est de remplacer le signal $f(t)$ par une infinité de fonctions sinusoïdales complexes qui existent pour toutes les fréquences.

La condition de cette transformation est que la fonction $f(t)$ doit satisfaire les exigences de Dirichlet.

C'est à dire :

- La fonction considérée doit être uniformément bornée.
 - La fonction n'a qu'un nombre fini de points de discontinuité de première espèce.
 - La fonction n'a qu'un nombre fini d'extremums stricts.
- Donc toute fonction de période T répondant aux conditions précédentes peut être développée en série de Fourier de la forme :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (3.11)$$

où a_0 , a_n et b_n indiquent les coefficients de Fourier

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (3.12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin \frac{2\pi n t}{T} dt$$

a_n représente le niveau duquel on commencera l'observation de la fonction. En général, il est fixé à zéro alors $a_0 = 0$.

L'analyse de Fourier peut aussi être utilisée pour le traitement des fonctions qui ne sont pas périodiques de façon évidente. Ceci par la transformée de Fourier :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt \quad (3.13)$$

La transformation inverse est possible

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.14)$$

Les fonctions $f(t)$ et $F(\omega)$ représentent le même signal dans les domaines du temps et de la fréquence, elles sont de même dimensions. Elles sont appelées couple de Fourier.

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$$

La fonction $F(\omega)$ s'appelle densité spectrale et $|F(\omega)|$ s'appelle densité d'amplitude.

2.5.1 Caractéristique des signaux en temps et en fréquence

Pour un processus mécanique décrit par une fonction $f(t)$, on définit :

L'énergie instantanée : $E(t) = |f(t)|^2 \quad (3.15)$

L'énergie totale : $\bar{E}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt \quad (3.16)$

Cette énergie est ramenée à un intervalle de temps T pour donner la puissance moyenne :

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (3.17)$$

La limite si elle existe représentera la densité de la puissance :

$$P(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (3.18)$$

$$P(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} E(t) dt \quad (3.19)$$

Dans le domaine des fréquences on peut définir, l'énergie spectrale sous la forme suivante :

$$E(\omega) = |F(\omega)|^2 \quad (3.20)$$

L'énergie spectrale totale est représentée par l'expression :

$$\overline{E}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (3.21)$$

Puissance spectrale moyenne :

$$\overline{P}(\omega) = \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (3.22)$$

La densité spectrale de la puissance ;

$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (3.23)$$

L'expression $\frac{E(\omega)}{T}$ s'appelle densité spectrale de l'énergie.

2.5.2 Fonction de corrélation [18]

Très souvent des fonctions déterminées dans le temps comme la fonction d'autocorrélation ou de corrélation, sont aussi utilisées en analyse du signal.

Pour une fonction $f(t)$ décrivant un processus vibratoire, on définit la fonction d'autocorrélation par :

$$C_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) \cdot f(t + \tau) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - \tau) \cdot f(t) dt \quad (3.24)$$

De même, on peut définir la fonction de corrélation réciproque des fonctions $f_1(t)$ et $f_2(t)$

$$C_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) \cdot f_2(t + \tau) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t - \tau) \cdot f_2(t) dt \quad (3.25)$$

On peut prouver que :

$$C_{12}(\tau) = C_{21}(\tau) \quad (3.26)$$

Les fonctions de corrélation sont utilisées dans le cadre de la conditionnelle pour vérifier le contenu fréquentiel d'un signal $x(t)$; mesurer les retards liés à des phénomènes de propagation de deux signaux $f_1(t)$ et $f_2(t)$ dans un milieu donné.

L'analyse de l'allure de la fonction d'autocorrélation est très utile pour déterminer la largeur de bande d'un signal ne contenant que des fréquences comprises entre

$[-f_0, f_0]$. Dans ce cas, on démontre que l'allure de la fonction d'autocorrélation possède l'allure de la courbe représentée sur la figure 3.12.a pour un contenu fréquentiel correspondant à celui de la figure 3.12.b

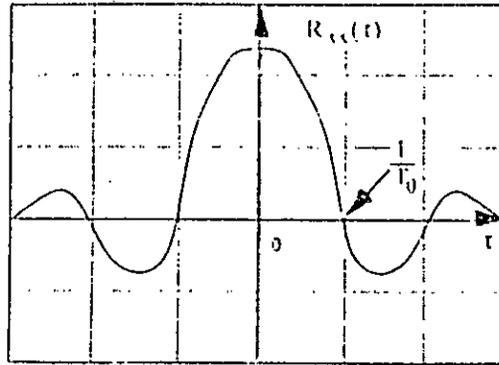


Figure 3.12 : Allure de la fonction d'autocorrélation

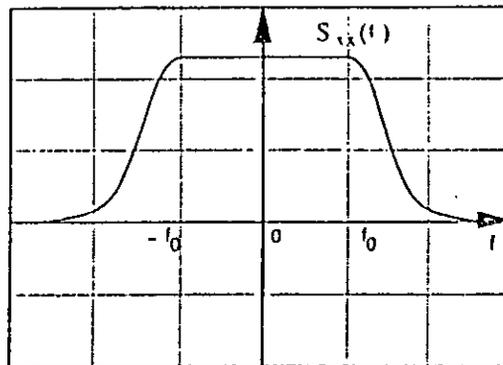


Figure 3.13 : Allure de la densité spectrale de puissance

La fonction d'intercorrélation est aussi utilisée pour mesurer un retard de transmission τ entre deux points A et B (en supposant l'absence de bruit, et d'atténuation du signal $f_1(t)$)

On démontre que :

$$C_{11}(t - \tau) = C_{12}(\tau) \quad (3.27)$$

La lecture directe du graphe de la fonction d'intercorrélation permet l'évaluation du retard.

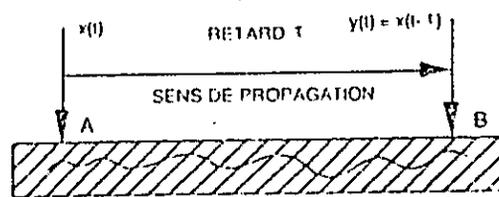


Figure 3.48. Propagation d'un retard entre deux signaux

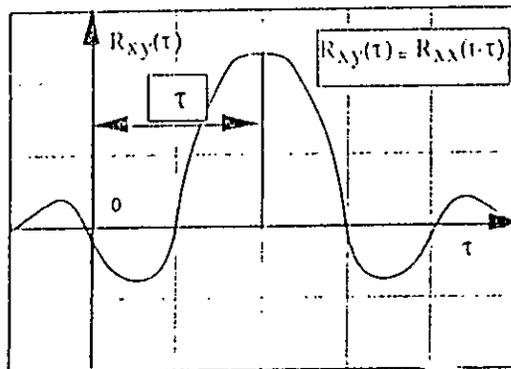


Figure 3.49. Calcul du retard entre deux signaux avec la fonction d'interc.

Nous allons à présent analyser une dépendance entre la fonction d'autocorrélation et le spectre d'énergie pour un processus décrit sous la forme de la fonction $f(t)$:

Théorème de *Weïner-Cninchin* :

$$E_{11}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{11}(\tau) \cdot e^{i\omega\tau} d\tau \quad (3.28)$$

où

$$C_{11}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{11}(\omega) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.29)$$

cela indique que : $E_{11}(\omega) \Leftrightarrow C_{11}(\tau)$

De la même façon ce théorème peut être présenté pour deux fonctions $f_1(t)$ et $f_2(t)$

$$E_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{12}(\tau) \cdot e^{i\omega\tau} d\tau \quad (3.30)$$

où

$$C_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{12}(\omega) \cdot e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (3.31)$$

2.5.3 Fonction de cohérence

On peut exprimer la cohérence des fonctions $f_1(t)$ et $f_2(t)$ par un coefficient de cohérence défini par :

$$\gamma_{12}^2(\omega) = \frac{|E(\omega)|^2}{[E_{11}(\omega) \cdot E_{22}(\omega)]} \quad (3.32)$$

De cette relation

$$0 \leq \gamma_{12}^2(\omega) \leq 1$$

Cette fonction possède des applications particulièrement précieuses dans la surveillance vibratoire des machines tournantes. En effet, on instrumente souvent les machines tournantes avec plusieurs capteurs fixés à des endroits différents. La fonction de cohérence entre deux permet d'évaluer si ces capteurs perçoivent les mêmes informations, si c'est le cas, la fonction de cohérence sera sensiblement égale à 1.

Le spectre de la fonction $f(t)$ peut être transformé la deuxième fois.

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega) \Leftrightarrow \bar{f}(\bar{t})$$

Le deuxième spectre $\bar{f}(\bar{t})$ s'appelle le scepstre et son argument \bar{t} a une dimension de temps et s'appelle quéfrence.

En pratique le scepstre est défini comme suit :

$$\bar{f}(\bar{t}) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \log |F(\omega)|^2 e^{-i\omega\bar{t}} d\omega \right]^2 \quad (3.33)$$

Le scepstre représente un autre domaine d'étude du signal [19].

2.6 Interprétation des résultats [1], [14]

Suivant qu'on s'intéresse à la surveillance en exploitation ou bien au diagnostic, nous utiliserons les outils les mieux adaptables ainsi que la forme du signal la plus appropriée. Pour tous les besoins de la surveillance, indication, enregistrement, surveillance de seuil, il y a lieu de convertir les signaux en signaux redressé (dit DC de l'anglais Direct Current) et ceci pour le calcul des caractéristiques telles que la valeur crête, la valeur moyenne, la valeur efficace (équation 3.7).

Des seuils de vibrations admissibles en exploitation sont en vigueur dans les pays industrialisés. Nous citerons à titre d'exemple les recommandations très connues de VDI 2056 et VDI 2059 (Verein Deutscher Ingenieur). Des seuils de vibrations pour différentes tailles de machines tournantes (Normes AFNOR) sont résumés dans la figure ci-dessous :

| | | | | |
|----------|-------------------------|-----------------------------|---|--|
| | Non toléré | Non toléré | Non toléré | Non toléré |
| | | | | Juste tolérable |
| | | Juste tolérable | Juste tolérable | Permis |
| | Juste tolérable | Permis | Permis | Bon Machines lourdes sur fondations rigides avec vitesses de rotation > à la fréquence naturelle de leurs fondation |
| | Permis | Bon Puissance 15 - 300KW | Bon Machines lourdes sur fondations rigides avec vitesses de rotation > à la fréquence naturelle | |
| | Bon Puissance <15 KW | | | |
| Groupe K | Groupe M | Groupe G | Groupe T | |

Figure 3.14 : Classe de vibration pour différentes machines tournantes norme AFNOR

Concernant le diagnostic, à l'heure actuelle l'établissement d'une métrologie rigoureuse (régie par des formules mathématiques par exemple) n'est pas possible du fait de la nature même de ce processus (activité intellectuelle complexe). Cependant et en se basant sur les résultats acquis le long de plusieurs années de pratique on peut tracer les grandes lignes de cette activité.

Le traitement des signaux industriels conduit toujours à des spectres présentés par courbes continues de nombreux pics. La présence de pics indique que le signal contient des composants périodiques. Le fond continu est dû à la présence de bruit.

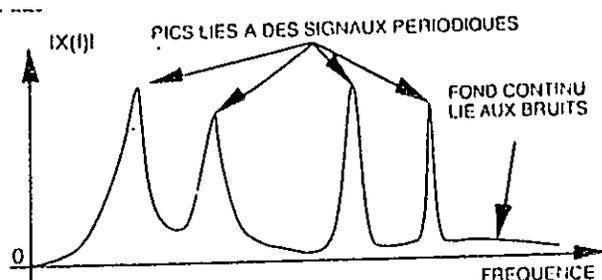


Figure 3A4: Interprétation d'un spectre d'un signal industriel

En supposant que le calcul des spectres est correctement effectué, l'interprétation des pics sur ces signaux spectraux conduit les spécialistes à diagnostiquer les défaillances. Pour les machines tournantes, en connaissant la vitesse de rotation de la machine, on peut interpréter physiquement les pics relevés.

Les principales anomalies apparaissant sur les machines tournantes sont rappelées brièvement ci-dessous :

Balourd :

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Ce phénomène est causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante.

Désalignement :

Le désalignement se produit lorsque deux machines tournantes sont couplées entre elles sur un même axe géométrique. Si les deux axes ne sont pas parallèles on observe des vibrations induites par le désalignement. Pour réduire ce phénomène on place entre les deux machines un dispositif d'accouplement qui joue le rôle de filtre et d'amortisseur mécanique.

Problèmes rencontrés sur les paliers :

Pour les paliers (lisses à billes, à rouleaux), on observe des vibrations induites par les problèmes liés à la lubrification et aux frottements. Le phénomène majeur causé par la lubrification est la rupture du film d'huile entre les différentes pièces des paliers.

On observe alors des signaux vibratoires qui se traduisent par un foisonnement de raies dans le spectre vibratoire. Pour les paliers lubrifiés par des fluides sous pression, des phénomènes de tourbillons d'huile peuvent apparaître si la quantité de lubrifiant est excessive.

Problèmes rencontrés sur les engrenages :

Les engrenages donnent naissance à deux types de vibrations dont les fréquences dépendent soit de la nature des matériaux, soit des vitesses de rotation des différents engrenages. On définit la vitesse d'engrènement f_e comme étant le produit de la fréquence de rotation f_r et du nombre de dents N_d :

$$f_e = f_r \cdot N_d$$

En présence d'usure, le signal vibratoire est un signal modulé en amplitude dont le spectre est composé d'un ensemble de raies très dense et difficile à interpréter pour déterminer l'état de santé des engrenages comme les engrenages sont utilisés pour multiplier ou réduire une vitesse, on obtient des fréquences qui correspondent au plus petit commun multiple entre les nombres de dents N_1 et N_2 des deux pignons. Pour les engrenages utilisant plusieurs pignons (boîte de vitesse d'une automobile par exemple), il faut prendre en compte, deux à deux tous les couples de pignons.

Vibrations induites par les jeux mécaniques :

Toutes les machines sont réalisées avec des éléments mécaniques assemblés avec des jeux mécaniques dont les tolérances sont définies à la conception. Après un certain nombre d'heures de fonctionnement, les jeux mécaniques s'amplifient et donnent lieu à des vibrations souvent de nature non linéaire. Le spectre vibratoire contient des sons harmoniques de la vitesse nominale de rotation.

Le tableau 3.1 indique les fréquences caractéristiques associées aux principaux défauts qui surviennent sur des machines tournantes.

Tableau 3.1: Les Fréquences associées aux principaux défauts survenant sur les machines tournantes

| Nature du défaut | Fréquence dominante (Hz = (r/s) V_{rot} = vitesse de rotation) | Direction |
|---|--|-------------------|
| Pièce tournantes déséquilibrées | $1 \times V_{rot}$ | Radiale |
| Désalignement et torsion des axes | Normalement $1 \times V_{rot}$ Souvent $2 \times V_{rot}$ Quelquefois $3,4 - 5 \times V_{rot}$ | Radiale et axiale |
| Portées endommagées ou roulements cassés | Nombre d'impacts en fonction de la composition du roulement Également vibration hautes fréquences (2 à 60 KHz) liées aux résonances des paliers | Radiale et axiale |
| Jeu des portes flottantes dans leurs cages | Sous-harmonique de V_{rot} de l'axe $1/2$ ou $1/3 \times V_{rot}$ | Surtout radiale |
| Fouettement à l'huile (oil whirl) dans les paliers lisses | Légèrement inférieur à $1/2 \times V_{rot}$ (42% à 48%) | Surtout radiale |
| Fouettement d'hystérésis | Vitesse critique de l'arbre | Surtout radiale |
| Engrenages usés ou endommagés | Fréquence d'engrènement ($V_{rot} \times$ nombre de dents) et harmoniques | Radiale et axiale |
| Jeux mécaniques | $2 \times V_{rot}$ et $0,5 ; 1,5 ; 2,5 ; 3,5 \times V_{rot}$ | Radiale |
| Mauvaise transmission | $1 ; 2 ; 3 ; 4 \times V_{rot}$ de la courroie | Radiale |
| Tourbillon d'huile dans le coussinet | Inférieur à $0,5 \times V_{rot}$; (0,42 - 0,48) | |
| Force et couples de déséquilibre | $1 \times V_{rot}$ et/ou multiples pour déséquilibres d'ordres plus élevés | Surtout radiale |
| Augmentation des turbulences | Fréquences de passage et harmoniques | Radiale et axiale |

L'exemple de la figure 3.15 détaille la signification physique des différents pics observés en se basant sur l'expertise contenue dans le tableau précédent.

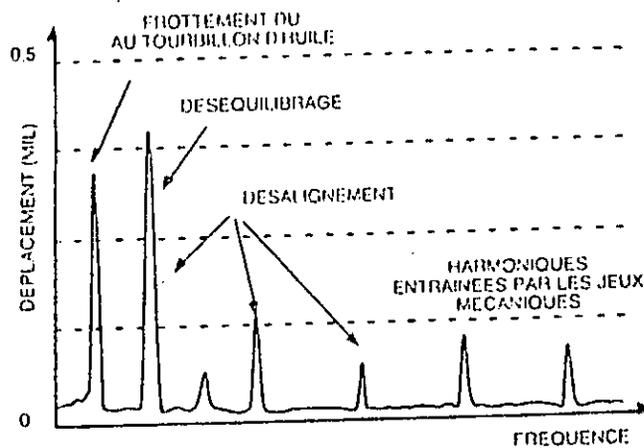


Figure 3.15 Interprétation fine du signal vibratoire

C'est grâce à cette signature vibratoire que les industriels sont en mesure de déterminer l'état de santé d'un parc de machines tournantes, dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle.

