

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



Faculté des **Hydrocarbures** et de la **Chimie**

## **Thèse de Doctorat**

Présentée par

**Djamel HALIMI**

Filière : Génie Mécanique

Option : Fiabilité et Maintenance industrielle

---

**Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures**

---

**Devant le jury :**

|           |            |      |      |           |
|-----------|------------|------|------|-----------|
| MOHAMMEDI | Kamal      | Prof | UMBB | Président |
| ABUDURA   | Salam      | Prof | UYFM | Examineur |
| CHERFIA   | Abdelhakim | MC/A | UMC  | Examineur |
| BOUALI    | Elahmoune  | Prof | UMBB | Encadreur |

Année Universitaire : 2013/2014

في هذه الرسالة، نهتم بتطوير أساليب ترمي للوصول للإعانة على أخذ القرار من أجل بناء برامج الصيانة، و القيام بالاختبارات بين مختلف البدائل المعترف عليها بعد تطبيق ال MBF (الصيانة على أساس النجاعة).

إن تسيير مدة حياة العتاد الخاص بالمنشآت البترولية و الغازية تحدد بعد الأخذ بعين الاعتبار الجوانب المتعلقة بمرحلة شيخوخة العتاد المصان العوامل الاقتصادية و التنظيمية من أجل إحكام الاستغلال، الصيانة و مدة صلاحية الأنظمة، المنشآت و الأجزاء، مع المحافظة على مستوى مقبول من الأمان و الجاهزية من أجل أن يضمن العتاد منافسة مقبولة، يجب تقييم أثار شيخوخة العتاد بطريقة دورية و تحديد العتاد الحساس و استراتيجيات الصيانة الأولية، كي تسيير مخاطر شيخوخة العتاد و نقترح استراتيجيات تسيير نجاعة العتاد الحساس.

إن تطوير أعمال هذه الرسالة يدخل في إطار مجال صناعي و هو فتح سوق المحروقات، الذي يفرض التنافسية على المنتجين و قابلية رد الفعل على تغيراته.

إن التسيير الأمثل لخصائص العتاد يفرض تطوير هذه الخصائص، مع تطبيق ال MBF و الاستغلال المتزايد للصيانة الوقائية الشرطية.

لمعرفة حالة عتاد المحروقات، و السماح بالأعمال الواجبة، أسلوبنا هو تعريف سياسات الصيانة المواتية لهم. حتى نطور خصائص هذا العتاد لنجاً لسياسات الصيانة الوقائية، الصيانة الشرطية و عمليات التفتيش. إذا كانت الصيانة الوقائية تلخص في أعمال تقام على العتاد في حالة شغل و الهدف منها إطالة هذه الحالة، فإن الصيانة الشرطية تسمح بكشف قياس المعالم الفيزيائية للعتاد و التحليل حتى نقرر في الوقت المناسب أعمال الصيانة و التفتيش و تدبير كمون أعطال العتاد حينما لا يكون في مراقبة مستمرة.

الصيانة الوقائية، الصيانة على أساس النجاعة، برامج الصيانة

## RESUME DE THESE

---

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au développement de démarches dont l'objectif est d'aboutir à un outil d'aide à la décision pour construire des programmes de maintenance en effectuant des choix entre les différentes alternatives identifiées suite à l'application de la MBF

La gestion de la durée de vie des équipements des installations pétrolières et gazières est définie comme étant la prise en compte des aspects liés au vieillissement et des facteurs économiques et réglementaires afin d'optimiser l'exploitation, la maintenance et la durée de vie des systèmes, structures et composants, de maintenir un niveau de sûreté et de disponibilité acceptables et de maximiser le retour sur investissement sur la durée de vie globale : il est nécessaire que la compétitivité des installations reste acceptable, il faut évaluer l'impact des effets de vieillissement des différents équipements sur la fréquence annuelle, identifier les équipements sensibles et les stratégies de maintenance prioritaires pour gérer les risques liés à l'âge des installations, puis proposer des éléments de stratégies permettant de gérer la fiabilité des équipements sensibles.

Les développements de cette thèse s'inscrivent dans un contexte industriel d'ouverture du marché des hydrocarbures qui oblige les producteurs à être plus compétitifs et plus réactifs à ces variations. Pour gérer au mieux les performances des installations, il est nécessaire d'améliorer les performances des programmes de maintenance ; avec l'application de la méthode MBF et l'utilisation croissante de la maintenance préventive conditionnelle. Pour connaître l'état des équipements des installations pétrolières et gazières et permettre les actions nécessaires, notre démarche est de définir les politiques de maintenance qui leur sont mieux appropriées. Pour améliorer les performances de ces équipements on fait recours aux politiques de maintenance préventives, de maintenance conditionnelle et d'inspection.

Si la maintenance préventive se résume en des actions entreprises sur les équipements en condition de fonctionner et qui sont effectuées afin de les garder dans des conditions de fonctionnement désirées, alors la maintenance conditionnelle permet de détecter, de mesurer les paramètres physiques d'un équipement fonctionnel, de les analyser afin de décider du meilleur moment pour entreprendre une action de maintenance et l'inspection permet de détecter les potentiels défaillances d'un équipement quand il n'est pas continuellement surveillé.

**Mots clés :** Maintenance préventive , Coût de maintenance, M B F, Modélisation de Prony, Restructuration des cycles de maintenance, Paramètres de dégradation

## Abstract

---

In this thesis, we are interested in developing approaches whose objective is to achieve a tool for decision support for building maintenance programs making choices between alternatives identified through the application of MBF. Managing the life equipment of oil and gas facilities is defined as the taking into account of aging and the economic aspects as well as regulatory factors in order to optimize operation, maintenance and life of systems, structures and components, to maintain acceptable level of safety and availability and maximize the return on investment over the overall life: it is necessary that competitiveness of facilities remains acceptable, the impact of aging effects of various equipment on the annual frequency must be assessed, identify sensitive equipment and priority strategies of service identified so chat to manage the risks associated with the age of the facilities, and then possible strategies explored to manage the reliability of sensitive equipment. The developments in this thesis are part of an industrial context of hydrocarbons market opening which requires producers to be more competitive and more responsive to these variations. To better manage the performance of facilities, it is necessary to improve the performance of maintenance programs, with the application of the MBF method and the increasing use of conditional preventive maintenance. To know the status of equipment for oil and gas installations and allow the necessary actions, our approach is to define maintenance policies which are most appropriate for them.

To improve the performance of these equipments use is made of preventive, predictive maintenance policies and inspection. If preventive maintenance is summarized as the actions taken on the equipment in service condition that are performed to keep them in desired operating conditions, then the conditional maintenance allow to the detection, measure the physical parameters of a functional equipment analyzing them to determine the best moment to take maintenance and inspection action to detect potential failures of equipment when it is not continuously monitored.

**Key words:** Preventive maintenance, Maintenance cost, RCM, Maintenance cycles restructuration, Degradation parameters.

## Liste des figures

---

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance.....   | 8  |
| Figure I.2 : Evolution de la maintenance depuis 1940.....   | 10 |
| Figure I.3 : Contenu de la fonction maintenance.....  | 11 |
| Figure I.4 : Politique de maintenance.....  | 12 |
| Figure I.5 : Processus de déroulement d'une maintenance corrective.....   | 13 |
| Figure I.6 : Classification des types de la maintenance.....  | 16 |
| Figure I.8 : Structure de la maintenance conditionnelle.....  | 19 |
| Figure I.9: Principe de la maintenance conditionnelle.....  | 20 |
| Figure I.10 : Paramètres de la maintenance conditionnelle.....  | 21 |
| Figure I.11 : Fonction globale de politique de maintenance<br>préventive conditionnelle.....                          | 27 |
| Figure I. 12 : Détermination de la durée de vie optimale.....   | 28 |
| Figure I. 13 : Choix d'une politique de maintenance.....  | 29 |
| Figure I.14 : Chemin logique de la mise en œuvre d'une maintenance<br>conditionnelle.....                             | 31 |
| Figure I.15 : Méthode d'optimisation basée sur la fiabilité.....  | 37 |
| Figure I.16 : Evaluation des performances de maintenance de type OMF.....   | 39 |
| Figure I.17 : Relations entre le profil d'exploitation et le comportement<br>des matériels d'un système maintenu..... | 40 |
| Figure I.18 : Evaluation de la maintenance et état des équipements.....   | 40 |
| Figure II.1. Schéma synoptique de la méthodologie.....  | 43 |
| Figure II. 2. Les trois approches pour l'estimation de la fiabilité<br>et de la durée de vie.....                     | 45 |
| Figure II.3 : Fiabilité décroissante avec le temps.....   | 48 |

## Liste des figures

---

|   |    |
|---|----|
| Figure II.4 : Évolution du taux de défaillance (courbe en baignoire.....  | 49 |
| Figure II.5 : Fiabilité des ensembles non réparables.....   | 50 |
| Figure II.6 : Structure en série.....   | 50 |
| Figure II.7 : Structure d'un arbre de défaillance.....  | 52 |
| Figure II.8 : Exemple d'arbre d'événements.....   | 53 |
| Figure II.9 : Exemple du diagramme de fiabilité.....  | 54 |
| Figure II.10 Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables.....  | 55 |
| Figure II.11 : Chronogramme d'un système réparable.....   | 56 |
| Figure II.12 : Conditions pour une analyse de maintenabilité.....   | 58 |
| Figure II.13. Schéma du modèle « remplacement selon l'état technique<br>avec contrôle d'un paramètre ».....                                       | 67 |
| Figure II.14. Schéma du modèle de remplacement d'un composant selon<br>son état lors du contrôle continu des paramètres.....                      | 69 |
| Figure II.15. Schéma du modèle de remplacement selon l'état lors du contrôle<br>discret des paramètres.....                                       | 70 |
| Figure II.16. Schéma du modèle de remplacement d'un composant lors d'une<br>défaillance non dangereuse (par contrôle du niveau de fiabilité)..... | 71 |
| Figure III.1 : Schéma du processus aléatoire des variations du paramètre X.....   | 76 |
| Figure III.2 : Exemple d'un spectre.....  | 84 |
| Figure III.3: Un signal et son spectre de Fourier.....  | 86 |
| Figure IV.1 les composants de la machines tournante.....  | 92 |
| Figure IV.2 : Position de la pompe dans le procédé.....   | 93 |