3. Signatures par analyse des lubrifiants [20], [21]

Deux paramètres importants conditionnent la lubrification correcte des machines tournantes : l'état du lubrifiant et l'état des surfaces lubrifiées. Les analyses d'échantillons du fluide permettent de déterminer d'une part les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'identifier une usure des éléments mécaniques. Deux facteurs prépondérants interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiants :

- la dégradation.
- la contamination

3.1 Dégradation des lubrifiants

L'analyse de la dégradation s'intéresse aux propriétés des caractéristiques physico-chimiques et moléculaire du lubrifiant.

- La mesure de la viscosité à 40 °C
- La mesure de la viscosité à 100 °C
- L'indice de viscosité
- L'indice d'acidité ou d'alcalinité
- L'aspect...etc.

Les évolutions des propriétés moléculaires de l'huile et de ses additifs sont généralement suivies par des analyses spectrographiques, notamment dans le domaine infrarouge.

3.2 Contamination des lubrifiants

La contamination du lubrifiant provient de particules d'usure de pièces internes, mais aussi de l'eau et des particules solides en provenance de l'intérieur du système lubrifié. Ces particules solides ou ces fluides étranges sont souvent à l'origine d'usure anormales. Plusieurs méthodes sont utilisées pour étudier l'importance et la nature de la contamination, on distingue :

a) La contamination globale

La contamination globale est réalisée par ultracentrifugation et fournit la masse d'eau et de sédiment. Cette méthode facile à mettre en œuvre ne permet cependant pas de surveiller l'état d'une machine.

b) La mesure de pollution gravimétrique

La méthode consiste à filtrer sous vide un volume de lubrifiant à l'aide de deux filtres superposés de même porosité nominale de $0,8 \mu\text{m}$. Après pesée de chaque filtre, on peut ainsi déterminer la teneur en impuretés solides. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une grande précision dans son utilisation, ce qui constitue un obstacle dans le cadre d'une surveillance continue. Néanmoins, cette technique offre un moyen simple d'évaluation du niveau de contamination.

c) Filtration sur membranes

Cette technique de filtration est simple et ne nécessite pas d'équipements sophistiqués. On prélève une faible quantité de lubrifiant que l'on dépose sur une membrane. En observant la densité de la tache et en la comparant à des cartes préétablies, il est possible de fournir directement une estimation du taux de contamination.

d) La spectrométrie d'émission

Les atomes, portés à de hautes températures (aux environs de 10000 K), émettent un rayonnement, dont la longueur d'onde est caractéristique de la nature de l'élément et d'intensité proportionnelle à la contamination. Cette caractéristique est utilisée pour obtenir la contamination des différents éléments (métaux et métalloïdes) dans le lubrifiant. L'inconvénient de cette méthode est d'être relativement imprécise, si les particules ont des dimensions inférieures à une dizaine de microns.

e) L'absorption atomique

Un volume donné du lubrifiant est calciné et les cendres obtenues sont dissoutes dans un solvant approprié. Il est alors possible de déterminer, avec une très grande précision, les éléments métalliques. Cependant, cette méthode est longue et coûteuse.

f) La ferrographie

La ferrographie ne concerne que la détection de particules magnétiques ou ayant acquis un certain magnétisme, comme les particules ferromagnétiques (entre $1 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$), ou les particules de métaux non ferreux (bronze, aluminium, ...) devenues légèrement magnétiques par contact avec les métaux ferreux.

L'avantage de cette méthode est d'éliminer les particules organiques provenant par exemple des joints d'étanchéité.

g) Comptage de particules

La technique de comptage de particules est principalement utilisée pour contrôler le niveau de contamination des fluides hydrauliques, en service dans les installations à haut niveau de propreté, elle utilise le microscope optique et les systèmes de comptage automatique, utilisant des méthodes de transmission de la lumière.

h) Observation des dépôts fixes

En présence d'une usure sévère, le lubrifiant véhicule des particules métalliques d'une taille supérieure à 100 μm . La pose de bouchon magnétique « Auto-obturant » permet, par contrôle visuel, de vérifier la présence de ces gros débris annonciateurs en général, d'une défaillance très proche de la machine.

3.3 Conclusions et recommandations

L'analyse des lubrifiants permet une détection précise des mécanismes d'usure survenant sur les machines tournantes. La fiabilité des conclusions dépend principalement de la qualité de la prise des échantillons de lubrifiant. Aussi, faudrait-il veiller à :

- Prélever l'huile dans une zone où elle est soumise à un broyage permanent.
- Utiliser des procédures draconiennes pour s'assurer de la propreté des systèmes de prélèvement et d'analyse.

4. Signatures acoustiques [22]

Les signatures acoustiques sont principalement utilisées pour la détection de fuites externes et internes, qui peuvent apparaître dans les matériels sous pression tels que les tuyauteries, les raccords, les réservoirs ...etc. Le bruit produit par l'écoulement du fluide à travers les fissures et les orifices permet la détection des failles. Les signatures acoustiques sont très évolutives au cours du temps, leurs interprétations sont extrêmement délicates et exigent un très haut niveau d'expertise.

5. Signatures par émission acoustique [22]

La rupture des structures granulaires (tel l'acier), sous l'effet des contraintes, libère de l'énergie qui caractérise par l'émission d'ondes acoustiques, sous la forme de trains d'impulsion aléatoires très brèves détectables avec une instrumentation appropriée. L'utilisation de plusieurs capteurs permet, par des techniques de triangulation, de localiser la zone où le métal subit une fatigue excessive. L'évaluation du niveau de fatigue se déduit du calcul de l'énergie des signaux d'émission acoustique.

Pratiquement, la présence de beaucoup de sources parasites, ainsi que la grande difficulté d'interprétation des signatures, ont fortement restreint le champ d'application de cette technique.

6. Signatures ultrasonores [1]

L'inspection par ultrasons repose sur l'analyse des échecs observés après émission d'un faisceau d'ondes ultrasonores. Un capteur palpeur composé de matériaux piézo-électriques envoie un train d'ondes ultrasonores, celles-ci se propagent dans le matériau à contrôler, et en présence d'un défaut de surface (fissure ou défaut interne), une partie du signal incident est réfléchi et détectée par le capteur palpeur. L'analyse du retard entre le signal d'émission et l'écho permet sa localisation dans le matériau. Ensuite, l'analyse de la forme permet aux spécialistes de déterminer la géométrie et la nocivité éventuelle du défaut. Cette méthode de contrôle non destructif est très utilisée pour la détection de fissures dans les différents éléments des matériels (tuyauteries, enceintes sous pression, soudures, boulons, etc...)

7. Signatures par courants de Foucault [1]

Lorsqu'un conducteur est soumis à un champ magnétique externe produit par une bobine située à proximité, il se crée au sein du volume concerné des courants induits appelés courants de Foucault, ceux-ci induisent à leur tour des courants qui peuvent être captés dans la bobine d'excitation ou dans une bobine réceptrice placée à proximité. Si un défaut vient perturber la circulation des courants de Foucault (fissure, dépôts, etc ...), le coefficient d'induction mutuel varie, ce qui se traduit par une variation d'impédance de la bobine. L'analyse de cette impédance permet de caractériser le défaut.

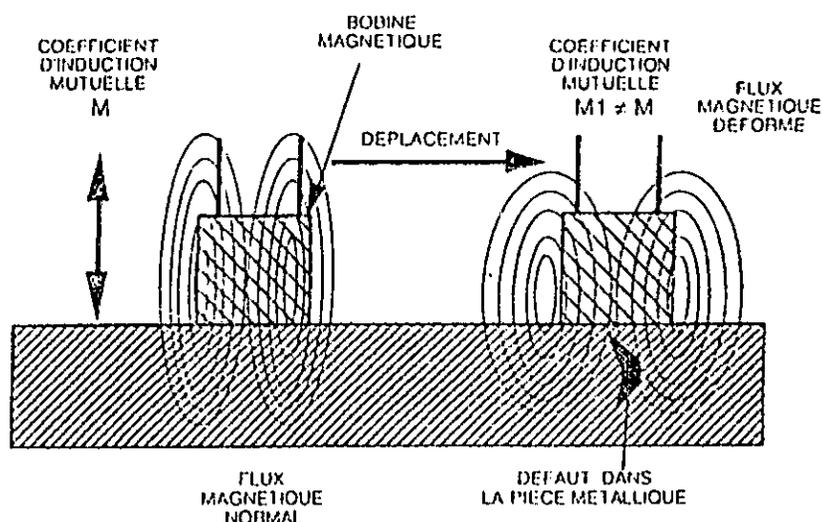


Figure 3.16 Principe de l'inspection par courants de Foucault

En pratique l'interprétation des signaux de Foucault est très complexe en raison des nombreuses sources de bruits parasites induits, par exemple par l'état de surface.

8. Signature thermique [1]

Deux types de signatures de températures sont utilisés en diagnostic industriel :

8.1 Mesure avec contact

Les signatures thermiques sont fournies par des capteurs qui peuvent être des thermocouples, des sondes à résistances ou des capteurs à fibres optiques, fixés directement sur les parties des matériels à surveiller. Les gammes de températures ainsi mesurées dépassent rarement 100 °C.

8.2 Mesure sans contact

Tous les objets placés à une température supérieure au zéro absolu (0 K) émettent de l'énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde se situent en majorité dans le domaine infrarouge ($1\mu\text{m} \leq \lambda \leq 100\mu\text{m}$), l'intensité de la longueur d'onde, dépend de la température et de l'état de surface du corps considéré.

Les signatures thermiques sans contact sont basées principalement sur la détection du flux infrarouge émis par la partie du matériel à surveiller.

Le principe des détecteurs infrarouge repose sur la conversion du flux infrarouge en un signal électrique à l'aide de détecteurs thermiques ou quantiques.

Parmi les nombreuses technologies disponibles, les plus utilisées sont les suivantes :

- Les pyromètres et radiomètres qui donnent des mesures ponctuelles.
- Les scans de lignes qui donnent une ligne de mesure d'environ 100 points.
- Les caméras infrarouges qui fournissent une image bidimensionnelle traitée ensuite par la technique dite de « fausses couleurs ».

Moyennant quelques précautions (protection contre les rayonnements par exemple), l'imagerie infrarouge s'est révélée être une technique très performante pour la surveillance thermique des machines.

9. Signatures radiographiques, gammagraphiques et neutrographiques [1]

A partir d'une source appropriée (X, gamma, neutrons), on envoie un flux de radiation qui traverse le matériau à contrôler. En présence de défaut volumique, la transmission du flux sera modifiée et le détecteur approprié (film radiographique, diapositive électronique), fournira un cliché bidimensionnel contenant l'information utile.

10. Signatures temporelles [1]

Les signatures temporelles représentent les évolutions au cours du temps, de paramètres significatifs du bon fonctionnement. Pour la robinetterie par exemple, elles permettent de vérifier si les temps critiques de fermeture ou d'ouverture sont conformes aux spécifications fonctionnelles.

11. Signatures diverses [1]

En dehors des signatures décrites dans les paragraphes précédents et utilisées pour la résolution de la majorité des problèmes de maintenance industrielle, les signatures obtenues par les technologies suivantes sont utiles pour certains domaines spécifiques :

- Le ressuage pour la détection visuelle de fissures ; on recouvre la surface à inspecter par un liquide spécial qui est absorbé par la fissure. Après nettoyage et avec un éclairage spécial (ultraviolet), il est possible de voir la fissure en superficie.

- La chromatographie en phase gazeuse (CPG) pour la détection de composants particuliers.

- La réflectométrie pour la détection de défauts dans des câbles électrique ; on injecte une impulsion très courte de tension dans le câble, en présence de mise à la masse ou de perte de résistance de l'isolant, on observe un écho au retour permettant la localisation du défaut.

- La spectroscopie ultraviolet pour les lubrifiants.

- La mesure d'efforts et de contraintes pour détecter des efforts anormaux sur des structures.

- La mesure de corrosion électrochimique pour des structures métalliques enfouies.

- Les mesures d'état de surface par endoscopie et faisceau laser.

- Les hyperfréquences pour la mesure d'humidité des matières premières.

- Les gaz traceurs tels que l'hélium pour la détection et la localisation de fuites : on pressurise le matériel à inspecter avec un gaz traceur que l'on détecte du côté non pressurisé à l'aide de spectromètre de masse. Cette technique est utilisée dans les générateurs de vapeur.

- Les techniques laser pour la détection de vibrations à distance : on dirige un faisceau laser basse puissance sur la partie de la machine qui vibre et ensuite, à l'aide de l'effet Doppler, on peut déduire la vitesse de déplacement.

- La détection de particules dans les gaz: en présence de particules, le faisceau laser sera absorbé et réfléchi par l'émetteur récepteur avec un niveau proportionnel à la densité et à la nature des particules. Elle est de plus en plus utilisée pour détecter la pollution des moteurs Diesel mal réglés.

- Les procédés magnétiques à l'aide de poudres et de liqueurs magnétiques pour la détection de défauts de surface ; on recouvre la surface d'une liqueur contenant des particules magnétiques très fines qui pénètrent dans la fissure. Après enlèvement du fluide résiduel, on saupoudre la surface avec de la limaille de fer qui reste attirée par les particules magnétiques, permettant ainsi leur visualisation.

- L'analyse radiofréquence pour la détection des arcs électriques : des ondes électromagnétiques sont émises en présence d'arc électrique et captées par des détecteurs goniométriques.

La figure suivante représente les domaines d'application de l'analyse de signatures et les gammes de fréquence associées pour le diagnostic industriel.

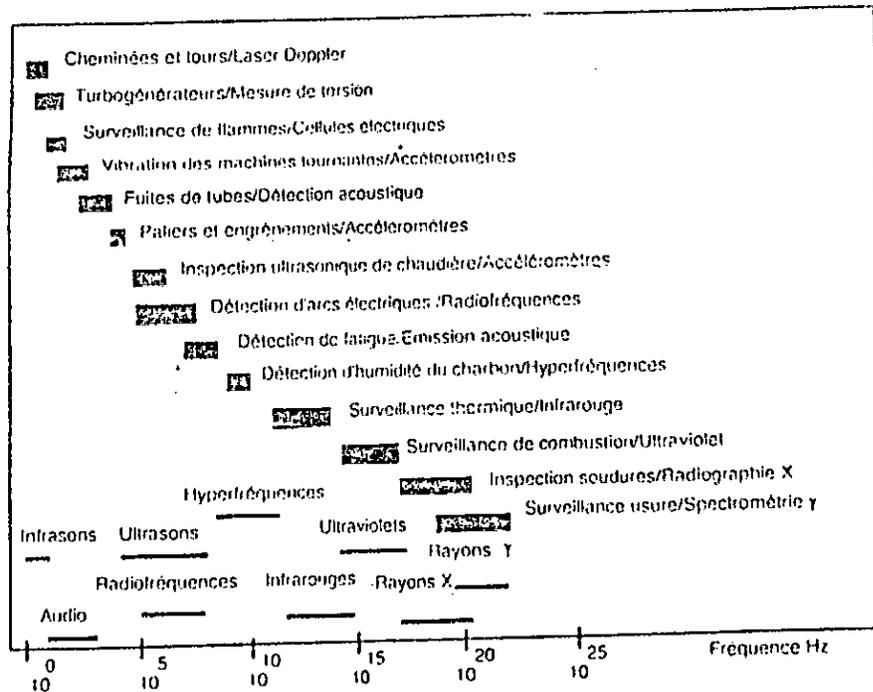


Figure 3.16 Echelle des fréquences des signaux utilisés en maintenance

Chapitre 4

Bases Mathématiques de la Maintenance

1. Introduction

Afin d'optimiser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement des systèmes techniques nous introduisons le concept de maintenance basée sur la fiabilité:

2. Maintenance et fiabilité [1], [22], [23]

2.1 Fiabilité (Reliability)

La norme NF X60 - 500 définit la fiabilité comme étant: « l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné ».