## Liste des figures

---

|   |  |
|---|--|
| <b>Figure IV.3 : analyseur VIBXpert des vibrations avec logiciel OMNITREND</b>  |  |
|   | <b>Appliquée sur la pompe étudiée.....94</b> |
| <b>Figure IV.4 : Organigramme de simulation.....</b>  | <b>95</b>                                    |
| <b>Figure IV.5 : signal émis par le système étudié.....</b>   | <b>97</b>                                    |
| <b>Figure IV.6 : spectres obtenu par la méthode de FFT.....</b>   | <b>99</b>                                    |
| <b>Figure IV.7 : spectres obtenu par la méthode de Prony.....</b>   | <b>101</b>                                   |
| <b>Figure IV.8 : Dépendance des probabilités Q, p et R en fonction de la périodicité<br/>du cycle deréparation des paliers portants du turbocompresseur considéré....</b> | <b>103</b>                                   |
| <b>Figure IV.9 : Coût spécifique <math>U_s (T)</math>.....</b>  | <b>103</b>                                   |
| <b>Figure IV.10 Taux d'arrêt en fonction du taux d'éléments.....</b>  | <b>106</b>                                   |
| <b>Figure IV.11 : variation des taux de défaillances en fonction du temps.....</b>  | <b>107</b>                                   |
| <b>Figure IV.12 : linéarisation du taux de défaillances des garnitures Oring.....</b>   | <b>108</b>                                   |
| <b>Figure IV.13 : linéarisation du taux de défaillances des bagues d'étanchéité.....</b>  | <b>108</b>                                   |
| <b>Figure IV.14 : linéarisation du taux de défaillances des paliers portants.....</b>   | <b>109</b>                                   |
| <b>Figure IV.15 : linéarisation du taux de défaillances des portes labyrinthes.....</b>   | <b>109</b>                                   |
| <b>Figure IV.16 variation des composants de la fonction objectif <math>S_i</math><br/>en fonction de <math>n_i</math>.....</b>  | <b>111</b>                                   |
| <b>Figure IV.17. Structure du planning des interventions correspondant à<br/>(1,5 ; 1,33 ; 1,5 ; 1,11).....</b>   | <b>112</b>                                   |
| <b>Figure IV.18. Structure du planning des interventions correspondant à<br/>(1,6 ; 1,25 ; 1,6 ; 1,25).....</b>   | <b>112</b>                                   |
| <b>Figure IV.19. Structure du planning des interventions correspondant à<br/>(1,3 ; 2,3 ; 1,33 ; 1).....</b>  | <b>113</b>                                   |

## Liste des tableaux

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tableau.I.1: comparaisons entre les différentes méthodes<br/>de maintenance préventive.....</b>                    | <b>24</b>  |
| <b>Tableau. I.2: Classement des défauts suivant les méthodes de détection.....</b>                                    | <b>25</b>  |
| <b>Tableau I.3 : Méthodes à utilisées en fonction des objectifs recherchés.....</b>                                   | <b>35</b>  |
| <b>Tableau II.1 : Relations entre les composants de la fiabilité.....</b>   | <b>47</b>  |
| <b>Tableau II.2 : Recommandations pour améliorer la maintenabilité.....</b>   | <b>60</b>  |
| <b>Tableau II.3 : Critères de l'indice de la maintenabilité.....</b>  | <b>62</b>  |
| <b>Tableau II.4 : Analyse des modes de défaillances.....</b>  | <b>65</b>  |
| <b>Tableaux II.5 : Echelle de criticité.....</b>  | <b>66</b>  |
| <b>Tableau IV.1 : évolution du pic principal.....</b>   | <b>102</b> |
| <b>Tableau IV.2 : Historique des éléments responsables de l'indisponibilité<br/>des compresseurs centrifuges.....</b> | <b>105</b> |
| <b>Tableau IV.3. Ajustement des données par le modèle de Weibull.....</b>   | <b>106</b> |
| <b>Tableau IV.4.Coûts de maintenance corrective et préventive.....</b>  | <b>107</b> |

## Nomenclature

---

$a$  : Espérance mathématique du nombre de défaillance dans l'intervalle  $[0, T]$

$C_{Ai}$  : cout relatif à la réalisation d'une intervention non planifiée.

$C_i$  : cout relatif à la réalisation d'une intervention planifiée.

$C_d$  : Coût total d'une intervention non planifiée

$C_p$  : Coût total d'une intervention planifiée

$E_{x,0}$  : Espérance mathématique du paramètre  $X$  à l'instant  $t=0$ , [mm].

$E_{x,t}$  : Espérance mathématique du paramètre  $X$  à l'instant  $t$  [mm].

$E(Tc)$  : L'espérance mathématique des coûts sommaires éventuels des interventions planifiées et non planifiées sur l'équipement.

$f(x, 0)$  : Distribution de densité de la variable aléatoire  $X$  à l'instant  $t=0$ .

$f(x, t)$  : Distribution de densité de la variable aléatoire  $X$  à l'instant  $t$ .

$F(x, 0)$  : Fonction de répartition de la variable aléatoire  $X$  à l'instant  $t=0$ .

$F(x, t)$  : Fonction de répartition de la variable aléatoire  $X$  à l'instant  $t$ .

$l, j, \dots, p$  : nombre d'interventions planifiés appliqués consécutivement sur les sous-ensembles 1, 2 et  $(m-1)$  pendant le temps  $t_m$

$k_i$  : Coefficient directeur de la régression du taux de défaillance du sous-ensemble  $i$

$m$  : nombre des sous-ensembles composant un matériel considéré

$n_i$  : les quantités de périodes du temps dont la durée est  $\Delta_i$

$n_{pi}$  : quantité d'interventions réalisée sur la période  $[0, T_i]$

$P_i$  : Probabilité de subir une intervention planifiée au moment  $t = iT_c$

$P$  : Probabilité totale correspondante à un remplacement d'un composant de l'équipement considéré

$P(T, h)$  : Probabilité d'avoir  $h$  défaillances dans l'intervalle  $[0, T]$

$Q_i$  : Probabilité de subir une intervention non planifiée au moment  $t = iT_c$

$Q$  : Probabilité correspondante à un arrêt d'urgence non programmé de l'équipement considéré.

## Nomenclature

---

$S$  : les dépenses des réparations planifiées et non planifiées durant la période de calcul de durée  $T$

$S_{x,0}$  : Ecart type du paramètre  $X$  à l'instant  $t=0$ , [mm].

$S_{x,t}$  : Ecart type du paramètre  $X$  à l'instant  $t$  [mm].

$T_c$  : Périodicité du cycle de réparation[h].

$T_m$  : Temps moyen de service du composant[h].

$U_s$  : Coût spécifique de réparation de l'élément considéré.

$X$  : Variable aléatoire qui correspond au paramètre d'état qui définit l'état de dégradation d'un élément [mm].

$X_r$  : Valeur de paramètre  $X$  qui correspond au début de la dégradation [mm].

$X_e$  : Valeur de paramètre  $X$  qui correspond à la perte de la fonction requise [mm].

$\Delta_i$  : La période d'intervention de maintenance planifiée du  $(i-1)$ eme sous ensemble.

$\alpha_E$  : Vitesse ou intensité d'usure [mm/h].

$\alpha_S$  : Coefficient directeur de la droite des écarts types du paramètre  $X$  [mm/h].

$\lambda_c$  : Ratio des couts.

$\lambda_i(t)$  : Taux de défaillance du  $i$ eme sous-ensemble

$\lambda(t)$  : Taux de défaillance global

$\lambda_i$  : Taux de défaillance initial du sous-ensemble  $i$

$\lambda_0$  : Taux de défaillance initial global

$\ddot{Y}$  : Durée moyenne possible de fonctionnement de l'élément jusqu'à la défaillance.

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction générale</b> .....   | 1  |
| <b>Chapitre I : Travaux relatifs à la maintenance industrielle</b> .....               | 5  |
| I.1. Introduction.....   | 6  |
| I.2. Maintenance des systèmes industriels.....   | 6  |
| I.2.1. La fonction maintenance.....  | 8  |
| I.2.1.1 Méthodes.....  | 8  |
| I.2.1.2 Ordonnancement.....  | 9  |
| I.2.1.3 Réalisation des interventions.....   | 9  |
| I.2.2. Evolution de la maintenance.....  | 9  |
| I.2.3. Politique de la maintenance.....  | 14 |
| I.3. Classification des méthodes de maintenance.....                                   | 16 |
| I.3.1. Maintenance corrective.....   | 16 |
| I.3.2. Maintenance préventive.....   | 17 |
| I.3.2.1 Maintenance préventive systématique.....                                       | 18 |
| I.3.2.2 Maintenance préventive prévisionnelle.....                                     | 18 |
| I.3.3. Maintenance préventive conditionnelle.....                                      | 18 |
| I.3.3.1 Principe de la maintenance conditionnelle.....                                 | 19 |
| I.3.3.2 Outils de la maintenance préventive conditionnelle.....                        | 20 |
| I.4. Classification des tâches de maintenance.....                                     | 21 |
| I.5. Choix des outils de surveillance.....   | 22 |
| I.6. Objectifs visés par la maintenance conditionnelle.....                            | 25 |
| I.7. Comparaison entre la maintenance corrective et celle préventive systématique..... | 26 |
| I.8. Choix de la politique de maintenance .....  | 27 |

|   |           |
|---|-----------|
| I.9. Mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle.....                          | 30        |
| I.9.1 Avantages et inconvénients de la maintenance conditionnelle..               | 32        |
| I.10. Optimisation de la maintenance conditionnelle.....                          | 33        |
| I.11. Maintenance basée sur la fiabilité (M.B.F).....                             | 36        |
| I.12. Etudes basée sur l'optimisation de la maintenance par la fiabilité OMF..... | 37        |
| I.12.1. Evaluation des stratégies de maintenance de type OMF.....                 | 38        |
| I.12.2. Exploitation et comportement des équipements.....                         | 39        |
| I.12.3. Evaluation de la maintenance et états des équipements.....                | 40        |
| I.13. Conclusion.....   | 41        |
| <b>Chapitre II : Etat de l'art de la maintenance basée sur la fiabilité.....</b>  | <b>42</b> |
| II.1. Introduction.....   | 43        |
| II.2. Méthodologie de la MBF.....   | 43        |
| II.2.1.Représentation d'un système à étudier en schémas blocs.....                | 44        |
| II.2.2. Collecte des données.....   | 44        |
| II.2.3. Estimation de la loi de fiabilité de chaque composant.....                | 44        |
| II.2.4. Optimisation de la maintenance.....                                       | 46        |
| II.3. Estimation des lois de fiabilité des composants.....                        | 46        |
| II. 3.1. Illustration mathématique de la fiabilité .....                          | 46        |
| II.3.2. Fiabilité des ensembles non réparables.....                               | 49        |
| II. 3.2.1. Schémas blocs.....   | 50        |
| II.3.2.2. Arbres de défaillances.....   | 51        |
| II.3.2.3. Arbres d'évènements.....  | 52        |
| II.3.2.4. Diagramme de fiabilité.....   | 53        |