On mesure la fiabilité par la fonction fiabilité $R(t)$ définie comme suit:

$$R(t) = P \{ \text{pas de défaillance sur un intervalle } [0, t] \} \\ \text{en supposant qu'il n'y a pas de défaillance à } t = 0 \}$$

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (4.1)$$

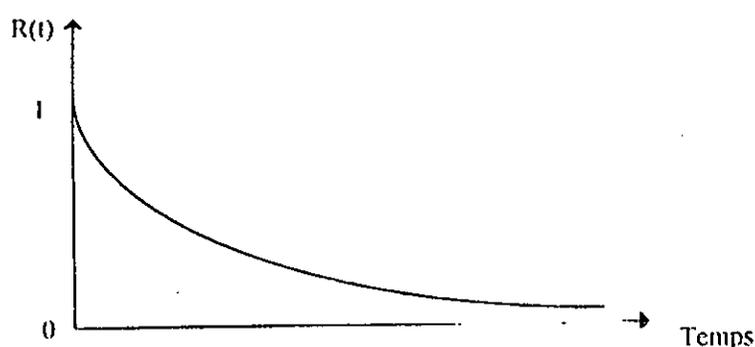


Figure 4.1 : Allure de la fonction de fiabilité

2.2 Défaillance

On définit aussi, la fonction défaillance $F(t)$ complémentaire à 1 de la fonction fiabilité:

$F(t) = P \{ \text{Défaillance sur } [0, t], \text{ en supposant qu'il n'y a pas de défaillance à } t=0 \}$

$$F(t) = P(T < t) \quad (4.2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4.3)$$

La fonction densité de défaillance sera donc:

$$\varphi(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (4.4)$$

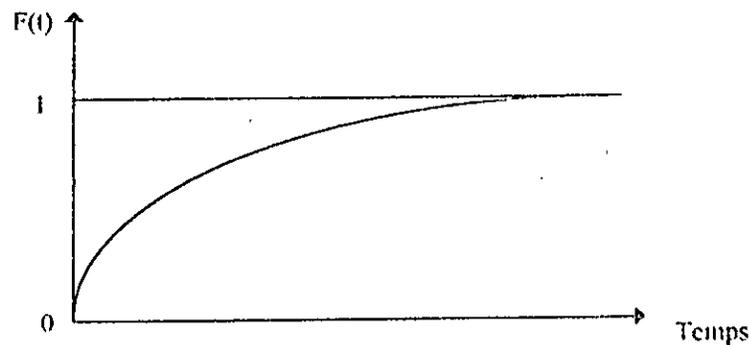


Figure 4.2 : Allure de la fonction de défaillance

2.3 Taux instantané de défaillance:

Le taux de défaillance est définie par la norme NF X60 - 500 par:

“La limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l’instant d’une défaillance d’une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t + \Delta t]$, que la durée Δt de l’intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro sachant que l’entité n’a pas été défaillante entre 0 et t ”.

On définit la fonction « Risque de panne » λ :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (4.5)$$

La représentation graphique d’une telle fonction est souvent une courbe en baignoire, dont on analysera la forme par la suite.

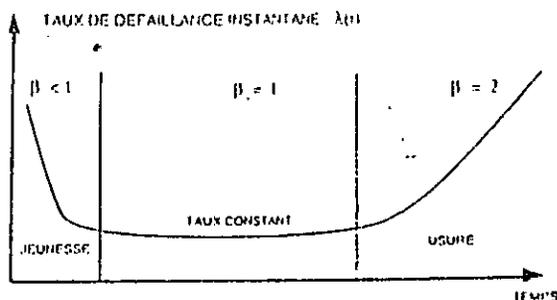


Figure 4.3 Allure du taux de défaillance pour la loi en baignoire

On déduit une nouvelle forme de la fonction fiabilité

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \Rightarrow R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right) \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right) \quad (4.7)$$

2.2.1 Analyse de la courbe en baignoire :

Cette courbe représente le risque de panne en fonction du temps, on distingue trois grandes périodes:

- *Les défaillances de jeunesse:* Le taux de défaillance va en diminuant. Ceci s'explique par le fait que certains composants sont mis en fonctionnement alors qu'ils sont viciés au départ, par une malfaçon lors de la fabrication.

A titre de prévention, on pratique un déverminage, cela consiste à mettre en fonctionnement pendant un certain temps les composants avant de les livrer au client, cette étape correspond au rodage pour les systèmes mécaniques.

- *Les défaillances de maturité:* Cette dernière période est caractérisée par un taux de défaillance sensiblement constant. (Il est légèrement croissant pour les équipements mécaniques).

- *Les défaillances de vieillesse:* Cette période présente d'importants phénomènes de dégradation. Le taux de défaillance y est croissant, ceci correspond aux phénomènes de fatigue et d'usure des matériaux.

2.4 Le MTBF (Mean Time Between Failures)

On exprimera l'espérance des temps de bon fonctionnement par:

soit moyennes

$$\bar{T} = \int_0^{+\infty} t \varphi(t) dt \quad (4.8)$$

En Intégrant par partie, on trouve :

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (4.9)$$

2.5 Estimation des fonctions de fiabilité dans le cas discret

On suit en fonctionnement au même instant $t = 0$ un grand nombre $N(0)$ d'équipements identiques dans les mêmes conditions et à un intervalle régulier, on observe le nombre d'équipements survivants.

On définit:
$$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (4.10)$$

$$\lambda(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)} \quad (4.11)$$

$$\varphi(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(0)} \quad (4.12)$$

$$MTBF = \sum_i t_i \varphi(t_i) \quad (4.13)$$

2.6 Disponibilité (Availability) [1]

La norme NF X 60-500 définit la disponibilité comme étant: "L'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée".

On exprime la disponibilité par:

$$A(t) = P \{ \text{non défaillant à l'instant } t \} \quad (4.14)$$

et l'indisponibilité par:

$$\bar{A}(t) = 1 - A(t) \quad (4.15)$$

Remarque: La disponibilité $A(t)$ est une grandeur instantanée et à ne pas confondre avec la fiabilité $R(t)$ qui est une grandeur mesurée sur une durée.

Les grandeurs moyennes les plus courantes, associées à la disponibilité sont:

- Le *TMD* (Temps Moyen de Disponibilité) ou durée de bon fonctionnement après réparation, ou bien *MUT* (Mean Up Time) la durée moyenne de fonctionnement après réparation et avant la défaillance suivante.
- Le *TMI* (Temps Moyen d'Indisponibilité) ou durée moyenne d'indisponibilité ou *DMT* (Mean Down Time) durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante.

- La durée moyenne entre défaillance *MTBF*, en général

$$MTBF = MUT + MDT \quad (4.16)$$

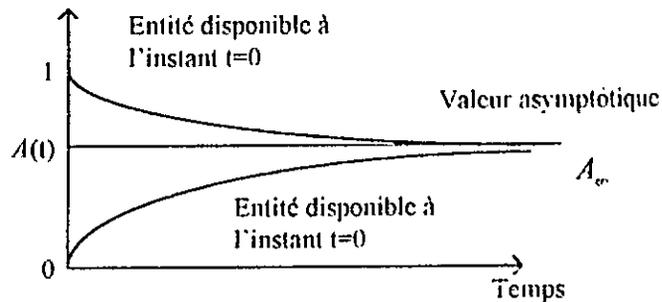


Figure 4.5 : Disponibilité en fonction du temps *t*

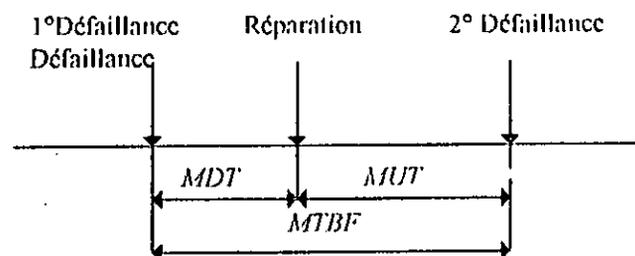


Figure 4.6 : Représentation *MTBF*, *MDT* et *MUT*

On définit l'indisponibilité asymptotique par

$$A_{\infty} = \frac{MUT}{MTBF} \quad (4.17)$$

Pour les industries disposant d'équipes performantes de maintenance, la valeur A_{∞} est de quelque pour-cent.

3. Principales lois de défaillance des matériels [1], [22]

Les nombreuses études statistiques conduites sur les modes de défaillance de matériels des systèmes industriels démontrent que la grande majorité des modes de défaillance suivent quatre lois fondamentales de probabilité:

- La loi Exponentielle
- La loi Normale
- La loi Log-Normale
- La loi de Weibull

Le tableau suivant fournit quelques exemples relatifs à des modes élémentaires de défaillance[1].

Tableau 4.1: Lois de probabilité associées à des modes de défaillance physiques

| Densité de probabilité | | | | |
|---------------------------------|---------------|---------|-------------|---------|
| Mode élémentaire de défaillance | Exponentielle | Normale | Log-Normale | Weibull |
| Déformation | | | | • |
| Rupture | • | | | |
| Limites élastiques | • | | | |
| Corrosion | | • | • | • |
| Fluage | | • | | |
| Fatigue | | | • | • |
| Érosion | | | | • |
| Usure | | | | • |

3.1 Étude du modèle exponentiel

La loi exponentielle est d'un usage privilégié dans le domaine de l'électronique pour modéliser les défaillances.

La fonction de densité d'un tel modèle est:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (4.18)$$

La fonction défaillance s'obtient par l'intégrale:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.19)$$

Et finalement la fonction fiabilité:

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

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.20)$$

Le taux de défaillance est constant:

$$\lambda(t) = \lambda \quad (4.21)$$

Par conséquent, une défaillance peut survenir à n'importe quel moment. Il n'existe pas de durée de vie moyenne sûre et économique pour les matériels dont les défaillances sont régies par cette loi.

Les moteurs en général ont une fonction de suivi de ce type.

3.2 Étude du modèle Normal

Une caractéristique x de moyenne μ et de variance σ^2 suit une loi normale, alors sa fonction de densité est:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.22)$$

sa fonction de défaillance est:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4.23)$$

$$F(t) = \phi(t)$$

$\phi(t)$: fonction de Laplace

La fonction de fiabilité:

$$R(t) = 1 - \phi(t) \quad (4.24)$$

On démontre que le taux de défaillance est égal à

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{1 - \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)} \quad (4.25)$$

La figure suivante donne l'allure du taux de défaillance, pour une loi Normale centrée réduite $N(0, 1)$. Nous remarquons que pour cette loi le taux de défaillance est toujours croissant :

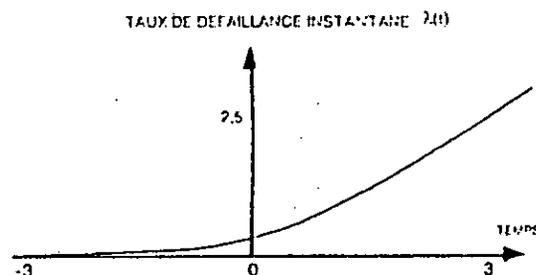


Figure 4.7 Allure du taux de défaillance pour la loi normale

3.3 Étude du modèle Log-Normal

Ce modèle représente bien les phénomènes de fatigue en mécanique, la densité de probabilité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[\frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} \right] \quad (4.26)$$

La fonction de défaillance sera donc :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4.27)$$

La fonction de fiabilité

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4.28)$$

Le taux de défaillance n'est pas constant dans le temps, le *MTBF* est donné par :

$$MTBF = e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} \quad (4.29)$$

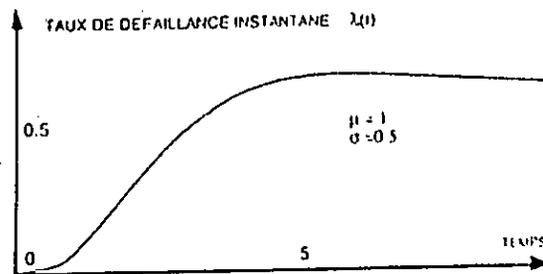


Figure 4.8. Allure du taux de défaillance pour la loi lognormale

3.4 Étude du modèle de Weibull

La loi de Weibull est très utilisée en mécanique, car en variant ses trois paramètres on peut s'ajuster à beaucoup de résultats expérimentaux.

Sa fonction de densité de défaillance est donnée par :

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.30)$$

- β : paramètre de forme (sans unité)
- η : paramètre d'échelle (unité de temps)
- γ : paramètre de position (unité de temps).

La fonction de défaillance est par conséquent :

$$F(t) = \frac{\beta}{\eta} \int_0^t \left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} dx$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{4.31}$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = 1 - \frac{\beta}{\eta} \int_0^t \left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} dx$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{4.32}$$

Le taux de défaillance sera donné par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{4.33}$$

L'étude de $\lambda(t)$ montre :

Si $\beta < 1$, on a $\lambda(t)$ qui décroît en fonction de t .

Si $\beta = 1$, on a $\lambda(t)$ qui est constant et égal à $\frac{1}{\eta}$.

Si $\beta > 1$, on a $\lambda(t)$ qui est croissant en fonction de t .

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{4.34}$$

Avec :

$$\Gamma(r) = \int_0^{+\infty} x^{r-1} e^{-x} dx \tag{4.35}$$

$x \in \mathbb{R} \quad r > 0$

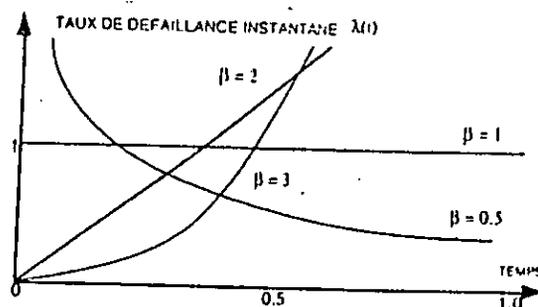


Figure 4.9 Allure des taux de défaillance pour la loi de Weibull

Remarques :

- Pour $\gamma = 0$ et $\beta = 1$ on retrouve la loi exponentielle ; en effet :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{loi exponentielle de paramètre } \lambda = \frac{1}{\eta})$$

- Pour $\beta \geq 3$ on se rapproche d'une loi Normale et ceci est d'autant plus vrai que β est grand.

3.4.1 Estimation des paramètres de la loi de Weibull [32]

L'estimation des paramètres de la loi de Weibull représente un problème essentiel. Nous développerons ici une méthode graphique (la plus utilisée) :

Graphique d'Allen PLAIT

Le graphique à échelle fonctionnelle utilisée est graduée de la façon suivante :

- en ordonnée, on a : $\text{LnLn} \frac{1}{1-F(t)}$
- en abscisse, on a : $\text{Log } t$

Cas $\gamma = 0$

Hypothèse que la loi est bien connue et qu'elle coïncide avec les données expérimentales.

Ceci nous donne :

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

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

donc :

$$\begin{aligned} \text{LnLn} \frac{1}{1-F(t)} &= \text{Ln} \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \\ &= \beta \text{Ln } t - \beta \text{Ln } \eta \end{aligned}$$

Posons :

$$X = \text{Ln } t$$

$$Y = \text{LnLn} \frac{1}{1-F(t)}$$

$$B = \beta \text{Ln } \eta$$

$$A = \beta$$

D'où on a :

$$Y = AX + B \quad \text{équation d'une droite}$$

En conclusion, si les données correspondent à une loi de Weibull de paramètre $\gamma = 0$, elles doivent s'aligner suivant une droite dans le graphique d'Allen PLAIT.

Calcul de β

β est le paramètre de forme, il représente la pente de la droite, pour l'obtenir, on fait passer une droite parallèle à la droite réelle par le point 1 et on lit la valeur de β sur l'échelle β .

Calcul de η

η est le paramètre d'échelle, il se lit à l'intersection de la droite tracée et de la ligne 63.2%.

Pour l'ordonnée $Y = 0$, on a $F(t) = 63.2$. En effet :

$$Y = \text{LnLn} \frac{1}{1-F(t)} = 0 ;$$

ce qui donne :

$$\begin{aligned} \text{Ln} \frac{1}{1-F(t)} = 1 &\Rightarrow 1-F(t) = e^{-1} \\ &\Rightarrow F(t) = 0.632 \end{aligned}$$

d'où pour $Y = 0$

$$\begin{aligned} \beta x &= \beta \text{Ln} \eta \\ x &= \text{Ln} \eta \end{aligned}$$

Comme $X = \text{Ln} t$, on a $t = \eta$

η est la valeur lue sur le graphique d'Allen PLAIT pour l'ordonnée 63.2 car l'échelle des abscisses est en $\text{Ln} t$.

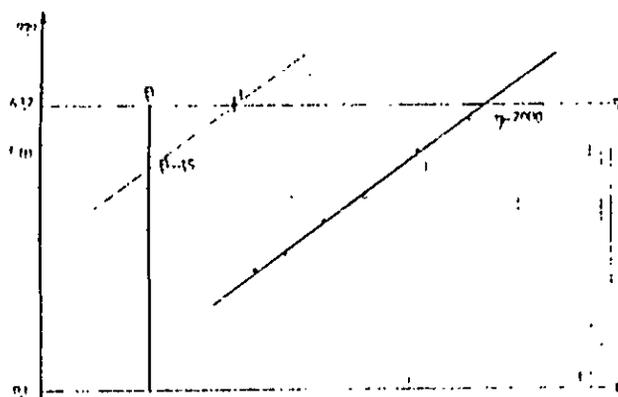


figure 4.7 Graphique d'une Loi de Weibull

Cas où $\gamma > 0$

Dans ce cas, les données ne se linéarisent pas, on obtient au contraire une courbe qui admet une asymptote verticale. L'intersection de l'asymptote et de l'abscisse nous permet une première estimation de γ .