|  |           |
|--|-----------|
| II.3.2.5. Fonction de structure d'un système.....  | 54        |
| II.3.3. Fiabilité des ensembles réparables.....  | 54        |
| II.3.4. Disponibilité des systèmes.....  | 55        |
| II.3.4.1. Amélioration de la disponibilité.....  | 56        |
| II.3.5. Maintenabilité des systèmes.....   | 57        |
| II.3.5.1. Mesure de la maintenabilité.....   | 57.       |
| II.3.5.2. Analyse du système de maintenabilité.....  | 58        |
| II.3.5.3. Choix des tests.....   | 60        |
| II.3.5.4. Critères de la maintenabilité.....   | 61        |
| II.3.5.5. Prévisions de la maintenabilité.....   | 61        |
| II.3.5.6. Indices de la maintenabilité.....  | 61        |
| II.4. Analyse des modes de défaillances par la méthode AMDEC.....  | 63        |
| II.4.1. Analyse qualitative de la défaillance.....   | 63        |
| II.4.2. Application de l'AMDEC.....  | 66        |
| II.5. La maintenance selon l'état avec le contrôle des paramètres.....   | 67        |
| II.5.1. Modèle de remplacement par le contrôle continu des paramètres.....   | 69        |
| II.5.2. modèle de remplacement par le contrôle discret des paramètres.....   | 70        |
| II.5.3. Méthodes de maintenance selon l'état par le contrôle du niveau de fiabilité.....   | 71        |
| II.6. Conclusion.....  | 71        |
| <b>Chapitre III : Détection des défauts et détermination des périodicités optimales de réparation d'un système industriel.....</b> | <b>73</b> |
| III.1. Introduction.....   | 74        |
| III.2. Maintenance Préventive Systématique.....  | 75        |

|  |           |
|--|-----------|
| III.2.1. Approche probabiliste à partir des paramètres d'état de dégradation.....                                  | 75        |
| III.2.1.1. Modélisation probabiliste au problème considéré.....  | 75        |
| III.2.2. Approche basée sur la linéarisation du taux de défaillance.....   | 79        |
| III.2.2.1. Estimation du nombre d'interventions durant l'intervalle du temps $[0, T]$ .....                        | 80        |
| III.2.2.2. Fonction objectif.....  | 81        |
| III.3. Maintenance préventive conditionnelle.....  | 84        |
| III.3.1. Représentation d'un signal par la méthode de Fourier.....   | 85        |
| III.3.2. Estimation de la densité spectrale par la méthode de PRONY.....   | 86        |
| III.3.3. Estimation des fréquences à partir des paramètres AR.....   | 87        |
| III.3.4. Conclusion.....   | 88        |
| <b>Chapitre IV : Résultats d'application et interprétations.....</b>   | <b>90</b> |
| IV.1. Introduction.....  | 91        |
| IV.2. Description de la pompe centrifuge étudiée.....  | 91        |
| VI.2.1. Rôle de la machine dans le complexe.....   | 93        |
| VI.2.2. Analyseur VIBXpert dans le logiciel OMNITREND de la pompe étudiée... ..                                    | 93        |
| VI.2.3. Analyse des signaux vibratoires de la pompe.....   | 94        |
| IV.3. Résultats et interprétations.....  | 95        |
| IV.3.1. Résultats des tests temporels des signaux émis par le système considéré.....                               | 95        |
| IV.3.1.2. Présentation du spectre de puissance des signaux émis par le système étudié par la méthode de FFT.....   | 97        |
| IV.3.1.3. Présentation du spectre de puissance des signaux émis par le système étudié par la méthode de Prony..... | 99        |
| IV. 3.2. Détermination de la périodicité d'intervention systématique optimale selon l'état du matériel.....        | 101       |

|  |            |
|--|------------|
| IV.3.3.résultat d'élaboration d'un planning de réparation appliqué aux compresseurs centrifuges..... | 104        |
| IV.3.3.1 Représentation graphique et linéarisation des taux de défaillances.....                     | 107        |
| IV.3.3.2 Plannings proposés.....   | 112        |
| VI.4.Conclusion.....   | 113        |
| <b>Conclusion Générale.....</b>  | <b>115</b> |

# Introduction Générale

---

Les impératifs du marché des hydrocarbures imposent aux entreprises à être compétitives. Il devient primordial de gérer au mieux l'outil de production dont les performances sont étroitement liées au processus maintenance. En effet la gestion optimale de l'outil de production tout au long de sa durée de vie, passe par la recherche d'un compromis entre les objectifs souvent conflictuels. On distingue d'une part les performances économiques, coûts et bénéfices, et d'autres parts les aspects de fiabilité, disponibilité des installations. Pour apporter des éléments d'aide à la décision face à ce problème, il est nécessaire de disposer d'outils et méthodes permettant d'analyser les installations et d'évaluer quantitativement leurs performances en termes de sûreté de fonctionnement.

La complexité de ces installations et des comportements des matériels qui les composent conduit à des stratégies de maintenance complexes, composées de différentes tâches. Par ailleurs la nature aléatoire des phénomènes de dégradation et de défaillances rend difficile la détermination d'une stratégie pour prendre des décisions relatives à leur maintenance. Parmi les composants de ces installations, on considère les machines dynamiques ; connues par leur importance capitale dans les unités et stations de compression de gaz et de pompage du pétrole et des produits pétroliers.

Ces machines sont soumises à des mécanismes de dégradation causant leurs défaillances et d'éventuels effets sur le fonctionnement des installations toutes entières. Leurs mécanismes de dégradation sont de plusieurs types : usure, fatigue, vieillissement, etc..., dont la cinétique d'évolution dépend de plusieurs facteurs, comme les conditions d'environnement et de fonctionnement.

Les plannings de maintenance des machines dynamiques en service dans les différents secteurs des hydrocarbures sont faits suivant les recommandations initiales des constructeurs. Ces plannings regroupent les opérations de maintenance à effectuer à intervalles réguliers et indiquent les âges préconisés pour chaque composant des machines dynamiques en exploitation.

Après des dizaines d'années d'exploitation, les conditions de fonctionnement de certains composants de ces machines deviennent plus sévères que celles spécifiées ; ils se détériorent plus vite que prévu et provoquent la panne de la machine avant les dates de maintenance planifiées par le constructeur. Ce problème perturbe les processus d'exploitation et de maintenance et engendrent d'énormes pertes de production, pertes financières, perte de temps et même réduire la compétitivité des entreprises.

Dans ce contexte cette étude vise à remédier à ce problème par le renforcement de la structure des cycles de maintenance préconisée par le constructeur, par des opérations de maintenance complémentaires dont on détermine le contenu et la fréquence. On aborde ce problème, en considérant une machine dynamique en exploitation comme un système multi composant à dégradation continue et monotone.

Vu l'importance du processus maintenance et de son impact sur les performances des machines dynamiques on fait recours aux méthodes d'optimisation qui permettent de construire ou à modifier les stratégies de maintenance. Pour maîtriser les coûts de maintenance des turbomachines exploitées dans les installations des hydrocarbures, on fait usage dans cette étude de la méthode d'optimisation de la maintenance des compresseurs centrifuges basée sur leur fiabilité ; qui constitue une approche d'aide à la décision pour déterminer les actions de maintenance préventive, c'est-à-dire les tâches à effectuer et leurs fréquences. En complément de l'application de l'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité ; des démarches de maintenance conditionnelle des pompes centrifuges basée sur la surveillance des vibrations sont développées dans cette étude pour mieux répondre aux forts enjeux de maintenance qui se posent aux entreprises pétrolières.

De plus d'une approche qui consiste à modéliser la défaillance des composants d'une machine dynamique par le biais d'un processus stochastique croissant dans le temps qui peut être assimilé à l'évolution aléatoire de la dégradation graduelle continue et d'un niveau limite. Le composant est considéré défaillant si son niveau de détérioration dépasse un seuil fixé ; on associe des informations partielles sur l'état d'un composant qui peuvent être obtenues par la surveillance de co-variables facilement observables, telles que les vibrations. On cherche à intégrer cette information dans le processus de décision. Il est facile d'imaginer les effets d'accélération de la dégradation d'un composant soumis à des vibrations pour lesquelles il n'a pas été spécialement conçu.

Par ailleurs une approche est développée dans un cadre permettant de modéliser les effets des vibrations pour prédire les performances de fonctionnement de tel ou tel composant.

Cette thèse est articulée en quatre chapitres :

Le premier chapitre traite une synthèse bibliographique des méthodes de maintenance, une présentation détaillée des concepts de base de la maintenance et de sécurité, ainsi que les différentes stratégies et politiques de maintenance dans les entreprises. Nous présentons en particulier les définitions de base et plus particulièrement les méthodes de maintenance basée sur la fiabilité ainsi que les problèmes posés par l'utilisation des méthodes de maintenance appliquées aux milieux industriels. Le but de cette introduction à la maintenance industrielle est de déterminer les objectifs des actions de maintenance, c'est-à-dire s'ils remplissent le cahier des charges de maintenance fixé lors de la conception du système en question. Pour atteindre les objectifs de maintenance des processus technologiques, on fait appel à des techniques qui deviennent de plus en plus sophistiquées. La finalité de cette sophistication croissante est l'amélioration des performances de la fiabilité, la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement de ces processus industriels.

Cette synthèse bibliographique permet l'appréhension des méthodes de maintenance pour les processus industriels et de confirmer que, celles fondées sur la fiabilité constituent un domaine de recherche intéressant.

Le second chapitre considère les approches de la maintenance basée sur la fiabilité MBF ; à laquelle on a ajoutée d'autres outils qui permettent de montrer jusqu'à ce que les causes initiales de l'anomalie ou de dysfonctionnement lors de la détermination des entités critiques qui nécessitent un plan optimale de maintenance, dont l'objectif est de cibler les actions de maintenance à mettre en place pour une rentabilité optimale. Pour concrétiser l'application de la méthode pour les turbomachines, il est possible d'identifier les éléments critiques dont le but est de définir un planning d'actions de basé sur la réduction des coûts de maintenance. La MBF est une approche qui utilise différents outils issus des méthodes déjà bien connues telles que la matrice de criticité, les grilles d'analyse de modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC) et le logigramme de décision.

La troisième partie de thèse développe à un premier temps les méthodes de détermination de la périodicité optimale de réparation d'un composant mécanique par une modélisation probabiliste à partir de ses paramètres d'état qui définissent la dégradation. Ainsi qu'un développement d'une fonction objectif basée sur la linéarisation des taux de défaillances afin de planifier des opérations de maintenance. Celle-ci sera appliquée par la suite aux composants vitales d'un turbocompresseur.

En un deuxième temps nous présentons une approche de détection des défauts à base de l'analyse spectrale qui sera utilisé par la suite à l'élaboration du choix de la stratégie de maintenance pour des applications industrielles. Dans notre cas, on a choisi un type d'équipements largement utilisé dans l'industrie des hydrocarbures, qui sont les pompes centrifuges. Cette approche repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée.