En effet on a :

$$F(t) = 0 = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

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

$$-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta = 0$$

$$\Rightarrow t = \gamma$$

D'où l'estimation de γ .

Lorsque l'on a estimé γ on fait la correction

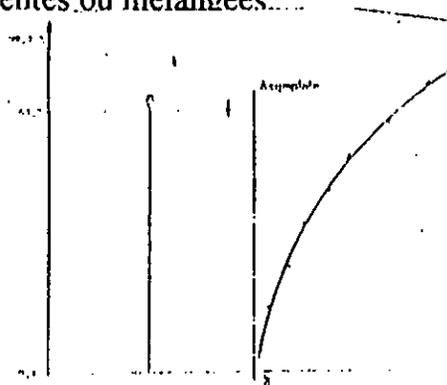
$$t' = t - \gamma$$

t' : nouveau temps

t : ancienne estimation

Ensuite, on reporte les nouvelles valeurs et on doit obtenir quelque chose qui se rapproche d'une droite. Si ce n'est pas tout à fait le cas on recommence l'opération., ceci au maximum trois fois et si l'on n'a toujours pas une droite, alors on peut conclure que l'on n'a pas une loi de Weibull, ou que l'on peut avoir des lois de Weibull à origines différentes ou mélangées.

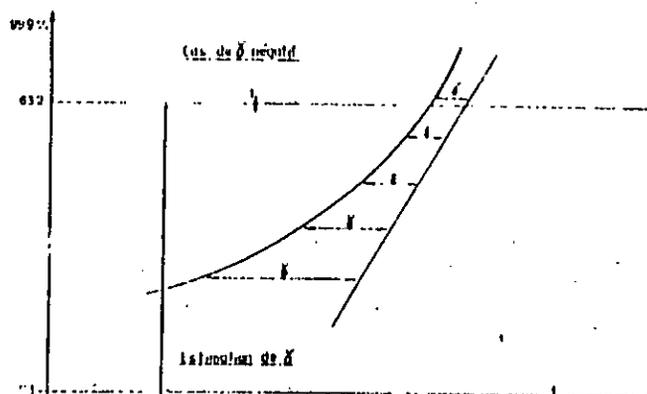
figure 4.8 :
Graphique pour
 $\gamma > 0$



Cas ou $\gamma < 0$

Dans ce cas on obtient une courbe qui admet une asymptote horizontale. La seule façon d'estimer γ est de procéder par essais successifs jusqu'à ce que la courbe soit redressée.

figure 4.9
Graphique pour
 $\gamma < 0$



3.4.2 Application pratique

On dispose d'un certain nombre de données, concernant un échantillon de taille (n) de la population à étudier.

La fonction de densité est donnée par :

$$f(i) = \frac{1}{n+1} \quad (4.36)$$

La fonction de répartition peut être estimée par la méthode des rangs médians ou la méthode des rangs moyens :

Méthode des rangs médians, où la fonction de répartition est donnée par la formule approchée :

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (4.37)$$

La valeur exacte est fournie par les tables de *Jhonson* [23]. Ces tables ont été calculées selon la formule:

$$F(i) = \frac{i \cdot F_{0,5}}{(n-i+1) + i \cdot F_{0,5}} \quad (4.38)$$

où :

$F_{0,5}$: valeur de la médiane de la loi de Fisher-Snédecor

$$\gamma_1 = 2i$$

$$\gamma_2 = 2(n-i+1)$$

Méthode des rangs moyens :

$$F(i) = \frac{i}{n+1} \quad (4.39)$$

ou bien :

$$F(i) = \frac{2i+1}{2n} \quad (4.40)$$

Les résultats seront reportés sur le palier de Weibull et on déduit les paramètres.

D'autres méthodes d'estimation des paramètres de la loi de Weibull peuvent être appliquées [23].

3.4.3 Distributions mélangées

Il peut arriver que les données couvrent une longue période de la vie du produit, ceci rend difficile la modélisation des défaillances par une seule loi de Weibull. Aussi, faudra-t-il plusieurs lois pour couvrir les différentes périodes.

Exemple d'un mélange de lois recouvrant les périodes de maturité et de vieillesse d'un produit :

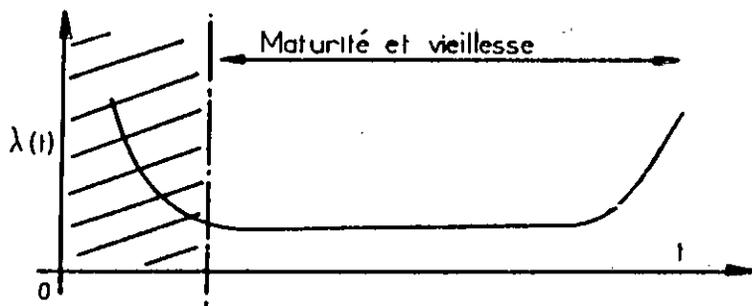


figure 4.10 : Loi en baignoire

D_1 représente la première loi; D_2 est un mélange des deux lois.

Les deux populations P_1 et P_2 ont entièrement fini de vivre lorsque D_2 rencontre l'horizontale passant par 100 % (temps t_2); on trouve ainsi le pourcentage P de P_1 par rapport à l'ensemble ($P_1 + P_2$).

En effet, en prolongeant la droite D_1 et à l'intersection avec la verticale passant par t_2 on obtient un point qui nous donne le P .

A ces population sont associées des lois $F_1(t)$ et $F_2(t)$ et l'ensemble des deux lois donne la loi $F(t)$.

$$Q + P = 1$$

$$F(t) = P F_1(t) + Q F_2(t)$$

Identifications de $F_1(t)$ et $F_2(t)$:

isolons $F_1(t)$

$$D_1 = P F_1(t) \Rightarrow F_1(t) = \frac{D_1}{P} \tag{4.41}$$

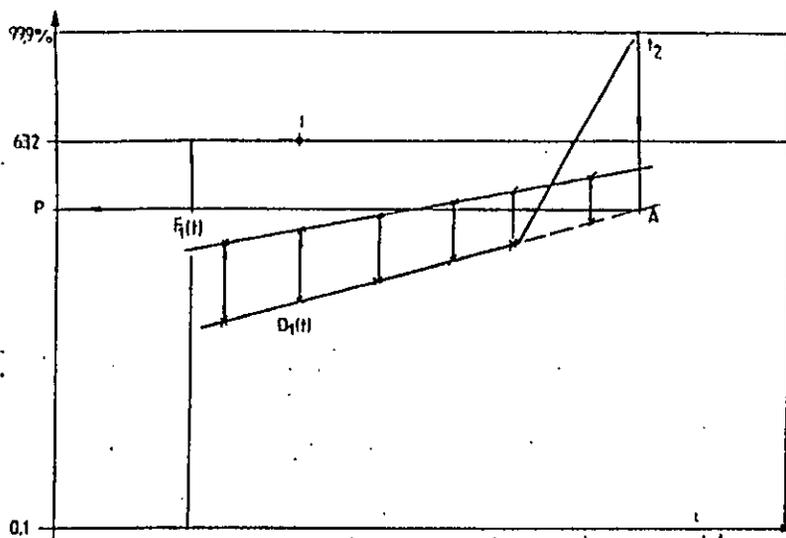


figure 4.11 : Distribution mélangée

Isolons maintenant $F_2(t)$;

$$F_2(t) = \frac{F(t) - PF_1(t)}{Q} \tag{4.42}$$

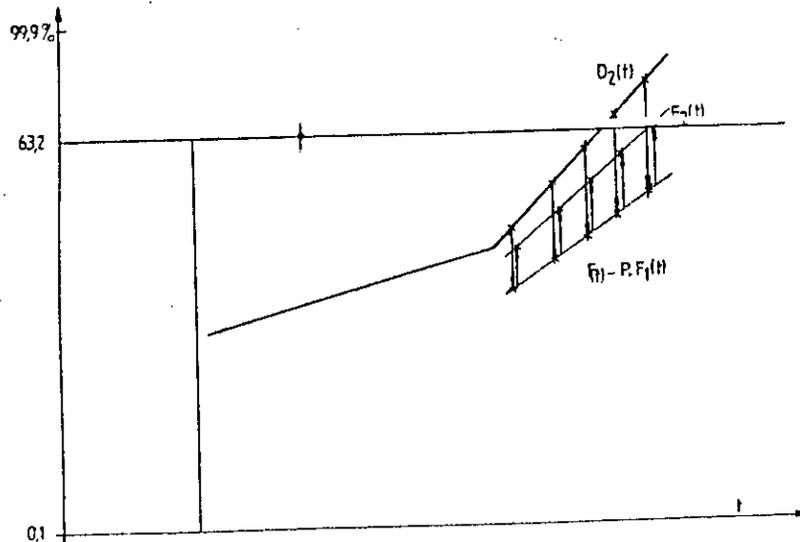


figure: 4.12

Finalement, on détermine les paramètres γ , η et β des deux lois :

$$R(t) = P \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma_1}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} + Q \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma_2}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} \tag{4.43}$$

Ceci est pour la détermination de la loi de Weibull, cependant cette méthode graphique est relativement longue et peu précise, alors elle a été abandonnée au profit de logiciel de calcul tels que :

- UNIFIT
- CURVE

4. Tests d'adéquation [24]

La supposition qu'un certain échantillon suit une certaine loi de probabilité est sujette à la vérification ; ceci est obtenu par un test d'adéquation ou un risque d'erreur « α » est admis.

4.1 Test du Khi-deux (χ^2) de Pearson

Il faut un nombre d'observation supérieur ou égal à 50 :

L'échantillon sera divisé en classes, de façon à ce que chaque classe contienne un nombre d'observation supérieur ou égal à 5 (l'intervalle de classe n'est pas forcément régulier).

Ce test est basé sur l'écart entre les valeurs observées et le modèle théorique, une fonction indicatrice des écarts est établie de la manière suivante :

$$E = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (4.44)$$

ou :

- r est le nombre de classes ,
- n_i est le nombre d'individus par classe,
- n est le nombre total d'individus de l'échantillon,
- np_i est le nombre d'individus attendu théoriquement dans la classe i ,
- p_i est la probabilité de se trouver dans la classe.

$$E \sim \chi^2(\gamma) \text{ avec } \gamma = r + k - 1$$

k est le nombre de paramètres pour le modèle théorique.

Il sera : $k = 1$ pour une loi exponentielle

$k = 2$ pour une loi normale

$k = 3$ pour une loi Weibull

Ceci se traduit par :

$$P(E > \chi_{\gamma, 1-\alpha}^2) = 1 - \alpha$$

si $E > \chi_{\gamma, 1-\alpha}^2$, le modèle choisi est rejeté

4.2 Test de Kolmogorov - Smirnov

Aucune restriction n'est nécessaire, ce test est applicable quel que soit n .

L'idée est toujours de comparer la fonction réelle de réparation des défaillances à la fonction de réparation théorique.

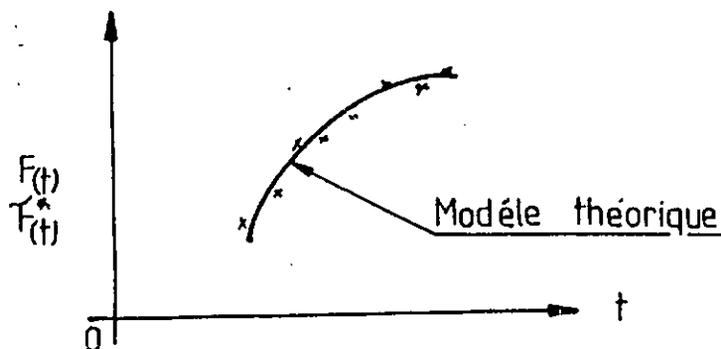


figure 4.13

L'écart est mesuré point par point dans le cas :

$$\delta_{n_i} = | \mathcal{A}(t) - F(t) | \tag{4.45}$$

ou : $\mathcal{F}(t)$ est la fonction de répartition réelle, elle peut être obtenue par la méthode des rangs moyens.

$F(t)$ est la fonction de répartition théorique.

$$\delta = \max | \mathcal{A}(t) - F(t) | \tag{4.46}$$

$$P \{ \max | \mathcal{A}(t) - F(t) | < \delta_\alpha \} = 1 - \alpha \tag{4.47}$$

La valeur de δ_α est donnée par la table de Kolmogorov - Smimov.
Si $\delta > \delta_\alpha$, on refuse l'hypothèse du modèle théorique.

5. Fiabilité des systèmes [25]

Un système est un ensemble d'éléments, la fiabilité de cet ensemble dépend de la fiabilité de chaque élément. Aussi pour améliorer la fiabilité d'un ensemble, on peut soit jouer sur la technologie du composant ou bien agencer les composants de manière à les rendre plus fiables.

5.1 Schéma série

Un ensemble d'éléments de composant est en série au sens de la fiabilité, si la défaillance d'un élément entraîne la défaillance de l'ensemble.

On notera S : le système fonctionne .

E_i : l'élément i fonctionne .

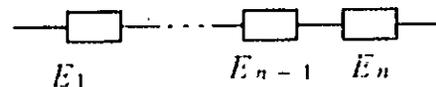


figure 4.14 : Schéma série

$$\bar{S} = \bar{E}_1 \cup \bar{E}_2 \cup \dots \cup \bar{E}_n$$

$$\bar{S} = \overline{E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n}$$

$$S = \bigcap_{i=1}^n E_i \Rightarrow P(S) = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

$$\Rightarrow R = \prod_{i=1}^n R_i \tag{4.48}$$

Dans ce cas on démontre facilement que la fiabilité de l'ensemble est plus petite que la fiabilité de l'élément ayant la fiabilité la plus faible.

5.2 Redondance

5.2.1 Redondance active simple (totale)

Un ensemble d'éléments est en parallèle au sens de la fiabilité, lorsque la défaillance de l'ensemble est réalisée par la défaillance de tous les éléments.

On a donc :

$$\bar{S} = \bigcap_{i=1}^n \bar{E}_i$$

En supposant l'indépendance des défaillances

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

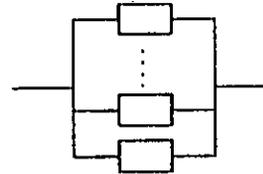


figure 4.15 schéma parallèle

(4.49)

On peut démontrer que la fiabilité de l'ensemble est supérieure à la fiabilité de l'élément le plus fort.

5.2.2 Redondance sélective (partielle)

Dans ce cas les éléments sont en parallèles et au moins un certain nombre d'entre eux fonctionnent.

La fiabilité d'un tel système est donnée par :

$$R = \sum_{i=k}^n C_n^i \rho^i (1 - \rho)^{n-i}$$

(4.50)

avec

n : nombre d'éléments en parallèle

k : nombre d'éléments en fonctionnement

ρ : la fiabilité de l'élément (tous les éléments sont supposés identiques).

Remarque : La même méthode est utilisée pour calculer la fiabilité dans le cas d'une redondance majoritaire, il faut seulement définir la majorité.

5.2.3 Redondance de réserve

Les éléments ne travaillent pas tous simultanément, certains sont au repos (en réserve) ou en panne.

- Redondance de réserve simple

La roue de secours est un exemple trivial de ce type de redondance.

- Redondance de réserve à détection / commutation

Considérons un système fonctionnant avec une redondance à détection / commutation, comme le schématise la figure ci-dessous :

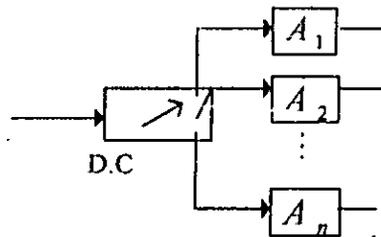


figure 4.16 schéma de détection / commutation

Supposant que la fiabilité de l'organe de détection / commutation est égal à 1.

Notons :

$\rho(t)$: la fiabilité de l'élément A_i

$\varphi(t)$: densité de défaillance

n : nombre d'éléments intervenant pour effectuer la mission

Pour $n = 1$

$$R(t) = \rho(t) \tag{4.51}$$

Pour $n = 2$: deux possibilités ;

A_1 effectue la mission seul,

ou

A_1 tombe en panne à θ puis A_2 finit la mission.

La fiabilité est donnée par :

$$R(t) = \rho(t) + \int_0^t \varphi(\theta)\rho(t-\theta)d\theta \tag{4.52}$$

Posons $h_1(t) = \int_0^t \varphi(\theta)\rho(t-\theta)d\theta$

Pour $n = 3$: trois cas sont possibles ;

A_1 effectue la mission,

ou

A_1 tombe en panne à A_2 puis A_2 termine la mission,

ou bien

A_1 tombe en panne à A_2 continue jusqu'à A_3 termine.

$$R(t) = \rho(t) + h_1 + \int \varphi(t)d\theta h_1(t-\theta) \tag{4.53}$$

6. La maintenance et la maintenabilité [1], [26]

Il importe à tout responsable de la maintenance d'une installation industrielle de faire face rapidement aux conséquences d'une défaillance. Dans de nombreuses situations, il sera indispensable de réparer les défaillances dans un temps le plus court possible pour réduire le temps d'indisponibilité.

6.1 Terminologie utilisée en maintenance

Afin d'évaluer l'efficacité d'un service de maintenance, il convient d'établir le diagramme chronologique des temps entre l'instant de la défaillance et l'instant de la réparation, ceci est résumé par le diagramme suivant :

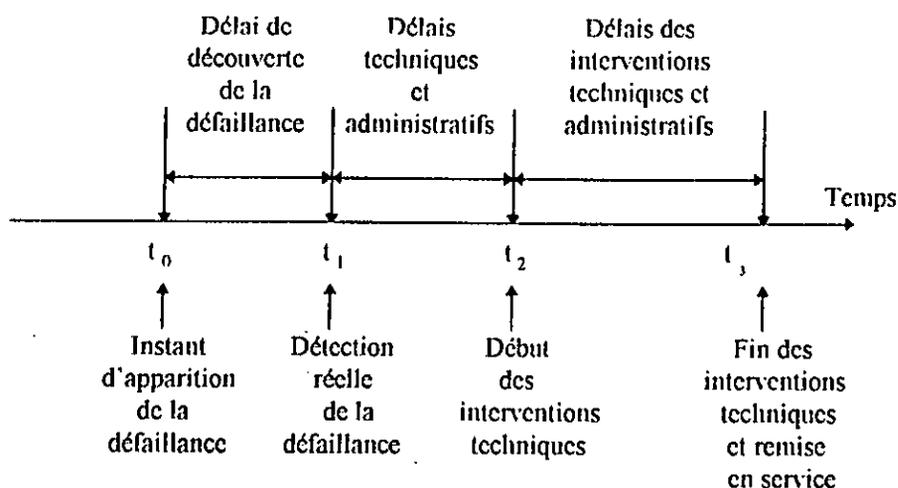


Figure 4.17 : Chronologie des temps des activités de maintenance

6.2 La maintenabilité (maintenability)

Dans les conditions données d'utilisation, c'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits (Norme NF X60-500)

La maintenabilité est caractérisée par :

$$M(t) = P(\text{ la maintenance de l'élément est achevée au temps } t) \\ = 1 - P(\text{ l'élément n'est pas réparée sur la durée } [0, t])$$

On définit aussi l'immaintenabilité :

$$\bar{M} = 1 - M(t)$$

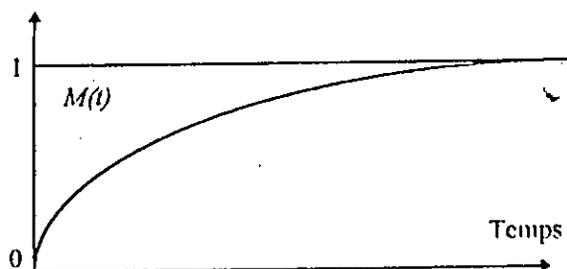


Figure 4.18 : Allure de la courbe de maintenabilité

6.3 Le taux de réparation $\mu(t)$

$$\mu(t) = P \{ \text{entité réparée sur} [t, t + dt] \}$$

En reprenant un raisonnement similaire à celui utilisé pour le calcul du taux de défaillance $\lambda(t)$ on trouve :

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \frac{dM(t)}{dt} \quad (4.54)$$

6.4 MTTR (Mean Time To Repair)

C'est la durée moyenne jusqu'à la réparation d'une entité réparable.

On définit :

la densité de réparation :

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt}$$

$$\text{MTTR} = \int_0^{+\infty} t \frac{dM(t)}{dt} dt \quad (4.55)$$

En intégrant par parties : on aboutit à :

$$\text{MTTR} = \int_0^{+\infty} (1 - M(t)) dt \quad (4.56)$$

Dans certaines industries, on définit le MTTR (Mean Time To Repair) qui est le temps nécessaire à retenir une entité en panne (avion, train) bloquant un processus séquentiel (file d'attente pour une piste d'avion, ...)

Les figures suivantes récapitulent les liens temporels entre les différents termes définis en fiabilité, disponibilité et maintenabilité.

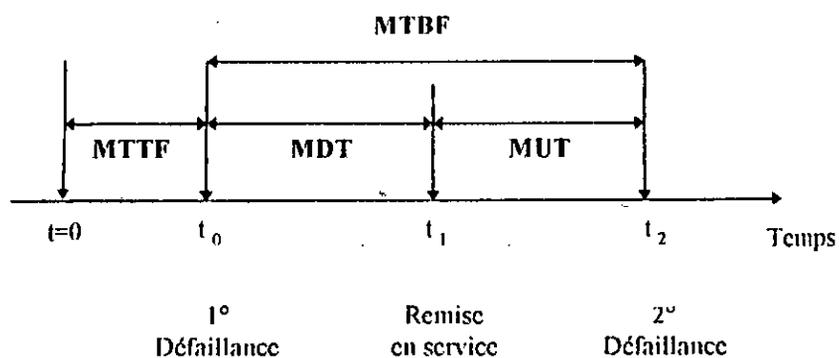


Figure 4.19 : Diagramme des différents concepts de maintenance

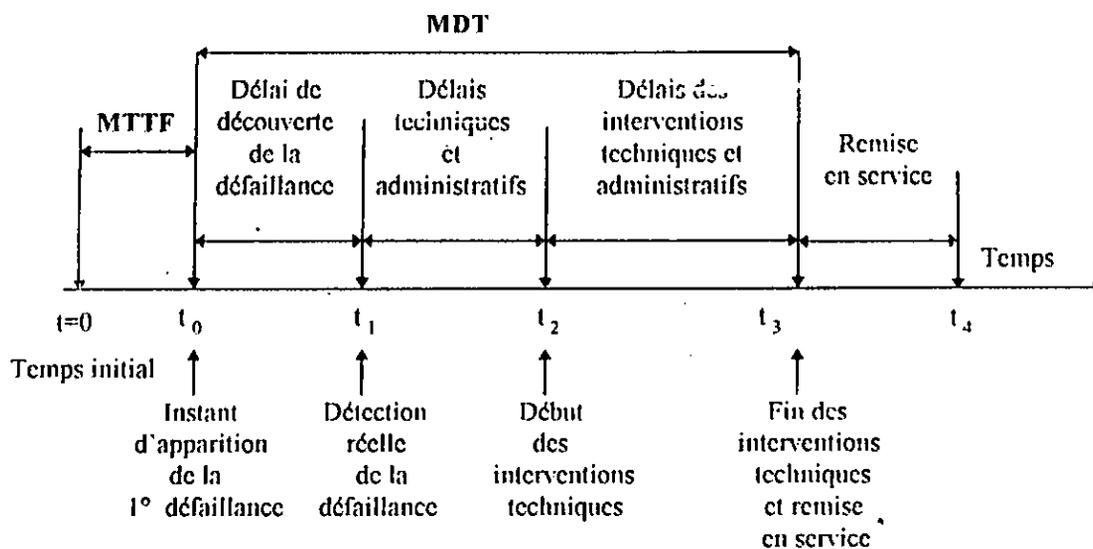


Figure 4.20 : Chaînage temporel des activités de détection et de remise en service

Pour les systèmes existants, les performances en maintenabilité sont principalement dépendantes de la configuration des matériels et de leurs dispositions, des compétences et des organisations des équipes de maintenance.

Il est utile de savoir que des normes définissant les espaces nécessaires pour réaliser les opérations de maintenance par un opérateur humain. En revanche, lors de la conception de nouveaux produits, on intègre (sous la pression du marché) les considérations de maintenance, de maintenabilité et de disponibilité afin de satisfaire des clients de plus en plus exigeants quant au coût de possession.

La maintenabilité d'un élément dépend étroitement des moyens et des compétences mis en œuvre.

Les anglo-saxons ont défini d'autres terminologies à usage pratique pour caractériser l'aisance à réaliser les opérations de maintenance :

Surveillabilité

Le terme surveillabilité caractérise les moyens mis en œuvre pour détecter rapidement une défaillance d'après ses symptômes externes. Sous l'angle matériel, elle inclut les capteurs, les chaînes d'instrumentations et de traitement de l'information et les systèmes d'aide aux opérations.

La surveillabilité prend en compte la disponibilité et la fiabilité des systèmes de surveillance et leur capacité à détecter et à diagnostiquer rapidement les causes initiales de la défaillance pour des actions efficaces de réparation. Elle peut aussi être considérée comme un des facteurs de la maintenance conditionnelle - prévisionnelle.

Vulnérabilité

La vulnérabilité des matériels est un indicateur utilisé pour comprendre si des composants des matériels sont susceptibles d'être endommagés par des agressions externes telles que collisions avec des engins de manutention, fuites de liquide ou de gaz provenant de matériel situé à proximité, inondations, ... etc.

Accessibilité

Tout intervenant en maintenance industrielle ou domestique est confronté au problème de l'accessibilité des pièces devant subir une quelconque opération. Il n'est pas rare en effet de passer plusieurs heures à démonter plusieurs composants en bon état pour accéder à la pièce défaillante. Cette notion recouvre également l'espace libre laissé autour de la pièce pour que l'intervention humaine soit possible (passage de la main, du bras, ...). Soulignons qu'il existe des normes anthropométriques pour chaque partie du corps humain.

Survivabilité

La survivabilité peut se définir comme la capacité d'une entité à remplir sa ou ses fonction(s) avec des caractéristiques normales en présence de la perte de certains de ses composants à la suite d'agressions externes.

Testabilité

Elle correspond à l'aptitude d'une entité à être diagnostiquée dans un état de fonctionnement ou de dysfonctionnement et dans ce dernier cas, à l'aptitude de l'entité à permettre la localisation de la défaillance dans un temps donné.

Les clients sont de plus en plus sensibles à ces notions lors de la rédaction du cahier des charges aussi les constructeurs se trouvent poussés à inclure ces données lors de la conception.

7. Renouvellement du matériel [27]

Nous ne traiterons dans ce paragraphe qu'un seul type de renouvellement, dit « renouvellement simple », on renvoie le lecteur désireux à plus de détail à la référence. [27]

7.1 Processus stochastique de renouvellement simple

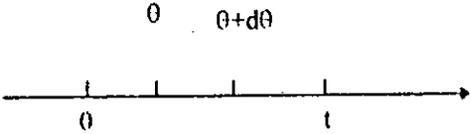
Nous considérons dans ce paragraphe une population d'équipement dont la durée de vie est une variable aléatoire t de densité de probabilité $\varphi(t)$.

On supposera que dès qu'un équipement tombe en panne, on le remplace par un autre de mêmes caractéristiques. Nous nous intéresserons au nombre de renouvellement qui se produisent durant l'intervalle $[0, t]$.

Nous appellerons :

$$P_k(t) = \{ \text{Probabilité de } k \text{ renouvellements dans l'intervalle } [0, t] \}$$

On aura alors :

$$\begin{aligned} P_0(t) &= R(t) \\ P_1(t) &= \int_0^t f(\theta) P_0(t-\theta) d\theta \\ P_2(t) &= \int_0^t f(\theta) P_1(t-\theta) d\theta \end{aligned} \quad (4.57)$$


Finalement, on obtient l'intégrale de Steilge

$$P_k(t) = \int_0^t f(\theta) P_{k-1}(t-\theta) d\theta$$

Cette intégrale a été calculée numériquement (voir logiciel), le calcul analytique nécessite le passage aux transformées de CARSON - LAPLACE*.

$$\begin{aligned} \Pi_k(s) &= LP_k(t) \\ \rho(s) &= LR(t) \\ \Phi(s) &= Lf(t) \end{aligned}$$

Après calcul (en utilisant les propriétés*** des transformées de CARSON LAPLACE), on obtient :

$$\Pi_k(s) = \rho(s)(1 - \rho(s))^k \quad (4.58)$$

Le passage inverse peut être obtenu par la transformée de MELIN - FOURIER**.

Le nombre moyen de renouvellements est donné par la fonction de renouvellement $H(t)$:

$$\begin{aligned} LH(t) &= \eta(s) \\ \eta(s) &= \sum_{k=1}^{\infty} k\Pi_k(s) \\ H(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} kP_k(t) \end{aligned} \quad (4.59)$$

On obtient après calcul :

$$\eta(s) = \frac{1 - \rho(s)}{\rho(s)} \quad (4.60)$$

On définit l'intensité de renouvellement par la dérivée :

$$h(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad (4.61)$$

* Transformée de CARSON - LAPLACE

$$Lf(x) = \int_0^{+\infty} se^{-sx} f(s) dx = g(s)$$

** Transformée de MELIN- FOURIER

$$f(x) = L^{-1} f(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \frac{1}{s} e^{sx} g(s) ds$$

*** Propriétés :

$$Lf'(x) = sg(s) - sf(0)$$

$$L \int_0^t f(x) dx = \frac{1}{s} g(s)$$

$$L \int_0^t f_1(\tau) f_2(x - \tau) d\tau = \frac{g_1(s)g_2(s)}{s}$$

7.2 Propriétés asymptotiques du processus de renouvellement

Dans la pratique, c'est ce qui se passe au bout d'un temps très grand qui retient principalement l'intérêt. Nous admettons les résultats fondamentaux suivants :

• Quand $t \rightarrow \infty$ alors $n \rightsquigarrow N\left(\frac{t}{T}; \sigma \sqrt{\frac{t}{T^3}}\right)$ (4.62)

n : nombre de renouvellement

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) = \left(\frac{1}{MTBF}\right)t + \left(\frac{\sigma^2}{2MTBF^2} - \frac{1}{2}\right) \quad (4.63)$$

• Si : $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) \approx 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \frac{1}{T}$ (4.64)

• Théorème central de renouvellement

Si $\vartheta(t)$ est décroissante et intégrable dans $[0, +\infty[$ alors :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \vartheta(t - \theta) dH(\theta) = \frac{1}{T} \int_0^{+\infty} \vartheta(x) dx \quad (4.65)$$

7.3 Stratégie de renouvellement

Les coûts générés par la panne (coût de la pièce et les coûts parallèles, tel que le manque à gagner provoqué par l'arrêt de la production ...) définissent la politique de renouvellement.

Soient :

r : le coût de la pièce et de la main d'œuvre

p : le coût de la panne :

7.3.1 Renouvellement après défaillance

Le coût moyen de renouvellement après panne sera donné par :

$$C_1 = \frac{r + p}{MTBF} \quad (4.66)$$

7.3.2 Renouvellement préventif

Cette politique prévoit un renouvellement avant la panne, au moment où il coûtera le moins cher. Le problème est de déterminer l'instant θ de renouvellement.

Le coût moyen de la panne sera :

$$C_2 = \frac{r + p(1 - R(\theta))}{\bar{T}_\theta} \quad (4.67)$$

avec

$$\bar{T}_\theta = \int_0^\theta R(t) dt \quad (4.68)$$

On voit bien apparaître dans l'expression de C_2 , le caractère aléatoire de la panne. Le renouvellement préventif sera efficace si

$$\begin{aligned} C_1 < C_2 &\Leftrightarrow \frac{r + [1 - R(\theta)]p}{\bar{T}_\theta} < \frac{r + p}{MTBF} \\ &\Leftrightarrow \frac{r + p}{p} < R(\theta) \frac{MTBF}{MTBF - \bar{T}_\theta} \end{aligned} \quad (4.69)$$

L'époque θ la plus favorable pour un tel renouvellement est celle pour laquelle $C_2(\theta)$ est minimale.

$$\begin{aligned} \frac{dC_2}{d\theta} = 0 \\ \frac{d^2C_2}{d\theta^2} > 0 \end{aligned} \Leftrightarrow \frac{r + p}{p} = R(\theta) + \bar{T}_\theta \lambda(\theta) \quad (4.70)$$

7.3.3 Renouvellement périodique

Dans ce cas, le remplacement est effectué d'une façon périodique à une époque τ (s'il a survécu jusqu'à τ) de telle manière que le coût soit minimal.

Le coût du renouvellement périodique est :

$$C_3 = \frac{r + (r + p)H(\tau)}{\tau} \quad (4.71)$$

On cherche τ tel que :

$$\begin{aligned} \frac{dC_3}{d\tau} = 0 \\ \frac{d^2C_3}{d\tau^2} > 0 \end{aligned} \Leftrightarrow \tau \frac{dH(\tau)}{d\tau} - H(\tau) = \frac{r}{r + p} \quad (4.72)$$

8. Banque de données de fiabilité / maintenance

L'approche suivie précédemment a mis en évidence l'importance du patrimoine statistique (Nombre de survivants, Temps de bon fonctionnement, ...) dans la détermination des différents paramètres qui régissent la durée de vie d'un équipement opérationnel. L'acquisition de ces informations s'est avérée indispensable pour les organismes spécialisés en maintenance.

Ceci peut se faire de plusieurs façons :

- Des fiches établies par les services maintenance.
- Des retours clients (établit par les services après-vente)
- Enquêtes sur le terrain.

Cependant en l'absence de ces statistiques, l'utilisation des tables de données préétablies est possible, toutefois il convient d'être très prudent quant au maniement de ces données. Des tables concernant les composants électroniques et les éléments mécaniques courants sont établis par différents organismes tels que :

En France :

- Le CNET a édité (les NPRD 1 et 2)
- EDF a mis en place une base de données.