Le dernier chapitre illustre les résultats de l'approche de détection des défauts à base de l'analyse spectrale appliquée a une pompe centrifuge, ainsi que leurs interprétations ; et même ceux relatifs à la détermination de la périodicité optimale de réparation d'un palier de turbocompresseur par une modélisation probabiliste à partir de sa loi de dégradation ; la résolution de la fonction objectif basée sur la fiabilité et la planification des opérations de maintenance des composants considérés du turbocompresseur.

On termine enfin notre travail par une conclusion générale sur l'ensemble de nos travaux.

# CHAPITRE I

## TRAVAUX RELATIFS A LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE

---

Cette partie de la thèse est consacrée à une synthèse bibliographique des méthodes de maintenance pour les processus industriels. Nous présenterons en détail les concepts de base de la maintenance et de sécurité, ainsi que les différentes stratégies et politiques de maintenance dans les entreprises que nous allons utiliser par la suite notre application de surveillance vibratoire du système étudié. Nous présentons en particulier les définitions de base et plus particulièrement les méthodes de maintenance basée sur la fiabilité. Nous nous intéressons aux problèmes posés par l'utilisation des méthodes de maintenance appliquées aux milieux industriels. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer les objectifs des actions de maintenance, c'est-à-dire s'ils remplissent le cahier des charges de maintenance fixé lors de la conception du système en question. Pour atteindre ces objectifs de maintenance des processus technologiques, on fait appel à des méthodes qui deviennent de plus en plus sophistiquées. La finalité de cette sophistication croissante (accompagnée souvent de complexité) est l'amélioration des performances, de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement de ces processus industriels. Enfin, nous caractériserons la qualité de ces méthodes par des critères de validation sur des applications industrielles.

Cette synthèse bibliographique nous permet de comprendre les méthodes de maintenance pour les processus industriels et de confirmer que celles fondées sur des méthodes basées sur la fiabilité constituent un domaine de recherche intéressant.

## **I.1. Introduction**

La technologie industrielle accrue, la complexité et le coût croissant des équipements industriels et par conséquent la nécessité de réduire les temps d'indisponibilité de ces derniers, donne à la maintenance une importance croissante [19]. La maintenance constitue en effet une fonction essentielle des entreprises. On estime aujourd'hui qu'elle représente près de 5% à 7% du chiffre d'affaire annuel des industries en Algérie (soit 20 milliards d'euros) et plus de 450000 emplois (AFIM, 2007) dans [1]. A cet effet, dans ce chapitre, nous nous intéressons d'une part à définir le cadre et les hypothèses de notre étude, et d'autre part de présenter les politiques de maintenance déjà développées, dans des différentes applications industrielles ; afin de mettre en évidence les objectifs de nos travaux à réaliser. Les notions élémentaires en maintenance des systèmes industriels présentées dans ce premier chapitre ont pour objectif de recentrer le contexte de notre étude ainsi que d'en souligner la pertinence.

Dans ce cadre, la maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises industrielles, liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et d'éviter les dysfonctionnements au moindre coût. Au fil de ces changements, l'activité des personnels de maintenance a également évolué. Pour combiner les compétences technologiques, organisationnelles et relationnelles ; le champ de la maintenance industrielle regroupe les activités de maintenance qui se déroulent dans un milieu industriel, ce champ, exclus la maintenance des matériels de transport, des bâtiments ainsi que la réparation (service après vente) des matériels de la grande industrie : mécanique, électronique, informatique...etc.

Ce chapitre vise à décrire le contexte industriel dans lequel s'inscrit notre application dans ce travail de thèse. Plus particulièrement, de présenter la fonction maintenance ainsi que l'application de la méthode de maintenance conditionnelle pour répondre aux problèmes industriels actuels. Nous rappellerons dans ce qui suit les définitions données à certains principaux termes propres au domaine du diagnostic.

## **I.2. Maintenance des systèmes industriels**

Une action de maintenance consiste à remplacer les équipements du système qui ne sont

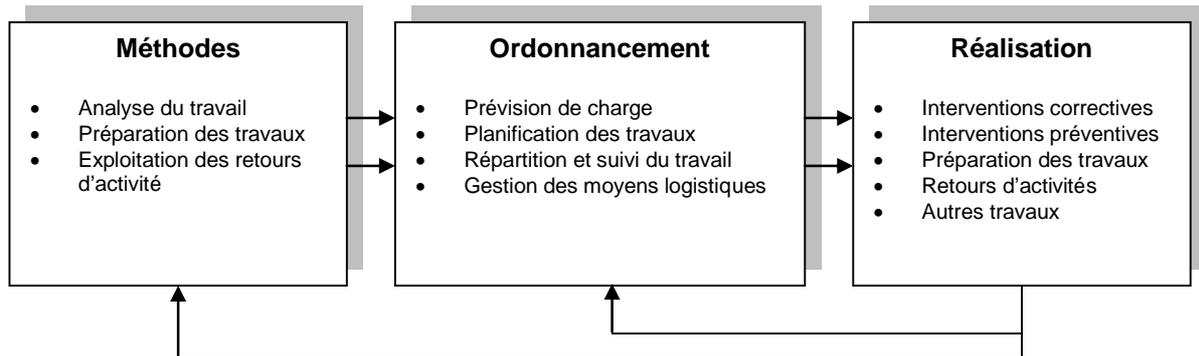
plus capables de réaliser leurs fonctions [22]. L'efficacité de cette action de maintenance dans les systèmes industriels est un enjeu économique majeur pour leur exploitation commerciale, les principales difficultés et sources d'inefficacité résident dans le choix des actions et des opérations de maintenance [28]. Ces opérations de maintenance sont coûteuses pour plusieurs raisons :