Aux États Unis :

- Rome Air Center (RADC)
- La NASA et la NAVY ont édité la FARADA
- Recueils de l'AVCO Corporation.

Il faut noter que les conditions d'utilisation des matériels sont souvent forts différents de celles ayant servi pour établir les tables, aussi des coefficients d'environnement pour les taux de défaillance ont été établies.

Nous citerons comme exemple ceux introduits par l'AVCO Corporation :

$$\lambda_c = K \lambda_b$$

avec :

- λ_c : taux de défaillance dans l'environnement considéré.
- λ_b : taux de défaillance de base.
- K : coefficient de correction.

Malgré cette correction, les résultats obtenus en utilisant ces tables doivent être expliqués avec prudence, car les coefficients d'environnement ne prévoient pas toujours toutes les situations.

Tableau 4.2 : Coefficient de correction pour certains milieux d'utilisation.

| Environnement | K |
|-------------------------------|-----|
| Laboratoire | 1 |
| Niveau de la mer au sol | 10 |
| Pont de paquebot | 18 |
| Route | 20 |
| Rail | 30 |
| Avion | 125 |
| Missiles anciennes génération | 200 |
| Missiles nouvelles génération | 800 |

Deuxième Partie

Introduction

L'importance de la fiabilité dans la technique moderne et le manque de moyens techniques et didactiques que connaît notre pays, nous ont amené à concevoir un logiciel de calcul de fiabilité et de renouvellement des équipements. Il sera conçu pour l'élève et l'enseignant professeur (outil pédagogique) et pour l'ingénieur (outil de travail).

Deux chapitres diviseront cette partie, le premier concernera la présentation de l'outil et de ses fonctionnalités, il sera imagé par quelques résultats en fin de chapitre. Tandis que le deuxième chapitre exposera les méthodes de calcul, les difficultés rencontrées, les solutions proposées et finalement une discussion critique des méthodes et des solutions.

Chapitre 5

Présentation de l'Application Weibull

1. Introduction

Nous avons conçu notre outil en ayant à l'esprit deux buts : d'une part, il s'agit de mettre au point pour l'étudiant et l'enseignant un vrai outil pédagogique permettant une meilleure illustration des concepts de fiabilité et de renouvellement des équipements (notre travail s'appuie sur le programme du cours de fiabilité enseigné à l'ENP). D'autre part, réaliser un outil de travail opérationnel qui permettrait l'automatisation des calculs fastidieux et souvent impossibles à faire manuellement dans certains cas.

Bien sur, il existe sur le marché, des logiciels de calcul de fiabilité mais souvent ce type d'outil et soit inadapté à certains besoins spécifiques ou bien indisponible (nous avons nous même souffert de cette indisponibilité durant notre travail). Ceci sans oublier que ces logiciels sont à classer parmi les produits étrangers vis-à-vis desquels on veut nous transformer en consommateur inerte, éternellement dépendant. Ce sont autant de bonnes raisons qui nous ont poussé à relever le défi et à concevoir l'application en fiabilité que nous avons nommée Weibull.

En effet, la loi de Weibull (4.31) a été utilisée pour ajuster les données expérimentales. Ce choix est justifié par les raisons suivantes :

- Les expériences passées prouvent que la survie des matériels mécaniques suit souvent une telle loi.
- Grâce à ces trois paramètres γ , η et β , la loi de Weibull s'ajuste aisément à un grand nombre de résultats expérimentaux.
- La loi de Weibull couvre plusieurs autres distributions en fonction des valeurs prises par les paramètres, ainsi on a :
 - . Pour $\gamma = 0$, $\beta = 1$ une loi exponentielle
 - . Pour $\gamma = 0$, $\beta = 2$ une distribution de Rayleigh
 - . Pour $\beta \geq 3$, on se rapproche d'une loi Normale, ceci est d'autant plus vrai que β est grand.

En plus de couvrir plusieurs distributions, la loi de Weibull permet de modéliser les différentes phases de survie des matériels, ainsi :

- . Pour $\beta < 1$, le taux de défaillance est décroissant (période de jeunesse).
- . Pour $\beta = 1$, le taux de défaillance est constant (maturité).
- . Pour $\beta > 1$, le taux de défaillance est croissant (vieillesse).

Nous verrons donc dans ce chapitre la présentation de l'outil de calcul, de ses fonctionnalités, la motivation des choix des possibilités, suivie d'une série d'essais qui imagera les fonctions les plus importantes en fin de chapitre.

2. Présentation générale du programme Weibull

Le programme Weibull est un logiciel fonctionnant sous Windows, bénéficiant de toute la convivialité et la fonctionnalité de ce système d'exploitation.

Il est essentiellement un outil de calcul de fiabilité et de renouvellement des équipements, offrant à l'utilisateur une aide à la décision concernant le choix de la politique de maintenance pour un matériel donné.

Les calculs sont effectués sur la base d'un modèle mathématique, qui peut être soit imposé par l'utilisateur, ou bien ajusté à partir de données expérimentales (TBF, survivants,) suivants deux bases de calcul différentes (rangs médians, rangs moyens) ou sinon ajusté à partir de valeurs d'une fonction de répartition.

Cette souplesse dans le mode d'utilisation et les choix des bases de calcul confèrent au programme Weibull, en plus du côté application professionnelle un côté pédagogique certain, qui sera on le souhaite, apprécié par les enseignants et les étudiants de fiabilité.

3. Option de visualisation

Après avoir déterminé les paramètres de la loi de Weibull (la section suivante traitera des diverses manières pour déterminer ces paramètres), le programme Weibull permettra de visualiser les graphiques des fonctions standards de fiabilité et du renouvellement.

3.1 Fiabilité

L'application Weibull permettra de visualiser les fonctions suivantes :

- . $f(t)$ Fonction de densité de probabilité
- . $R(t)$ Fonction de fiabilité
- . $F(t)$ Fonction de défaillance
- . $Z(t)$ Taux de défaillance

Il est aussi possible de connaître les coordonnées de n'importe quel point sur les courbes, ceci en positionnant le pointeur de la souris sur le graphe.

Souvent le programme Weibull affiche des graphiques en fonction du temps, nous avons choisi MTBF comme unité de l'axe des abscisses, l'utilisateur a la possibilité de varier l'étendue de cet axe de 2 à 15 MTBF.

3.2 Renouvellement

L'outil *Weibull* traite du renouvellement simple des équipements [27]. Il donnera les courbes des coûts et des gains, ainsi que les courbes de fonctions de renouvellement.

En effet, pour un entier K choisi par l'utilisateur, il est possible de visualiser la courbe $P_K(t)$, qui représente la probabilité d'avoir K renouvellements dans l'intervalle $[0, t]$.

Une variante de cette probabilité est aussi offerte. Il s'agit du diagramme $P_{ii}(K)$, le diagramme en escalier donne pour un temps fixe la variation de la probabilité en fonction du nombre de renouvellements. Cette option permettra aussi de répondre aux questions du type : pour un temps t_i et avec une probabilité P , à quel nombre de renouvellement faudrait il nous attendre ?

Le graphique de la fonction de renouvellement $H_n(t)$ peut être aussi observé pour un paramètre n choisi par l'utilisateur, car en réalité la fonction de renouvellement se présente comme étant une série infinie, équation (4.59). Pour notre calcul, on sommerait un nombre fini de termes, on calculera donc :

$$H_n(t) = \sum_{K=1}^n K.P_K(t) \quad (5.1)$$

La convergence et la vitesse de convergence de cette série dépendent respectivement du nombre de termes n de la somme (5.1) et de la forme de $P_K(t)$. Sachant que le temps de calcul croîtra avec le nombre n , un compromis entre précision et temps de calcul est par conséquent nécessaire.

3.3 Stratégie de renouvellement

Concernant les outils d'aide à la décision pour le choix d'une politique de renouvellement, certaines modifications ont été introduites sur les équations du renouvellement vue au chapitre 4, afin de les rendre plus maniables et plus explicites.

En effet, lors de la détermination de la politique de maintenance, les coûts de la maintenance préventive C_2 et celui de la maintenance périodique C_3 sont comparés au coût d'une maintenance après panne C_1 . Il serait donc intéressant et justifié de ne plus considérer les coûts mais leurs rapports :

Nous appellerons :

$$R_2(t) = \frac{C_2(t)}{C_1} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} R_2(t) &= \left[\frac{r + p(1 - R(t))}{T_i} \right] \frac{MTBF}{r + p} \\ &= \left[1 - \frac{p}{r + p} R(t) \right] \frac{MTBF}{T_i} \end{aligned}$$

posons
$$f_p = \frac{P}{r+p} \quad (5.3)$$

avec: $0 \leq f_p \leq 1$

$$R_2(t) = [1 - f_p R(t)] \frac{MTBF}{T_r} \quad (5.4)$$

Nous répéterons l'opération pour le coût $C_3(t)$

$$R_3(t) = \frac{C_3(t)}{C_1} \quad (5.5)$$

Après remplacement, nous aboutissons à :

$$R_3(t) = [1 - f_p + H(t)] \frac{MTBF}{t} \quad (5.6)$$

Nous constatons que les rapports $R_2(t)$ et $R_3(t)$ ne dépendent que du seul paramètre f_p et non pas de deux paramètres r et p comme nous aurions pu le croire.

Les gains de chaque politique par rapport à un renouvellement après panne sont :

pour un renouvellement préventif : $g_2(t) = 1 - R_2(t) \quad (5.7)$

pour un renouvellement après panne : $g_3(t) = 1 - R_3(t) \quad (5.8)$

Donc pour un rapport f_p donné, le programme Weibull offrira les courbes suivantes :

. $R_2(t)$ et $R_3(t)$ respectivement rapport du coût d'un renouvellement préventif $C_2(t)$ et d'un renouvellement périodique $C_3(t)$ à celui d'un renouvellement après panne C_1 .

. Les courbes des gains en fonction du temps $g_2(t)$ et $g_3(t)$.

Ce qui attire spécialement l'attention, concernant ces deux dernières options, est le minimum pour les premières et le maximum pour les secondes, aussi, le programme Weibull donnera la possibilité de visualiser la courbe du gain maximal (gain absolu) en fonction du rapport f_p . Cette option permettra à l'utilisateur de connaître la position de son gain maximal (correspondant au rapport f_p introduit) par rapport au gain maximal absolu, et ainsi décider si l'effort d'abaisser l'un des coûts r ou p est profitable et justifié.

3.4 Adéquation

L'outil *Weibull* permettra de visualiser une fonction de répartition en fonction du temps et ceci, suivant trois types d'échelles :

- Normale
- Semi - log
- Allen Plait

En proposant les renseignements suivants :

- . Le MTBF μ
- . L'écart type du modèle utilisé σ
- . Les paramètres correspondants au modèle utilisé γ, η et β .

Le programme superpose, s'il y a lieu (c'est à dire si des données ont été lues) sur le dernier graphique, la courbe de la fonction de répartition expérimentale F^* . Si c'est le cas, le programme permettra d'apprécier l'adéquation des données au modèle en proposant en plus :

- . L'écart maximal observé entre la loi théorique et les points expérimentaux δ .
- . La probabilité d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov θ .

3.5 Lecture des données

Pour un maximum de souplesse et de fonctionnalité, le programme permet la lecture de plusieurs types de données expérimentales :

- Des temps de bon fonctionnement TBF
- Des survivants en fonction du temps $N(t)$
- Des valeurs de fonction de répartition.

Dans le cas où les données sont des survivants en fonction du temps, le programme les convertit en temps de bon fonctionnement (chapitre 6).

A partir de ces TBF, la fonction de répartition expérimentale est calculé soit par la méthode des rangs médians ou bien par la méthode des rangs moyens et ceci, au choix de l'utilisateur.

3.6 Options de calcul

Pour plus de commodité, l'utilisateur pourra varier certains paramètres de calcul. La longueur de ces calculs dépendra essentiellement des valeurs de ces paramètres, du type de calcul à effectuer et du type de machine sur laquelle tournera le programme.

Aussi, nous avons décidé de regrouper en une seule option certains paramètres qui, a priori sont indépendants mais qui ont un effet similaire sur le temps de calcul.

L'utilisateur pourra donc faire varier l'étendue de l'axe des temps de 2 à 15 MTBF.

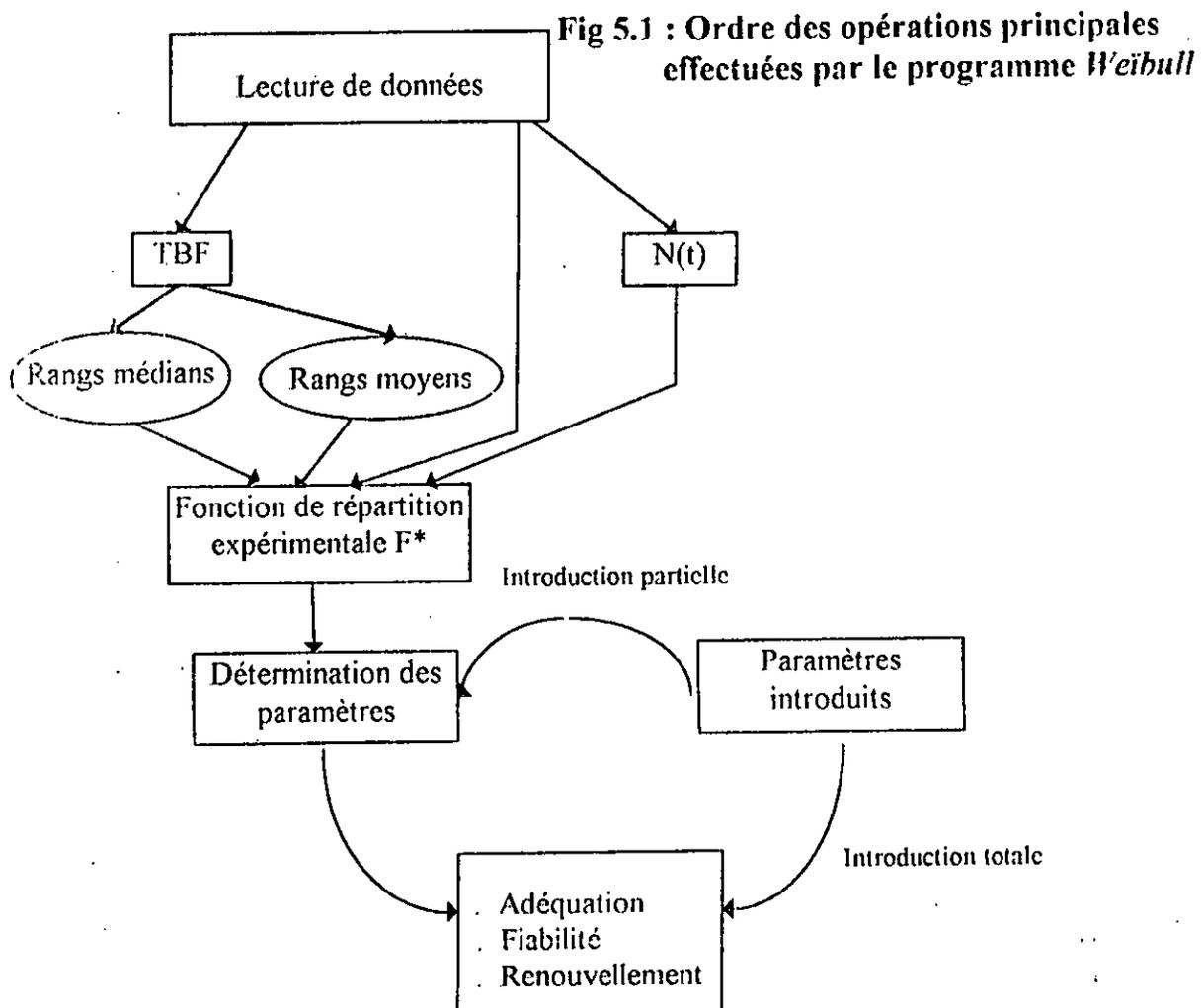
Concernant le calcul de la fonction de renouvellement, l'application permet de changer le nombre n de termes de la somme (5.1).

Le programme *Weibull* offre aussi la possibilité de changer le mode de calcul de la fonction de répartition expérimentale et ceci par la méthode des rangs médians ou bien des rangs moyens.

Une intéressante option permettant de choisir le modèle mathématique qui ajustera les points expérimentaux est aussi disponible. En effet, ceci est possible en fixant un ou deux paramètres de la loi de Weibull et d'exécuter l'adéquation sur le (les) paramètre(s) restant(s), par exemple pour $\gamma = 0$, $\beta = 1$ le modèle est une loi exponentielle et l'adéquation se fera sur η .

Une autre possibilité est offerte en fixant tous les paramètres c'est à dire en imposant le modèle mathématique et ainsi voir les effets de ce modèle sur les options de visualisation. On pourra par exemple constater que pour $\beta > 1$ le taux de défaillance $Z(t)$ est croissant et qu'il est constant pour $\beta = 1$ et décroissant pour $\beta < 1$.

Le schéma suivant résumera l'ordre des opérations effectuées par le programme *Weibull* :



4. Tests

Afin de valider les résultats donnés par le programme *Weibull*, nous avons effectué quelques tests concernant des données prises des références [22] et [32].

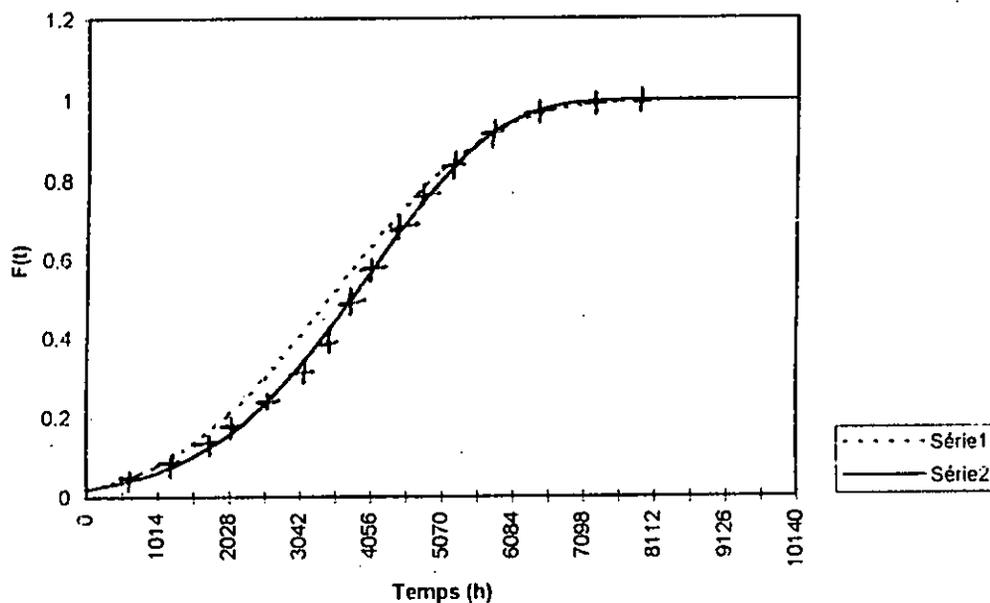
Les résultats du programme ont été comparés à ceux obtenus par méthode graphique (papier d'Allen Plait)

Essai 1:

Les résultats suivants ont été obtenus pour les données citées en annexe (n = 38 valeurs)

| | Graphique | <i>Weibull</i> |
|--------------|-----------|----------------|
| β | 3.6 | 6.18 |
| $\eta(h)$ | 6050 | 9151 |
| $\nu(h)$ | -2000 | -4833 |
| $M(h)$ | 3452 | 3671 |
| σ | 1682 | 1603 |
| δ | 0.1 | 0.039 |
| $\theta(\%)$ | 78.44 | 100 |

Comparaison de l'adéquation du modèle obtenu par méthode graphique et celui donné par le programme Weibull



Nous constatons une meilleure adéquation pour le modèle trouvé par *Weibull*. D'ailleurs la probabilité d'adéquation laissait prévoir un tel résultat.

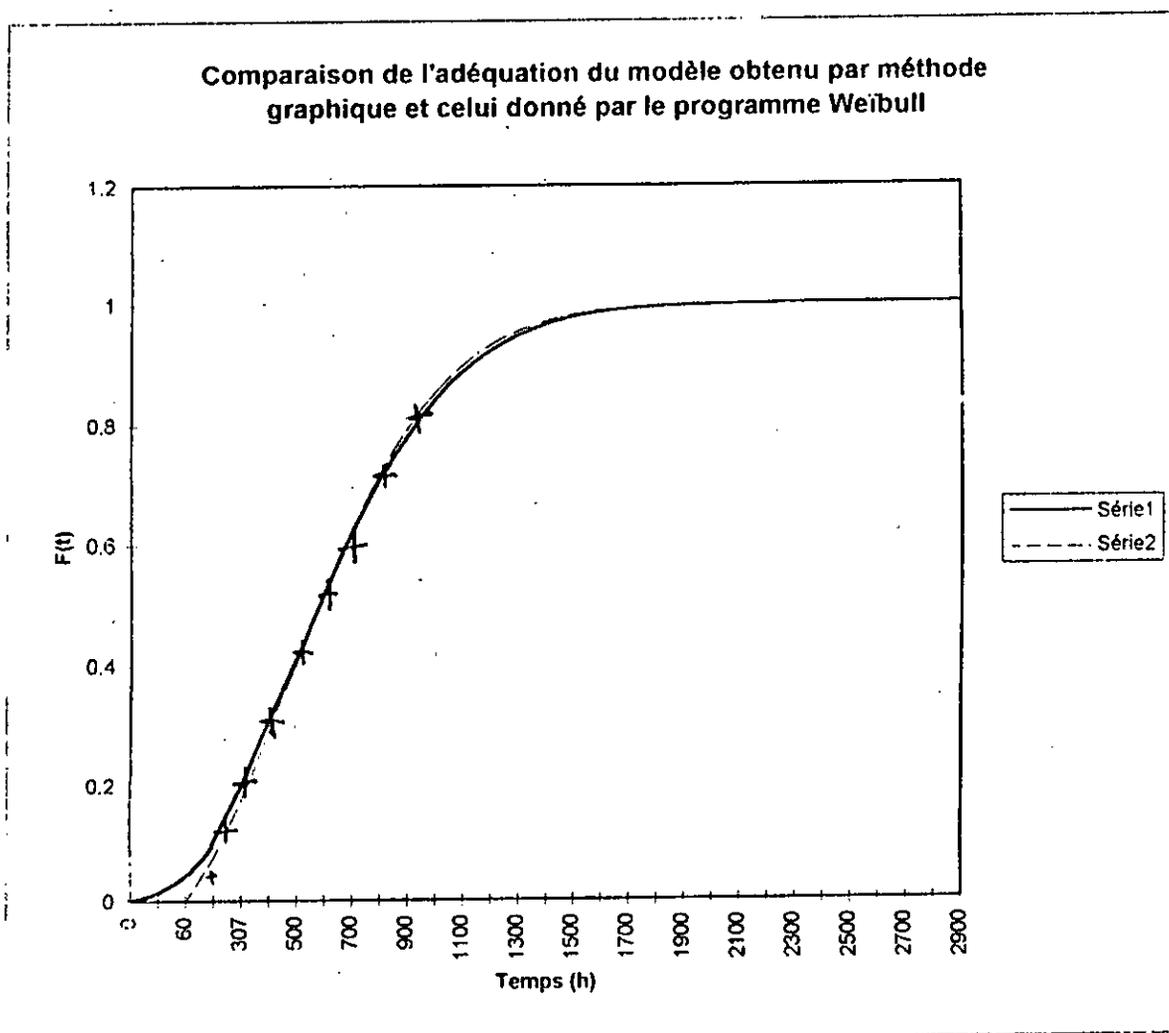
Série 1: Résultats graphiques

Série 2: Résultats de Weibull

Essai 2:

Neuf temps de bon fonctionnement ont été utilisés pour l'essai suivant (voir annexe).
 Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après:

| | Graphique | Weibull |
|-----------|-----------|---------|
| β | 1.8 | 1.73 |
| $\nu(h)$ | 0 | 59.6 |
| $\eta(h)$ | 710 | 642 |
| $M(h)$ | 631 | 632 |
| σ | 363 | 342 |
| δ | 0.101 | 0.082 |
| $B(x)$ | 98.5 | 100 |



Ces nouveaux résultats, ne font que confirmer l'avantage du programme Weibull sur les méthodes graphiques, longues et laborieuses, mais qui donnent cependant des résultats assez correctes.

Série 1 : résultats graphiques
 Série 2 : résultats de Weibull

Chapitre 6

Mise en œuvre du Logiciel

1. Introduction

Ce chapitre concernera la mise en œuvre de l'outil de calcul *Weibull*, on y abordera les différents calculs nécessaires, on y exposera aussi les problèmes rencontrés et les méthodes de résolutions. En fin de chapitre une discussion critique concernant les limitations d'utilisation sera développée.

2. Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres de la loi de *Weibull* constitue un problème essentiel, et de la justesse de cette estimation dépendra la fiabilité des résultats du calcul. On cherchera les paramètres β , γ et η de façon à minimiser l'écart :

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[F_i^* - F(t_i)]^2}{F(t_i)} \quad (6.1)$$

Où : F est la fonction de répartition théorique

F^* est la fonction de répartition expérimentale, estimée soit par la méthode des rangs médians (4.37) ou bien par la méthode des rangs moyens (4.39) au choix de l'utilisateur.

L'écart (6.1) est minimal lorsque les dérivées partielles par rapport aux paramètres de la loi sont nulles. On aboutit donc au système d'équations :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S^2}{\partial \beta} &= 0 \\ \frac{\partial S^2}{\partial \gamma} &= 0 \\ \frac{\partial S^2}{\partial \eta} &= 0 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Ou bien sous forme matricielle :

$$\{\Lambda\}\{X\} = \{B\} \quad (6.3)$$

Ce système est non linéaire, et plusieurs méthodes numériques peuvent être proposés pour le résoudre. On citera les méthodes de Newton et du Gradient [31]

Notre choix a cependant porté sur la méthode dite de *Levenberg-Marquart* [28] pour les raisons suivantes :

- Méthode robuste, qui converge de manière quasi-certaine.
- Elle combine astucieusement les méthodes de Newton et du Gradient en un seul algorithme, jouissant ainsi de leurs avantages.

Remarque :

Comme on l'a précédemment vue (chapitre 5) nous pouvons lire indifféremment des temps de bon fonctionnement (TBF) ou bien des survivants $N(t)$. dans ce dernier cas le programme exécute l'adéquation sur les fréquences cumulées des défectueux à partir de la formule :

$$F(t) = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} \quad (6.3)$$

3. Test d'adéquation

Ce test est spécialement adapté à notre cas puisqu'il compare des fonctions de répartition en considérant l'écart maximal observé entre elles.

$$\delta = \text{Max} |F^* - F| \quad (6.4)$$

Kolmogorov a montré [24] que pour des grandes valeurs de n :

$$P(\delta\sqrt{n} \geq \lambda) \text{ tend vers } P(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2} \quad (6.5)$$

Stephens a proposé sur cette base une formule plus précise, très bonne dès que $n = 4$.

$$P\left(\delta \left[\sqrt{n} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{n}} \right] \geq \lambda\right) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2} \quad (6.6)$$

Nous avons utilisé cette dernière formule pour estimer la probabilité d'adéquation.

4. Calcul de MTBF

Le MTBF a été calculé à partir de l'équation (4.34). Cette dernière équation fait introduire le calcul de la fonction GAMMA qui est donnée par (4.35). Des algorithmes spécifiques ont été développés pour le calcul de cette fonction [29].

5. Probabilité de K renouvellement dans [0, t]

Ce calcul fut un des problèmes des plus délicats que nous avons eu à traiter, et ceci a cause de la forme même de l'intégrale (4.57) :

$$\begin{cases} P_K(t) = \int_0^t d\theta \varphi(\theta) P_{K-1}(t-\theta) \\ P_0(t) = R(t) \end{cases}$$

En effet, cette intégrale est à caractère récursif, impliquant une intégration multiple avec changement de bornes d'intégration à chaque étape :

$$P_K(t) = \int_0^t d\theta_K \varphi(\theta_K) \int_0^{(t-\theta_K)} d\theta_{K-1} \varphi(\theta_{K-1}) \int_0^{(t-\theta_K-\theta_{K-1})} d\theta_{K-2} \varphi(\theta_{K-2}) \dots \int_0^{t-\sum_{k=2}^K \theta_k} d\theta_2 \varphi(\theta_2) \int_0^{t-\sum_{k=1}^K \theta_k} d\theta_1 \varphi(\theta_1) \int_0^{t-\sum_{k=1}^K \theta_k} d\theta_0 \varphi(\theta_0) \cdot R(t - \sum_{k=0}^K \theta_k) \quad (6.7)$$

Afin de mettre en évidence la problématique posée par le calcul d'une telle intégrale, nous proposons l'approche suivante :

- Considérons le cas $K=1$:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \int_0^t d\theta \varphi(\theta) P_0(t-\theta) \\ P_1(t) &= \int_0^t d\theta \varphi(\theta) R(t-\theta) \end{aligned} \quad (6.8)$$

Utilisons une méthode classique d'intégration (trapèze par exemple) avec n points pour calculer cette intégrale.

Le calcul de $P_1(t)$ fait appel au calcul de $R(t-\theta)$ aux n points d'intégration. Pour cette première étape cela est assez simple vu qu'on dispose de la forme analytique de $R(t)$. On aura eu à faire n estimations de $R(t-\theta)$.

• Pour $K=2$:

$$P_2(t) = \int_0^t d\theta_2 \varphi(\theta_2) P_1(t - \theta_2) \quad (6.9)$$

Le calcul de $P_2(t)$ avec n points, nécessitera n d'intégrations du type :

$$P_1(t - \theta_2) = \int_0^{t - \theta_2} d\theta_1 \varphi(\theta_1) P_0(t - \theta_2 - \theta_1)$$

qui elle même introduit n autres calculs, soit en tout on aura à faire n fois n calculs, c'est à dire n^2 calculs pour $P_2(t)$.

• Répétons l'opération précédente pour $K=3$.

$$P_3(t) = \int_0^t d\theta_3 \varphi(\theta_3) P_2(t - \theta_3) \quad (6.10)$$

L'estimation de $P_2(t - \theta_3)$ aux n points d'intégrations est nécessaire.

$$P_2(t - \theta_3) = \int d\theta_2 \varphi(\theta_2) P_1(t - \theta_3 - \theta_2)$$

Cette " sous " intégrale introduit à son tour n fois le calculs :

$$P_1(t - \theta_3 - \theta_2) = \int_0^{t - \theta_3 - \theta_2} d\theta_1 \varphi(\theta_1) P_0(t - \theta_3 - \theta_2 - \theta_1)$$

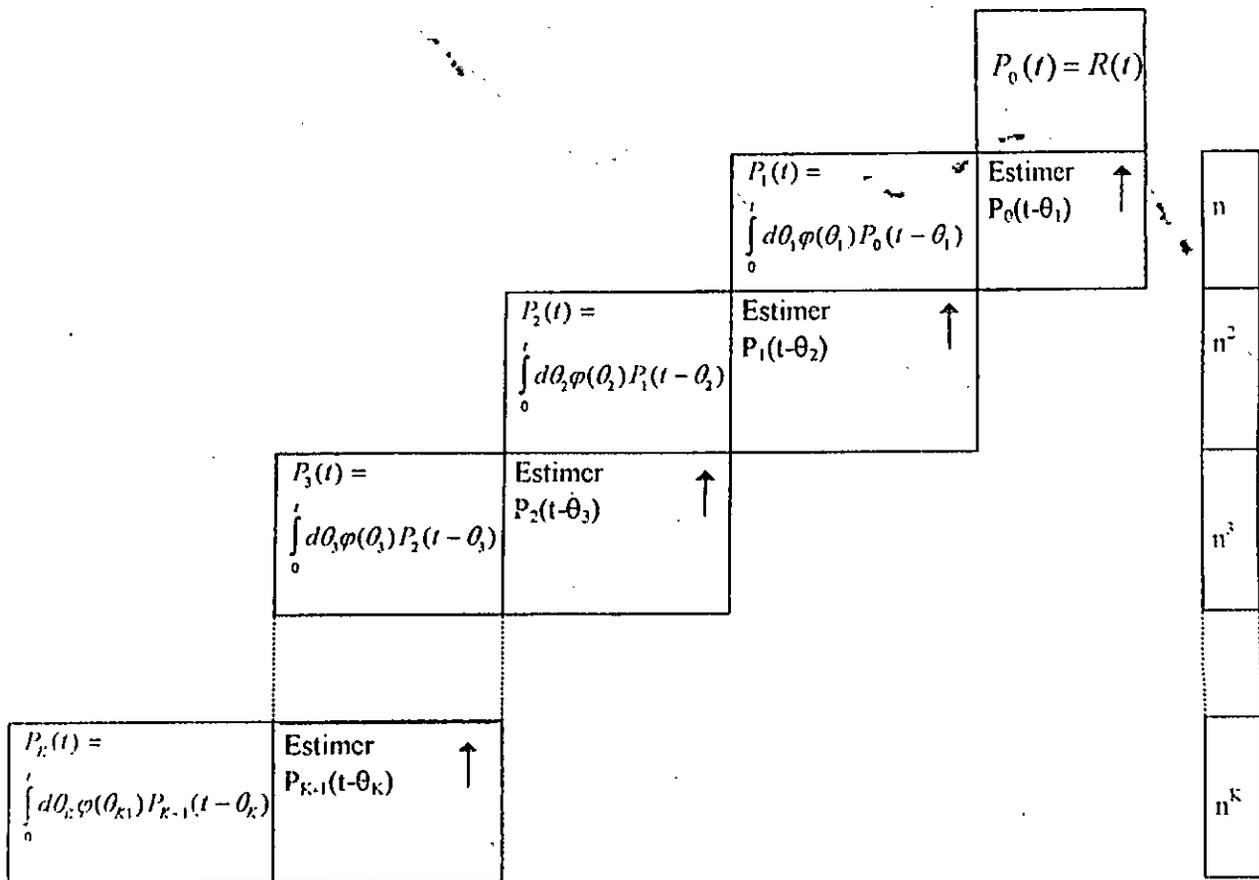
$$P_1(t - \theta_3 - \theta_2) = \int_0^{t - \theta_3 - \theta_2} d\theta_1 \varphi(\theta_1) R(t - \theta_3 - \theta_2 - \theta_1)$$

Cette dernière intégrale introduit, comme nous l'avons précédemment vu, n estimations de $R(t - \theta_3 - \theta_2 - \theta_1)$. On aura donc au total, à faire n fois n fois n calculs c'est à dire n^3 pour $P_3(t)$.

De manière générale n^K opérations seront nécessaires pour calculer $P_K(t)$.

Le tableau suivant résumera l'ordre des opérations et le nombre de calculs à effectuer.

Tableau n° 6.1: Ordre et nombres des opérations



A titre d'exemple, pour seulement 10 points d'intégration et pour $K = 100$, alors 10^{100} calculs seraient nécessaires pour estimer $P_{100}(t)$. En d'autres termes, si on effectue un calcul chaque 1/100 de secondes alors 10^{85} siècles seraient nécessaires.

A l'état actuel des choses un tel nombre d'opération n'est pratiquement pas faisable.

A cause du nombre de calculs astronomiques qu'elle nécessite, une telle démarche est prohibée. Ceci sans parler des erreurs d'intégration et surtout des erreurs d'arrondis qui se seraient accumuler au fil des calculs.

Le problème est de taille, comment faire pour le résoudre ? Une deuxième approche a été développée :

Considérons l'intégrale :

$$P_1(t) = \int_0^t d\theta \varphi(\theta) P_0(t - \theta)$$

$$P_1(t) = \int_0^t d\theta \varphi(\theta) R(t - \theta)$$

On effectuera ce premier calcul en n points t_i ,
pour $K=2$

$$P_2(t) = \int_0^t d\theta \varphi(\theta) P_1(t - \theta)$$

Comme pour $P_1(t)$, l'intégrale $P_2(t)$ sera calculé en n points t_i .

Pour chaque $P_2(t_i)$ on devra au préalable calculer $P_1(t_i - \theta)$ aux n points d'intégrations.

La grande différence dans ce cas est que les $P_1(t_i - \theta)$ ne seront plus calculés, à leur tour comme c'était le cas pour la première approche, mais interpolés parmi les $P_1(t_i)$ calculés précédemment ($K=1$).

On aura eu donc, n intégrales à calculer pour $P_1(t_i)$, ($i = 1 ; n$) et n autres intégrales pour $P_2(t_i)$, ($i = 1 ; n$). Soit au total $2n$ calculs (les interpolations ne sont pas à comptabiliser, puisqu'une fois faite, on disposera d'une formule analytique qui nous donnera les valeurs désirées par un simple remplacement).

On suivra le même procédé pour calculer $P_K(t)$, on voit aisément que cette nouvelle démarche ne nécessitera que Kn calculs. Cette simplification vient du fait que pour cette deuxième procédure, il n'est pas nécessaire de recalculer pour un K donné tous les P_{K-i} ($i = 1 ; K$) pour chaque point, comme c'était le cas pour la première approche.

On reprend l'exemple précédent, pour $n = 10$ points d'intégrations et $K = 100$, on aura 1000 calculs à effectuer, soit pour une vitesse de 1 calcul pour 1/100 de secondes. Ceci prendrait 10 secondes, ce qui est raisonnable et faisable.

Le tableau suivant récapitulera les calculs et l'évolution du nombre de calcul avec K.

Tableau n° 6.2: Ordre et nombre des opérations de la deuxième approche

| | | | | | | |
|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | R(t) | |
| | | | | P ₁ (t) | n pts t _i | Calculer P ₀ (t-θ) |
| | | | P ₂ (t) | n pts t _i | Interpoler P ₁ (t-θ) | n |
| | | P ₃ (t) | n pts t _i | Interpoler P ₂ (t-θ) | | 2n |
| | | | | | | 3n |
| | | | | | | |
| P _K (t) | n pts t _i | Interpoler P _{K-1} (t-θ) | | | | Kn |

Remarque: Nous avons utilisé pour l'interpolation la méthode numérique des splines cubiques [30].

6. Nombre moyen de renouvellement dans [0 , t]

Le nombre moyen de renouvellements est donné par :

$$H(t) = \sum_{K=1}^{\infty} KP_K(t)$$

Pour notre cas nous limiterons la sommation à n termes :

$$H_n(t) = \sum_{K=1}^n KP_K(t)$$

Bien sur, le nombre n devra être assez grand pour permettre la convergence de la série sans trop d'erreur.

Nous constaterons que pour des temps grands, la courbe de H_n(t) épouse assez bien la droite asymptotique (4.63), des fluctuations de faible amplitude autour de l'asymptote peuvent cependant être observées. Ces fluctuations sont d'origine numérique, elles sont provoquées par les erreurs commises (erreurs d'arrondis, erreurs d'intégration et erreurs d'interpolation).

Nous observons aussi, pour les temps très grands, que la courbe H_n(t) chute brutalement vers zéro, ceci s'explique par l'allure de la courbe de P_K(t) (figure 6.1), qui se présente sous la forme de cloches dont les sommets se déplacent (avec l'augmentation de K) vers les temps positifs.

En effet, pour t grand, dépassant les temps qui correspondent aux pics des $P_K(t)$, la somme (4.59) sera calculée avec des $P_K(t)$ pratiquement nuls d'où la chute vers zéro.

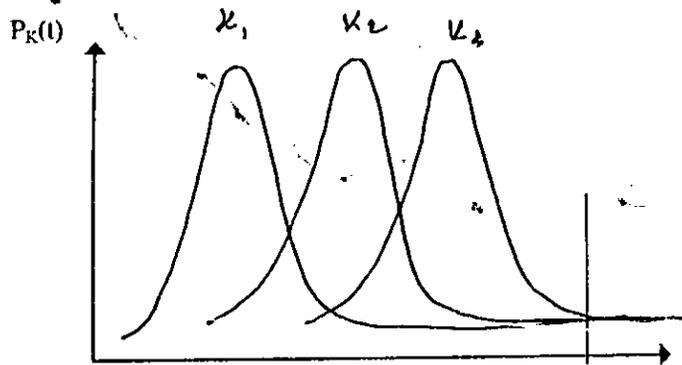


Figure 6.1: Allure des courbes $P_K(t)$

En conclusion et en tenant compte de ces dernières remarques, dès que $H_n(t)$ atteint son asymptote, on préfère cette dernière à la courbe elle-même.

Le bon comportement asymptotique de $H_n(t)$ atteste de la justesse des calculs effectués pour $P_K(t)$.

7. Calcul des coûts de maintenance

Les coûts correspondants aux différentes politiques de maintenance sont calculés à partir des formules (4.66), (4.67) et (4.71).

Le coût d'une maintenance préventive fait apparaître une intégrale (4.68) du type :

$$\begin{aligned} \bar{T}_i &= \int_0^t R(\theta) d\theta \\ &= \int_0^t e^{-\left(\frac{\theta-\gamma}{\eta}\right)^\beta} d\theta \end{aligned}$$

Cette intégrale sera calculée par une quadrature de *Gauss-Legendre*, qui est spécialement adaptée à ce cas de figure [20] et [31], néanmoins un travail de préparation est à faire :

Il est évident que l'intégrale sus-citée n'est définie que si : $t - \gamma \geq 0 \Rightarrow t \geq \gamma$

donc :

$$\begin{array}{ll} \text{si } \gamma > 0 & \text{alors } \theta \in [\gamma, +\infty[\\ \text{si } \gamma < 0 & \text{alors } \theta \in [0, +\infty[\end{array}$$

Effectuons le changement de variable suivant :

$$\omega = \frac{\theta - \gamma}{\eta} \Rightarrow d\omega = \frac{1}{\eta} d\theta \quad (6.11)$$

Nous avons alors :

$$\text{si } \gamma > 0 \quad \text{alors } \omega \in [0, +\infty[$$

$$\text{si } \gamma < 0 \quad \text{alors } \omega \in \left[\frac{-\gamma}{\eta}, +\infty[$$

Nous appellerons $\omega_0 = \frac{-\gamma}{\eta}$

L'intégrale s'écrira alors :

$$\bar{T}_t = \eta \left[\int_{\omega_0}^{\frac{t-\gamma}{\eta}} e^{-\omega^\beta} d\omega - E \int_{\omega_0}^0 e^{-\omega^\beta} d\omega \right] \quad (6.12)$$

$$\text{avec } E = \begin{cases} 0 & \text{si } \omega_0 > 0 \\ 1 & \text{si } \omega_0 < 0 \end{cases}$$

Nous appellerons

$$I_{\text{GDR1}} = \int_{\omega_0}^{\frac{t-\gamma}{\eta}} e^{-\omega^\beta} d\omega \quad (6.13)$$

$$I_{\text{GDR2}} = \int_{\omega_0}^0 e^{-\omega^\beta} d\omega \quad (6.14)$$

I_{GDR1} et I_{GDR2} seront calculées par une quadrature de Gauss-Legendre [29].

8. Discussion et critique

Nous discuterons dans cette partie les solutions apportées aux problèmes et surtout des limitations.

Tous nos calculs étant basés sur l'ajustement de points expérimentaux (fonction de répartition expérimentale) par un modèle mathématique qui est la fonction de répartition de Weibull, il serait légitime de se poser les questions suivantes :

Jusqu'à quel point la fonction de répartition expérimentale (rangs médians, rangs moyens) reflète elle vraiment la fonction de répartition réelle ? Sur quelle hypothèse s'appuie elle ? Nous n'avons hélas pas pu répondre à ces questions, cependant en nous basant sur la large utilisation de cette fonction de répartition en pratique (tables de Johnson) nous l'avons jugé assez significative pour entamer les calculs.

Les calculs seront fait sur la base de données recueillis en exploitation (chapitre 5), la véracité des résultats dépendra de certaines conditions :

- . Toutes les machines sont identiques
- . Les machines fonctionnent dans les mêmes conditions
- . La maintenance de routine (lubrification, ...) est régulièrement et correctement effectuée.

Afin de mesurer la qualité de cet ajustement, un test statistique d'adéquation a été effectué il s'agit là du test de Kolmogorov -Smirnov.

Concernant ce test, on attirera l'attention du lecteur sur le fait qu'étant déterminée à partir des points expérimentaux, la fonction de répartition n'est plus indépendante des données, nous avons même tout fait pour qu'elle s'y ajuste. En conséquence, le test de *Kolmogorov-Smirnov* surestimerà toujours la probabilité d'adéquation [24]. Il faudra en tenir compte lors de la prise de décision quant à l'acceptation ou au rejet du modèle théorique.

Nous avons l'intention d'appuyer le test de *Kolmogorov-Smirnov* par un autre test statistique, qui est celui de Khi-deux de *Pearson* exposé dans le chapitre 4, mais nous avons abandonné cette idée a cause de la nécessité d'avoir au moins cinquante observations pour que ce test soit significatif. Cette condition n'est pas toujours vérifiée en ce qui nous concerne.

9. Conclusion

L'outil présenté n'est essentiellement qu'un groupe de problèmes modélisés mathématiquement et pour lesquels la résolution a été faite grâce aux méthodes numériques puis programmée sur ordinateur. La création de liens entre les modules de calcul, et une combinaison astucieuse de ces derniers confèrent à l'outil fonctionnalité et convivialité.

Étant limités dans le temps, nous n'avons abordé hélas que le renouvellement simple des équipements, cependant ce modeste travail ouvre la voie vers l'informatisation de l'aide mathématique à la décision, outil de nos jours indispensable pour une utilisation optimale des liens et des techniques. Ceci pourrait éventuellement se faire dans le cadre d'autres projets de fin d'études dans les années à venir.

Conclusion Générale

Au terme de notre travail, la maintenance nous paraît être la synthèse de plusieurs techniques interactives au service de l'outil de production.

Nous avons tenté d'apporter une vue d'ensemble de ces techniques en essayant à chaque fois de trouver un juste équilibre entre l'information utile et le détail fastidieux, facilement accessible dans la riche bibliographie consultée sur avis des spécialistes de chaque discipline.

Nous incitons les futures promotions d'ingénieurs à se pencher plus avant dans le vaste domaine de la maintenance, vue l'importance de celle-ci dans notre pays où les équipements sont précieux car difficilement accessibles.

Bibliographie

- [1] G. Zwingelstein, "La maintenance basée sur la fiabilité", Hermès, 1996.
- [2] Prielle, "La maintenance".
- [3] AFNOR, "Maintenance industrielle", Recueil de normes française,-AFNOR, 1988.
- [4] L. Kusch, R. Rouiller, "Memento mécanique et métallurgie".
- [5] R. Gazaud, G. Pomey, "La fatigue des métaux", Dunod, 1969.
- [6] I. V.Kragelsky, "Friction Wear Lubrification, Tribology Hand Book".
- [7] H. Porontino, "Phénomène de cavitation dans les turbomachines", Renouveau pédagogique, 1982.
- [8] Van Wylen, Sonntag, Desrochers, "Thermodynamique appliquée", Renouveau pédagogique, 1992.
- [9] B.Aleman, M. Albert, "Boulons précontraints pour assemblage de haute rigidité", Dunod, 1967.
- [10] D. Devilliers, M. Chemla, "Cinétique électrochimique : transfert de charge dans les systèmes inorganiques" Techniques de l'ingénieur, Fiche K 830.
- [11] Cours d'électrochimie de 3^{ème} année, Département Génie Chimique, E.N.P.
- [12] B.J. Frèn, D. Nicolas, B. Degueurce, "Lubrification hydrodynamique : Palier et butées" Eyrolles, 1990.
- [13] W. Kurowsky, "Problèmes choisis su diagnostic des machines", Alger, 1984.
- [14] Documents de la société Vibro-Meter, "Équipements de surveillance pour machines tournantes", 1985.
- [15] R. Bigret, "Vibration des machines tournantes et des structures", Tec et Doc, 1980.
- [16] J Max, "Méthodes et techniques du traitement du signal", Dunod, 1985.
- [17] G Desodt, "Techniques du traitement du signal", Techniques de l'ingénieur, 1986.

- [18] G. Boufnar, " Application de la fonction d'autocorrelation pour le diagnostic des machines ", Projet de Fin d'Études, Département Génie Mécanique, E.N.P, 1987.
- [19] K. Amara, "Application de l'analyse spectrale au diagnostic des moteurs à combustion interne", Projet de Fin d'Études, Département Génie Mécanique, E.N.P, 1985.
- [20] L. Metina, "Méthodes rapides d'analyse des huiles usagées", Tec et-Doc, 1982.
- [21] J. Rigoux, "Le contrôle des moteurs diesel par la-spectrographie des huiles de graissage", Dunod, 1961.
- [22] P. Lyonnet, "Maintenance, mathématiques et méthodes", Tec et Doc, 1986.
- [23] J. Ligeron, L. Delage, S. Marcovici, "La fiabilité en exploitation", Tec et Doc, 1993.
- [24] H. Ventsel, "Théorie des probabilités", Mir, Moscou, 1982.
- [25] Cours de fiabilité de 5^{ième} année, Génie Mécanique, E.N.P.
- [26] G. Guyot, "Initiation à la maintenabilité", Dunod, 1986.
- [27] R. Faure, J.L. Lauriere, "Le renouvellement des équipements", Tec et Doc, 1990.
- [28] A. Gourdin, M. Boumahrat, "Méthodes numériques appliquées", O.P.U, Alger, 1991.
- [29] B. Carnahan, H.A. Luther, J.O. Wilkes, "Applied numerical methods". John Wiley & sons INC, 1969.
- [30] J.L. Jardin, "Analuse, algorithmes et programmes en PASCAL", Dunod, 1989.
- [31] B. Demidovich, I. Maron, "Éléments de calcul numérique", Mir, Moscou, 1979.
- [32] A.Nouma, R. Ramda, "Étude de la fiabilité des organes de locomotives GM au vue d'une maintenance à l'organe", Projet de Fin d'Études, Département Génie Industriel, E.N.P, 1990.

Annexe

Jeu d'essai 1 :

Nous avons utilisé les temps de bon fonctionnement (h) suivants [22] :

150 ; 700 ; 10000 ; 1400 ; 1600 ; 2000 ; 2150 ; 2350 ; 2500 ; 2650 ; 2750 ; 2950 ;
3050 ; 3150 ; 3250 ; 3350 ; 3450 ; 3600 ; 3700 ; 3800 ; 3900 ; 4000 ; 4100 ; 4200 ;
4300 ; 4400 ; 4500 ; 4600 ; 4700 ; 4800 ; 4900 ; 5000 ; 5200 ; 5400 ; 5600 ; 5700 ;
6200 ; 6600.

Jeu d'essai 2 :

Les temps de bon fonctionnement (h) de 9 roulements à billes ont été utilisés [22] :

205 ; 312 ; 402 ; 495 ; 570 ; 671 ; 601 ; 940 ; 1150.