1. Tout d'abord, elles nécessitent souvent un arrêt de fonctionnement du système : dans ce cas, durant toute la phase de maintenance, le système n'est pas opérationnel. Plus la phase de maintenance est longue, plus elle est coûteuse à cause de l'indisponibilité du système. Par conséquent la phase de maintenance doit idéalement être réduite aux opérations consistant à remplacer, sans tâtonnement, les équipements réellement en panne. La décision d'une action de maintenance est très complexe et doit reposer sur une surveillance et une analyse intelligente de l'état du système. Un diagnostic de panne est alors nécessaire pour déterminer le plus précisément possible les équipements qui doivent être réparés. Moins le diagnostic est ambigu, plus les opérations de maintenance sont efficaces [28, 48].
2. La seconde raison pour laquelle une maintenance peut être coûteuse concerne les cas d'urgence dans lesquels la sécurité ou l'accomplissement de la fonction du système sont mis en jeu. En effet, lorsqu'un équipement tombe soudainement en panne et que le système ne peut plus réaliser sa fonction, des actions de maintenance doivent être automatiquement réalisées pour remettre le système en état de fonctionnement. Ces actions imprévues sont naturellement plus coûteuses car les besoins et services pour la maintenance n'ont pas été anticipés et doivent être rapidement disponibles. Pour minimiser l'occurrence de ce genre de situation, une maintenance préventive peut être envisagée [24].
3. Les pannes des équipements peuvent être anticipées et corrigées avant de générer de trop importants dégâts qui pourraient provoquer un arrêt imprévu du système. Le plus souvent, la maintenance préventive repose uniquement sur des analyses de fiabilité qui ne tiennent pas compte des sollicitations influençant réellement les équipements du système tout au long de son fonctionnement.

La notion formalisée de maintenance est née dans l'industrie vers la fin des années 1970. Avec cette notion, et dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, ...etc), qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité [6].

### I.2.1. La fonction maintenance

La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production; c'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée par les normes AFNOR [2]. Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise [4].



**Figure I.1 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance**

#### I.2.1.1 Méthodes

La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser [3]. Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis « d'accompagner » le prestataire lors de ces travaux sur site [12].

D'autres activités sont généralement confiées au service méthode :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles,
- Assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au diagnostic.

Les agents méthodes doivent être en phase avec le terrain et doivent également prendre du recul par rapport à l'évènement instantané, qui était seul pris en compte au temps de l'entretien.

### **I.2.1.2 Ordonnancement**

La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance [8]. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux. Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir à l'instant  $t$  et un endroit  $x$  où un personnel  $p$  muni d'un outillage  $o$  et des matières  $m$  exécutera la tâche  $M$  en harmonie avec les autres travaux connexes [3]. La difficulté principale de l'ordonnancement vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer les dépannages à un planning [78] Certains services de maintenance prétextent cette contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités, si 90% de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si grâce à une politique de prévention, ce taux passe à moins de 50% ce fortuit devient programmable [12].

### **I.2.1.3 Réalisation des interventions**

La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, dans les délais préconisés, pour réaliser dans les règles de l'art, une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié [92]. La réalisation peut nécessiter un diagnostic c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance.

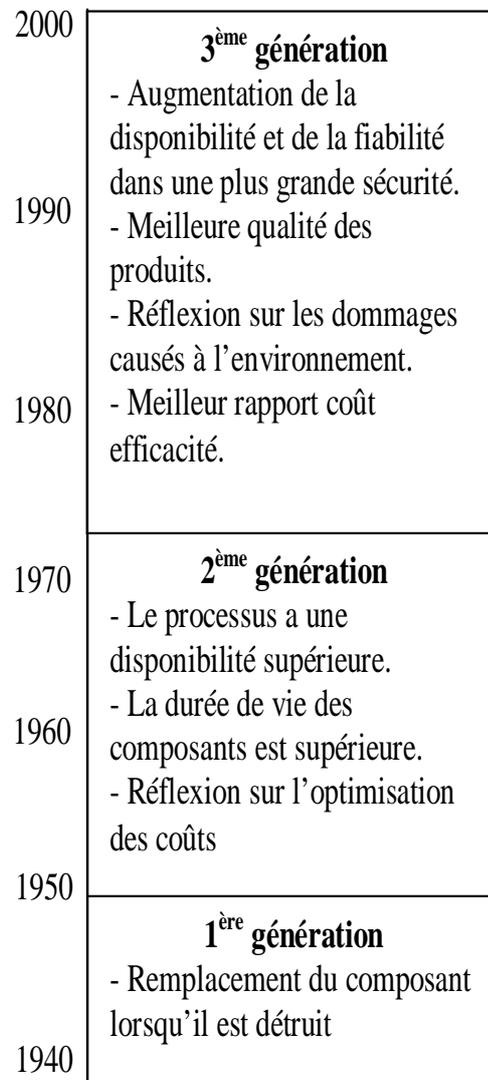
## **I.2.2. Evolution de la maintenance**

D'après Moubray dans [59] depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations, comme il est montré sur la (figure I.2).

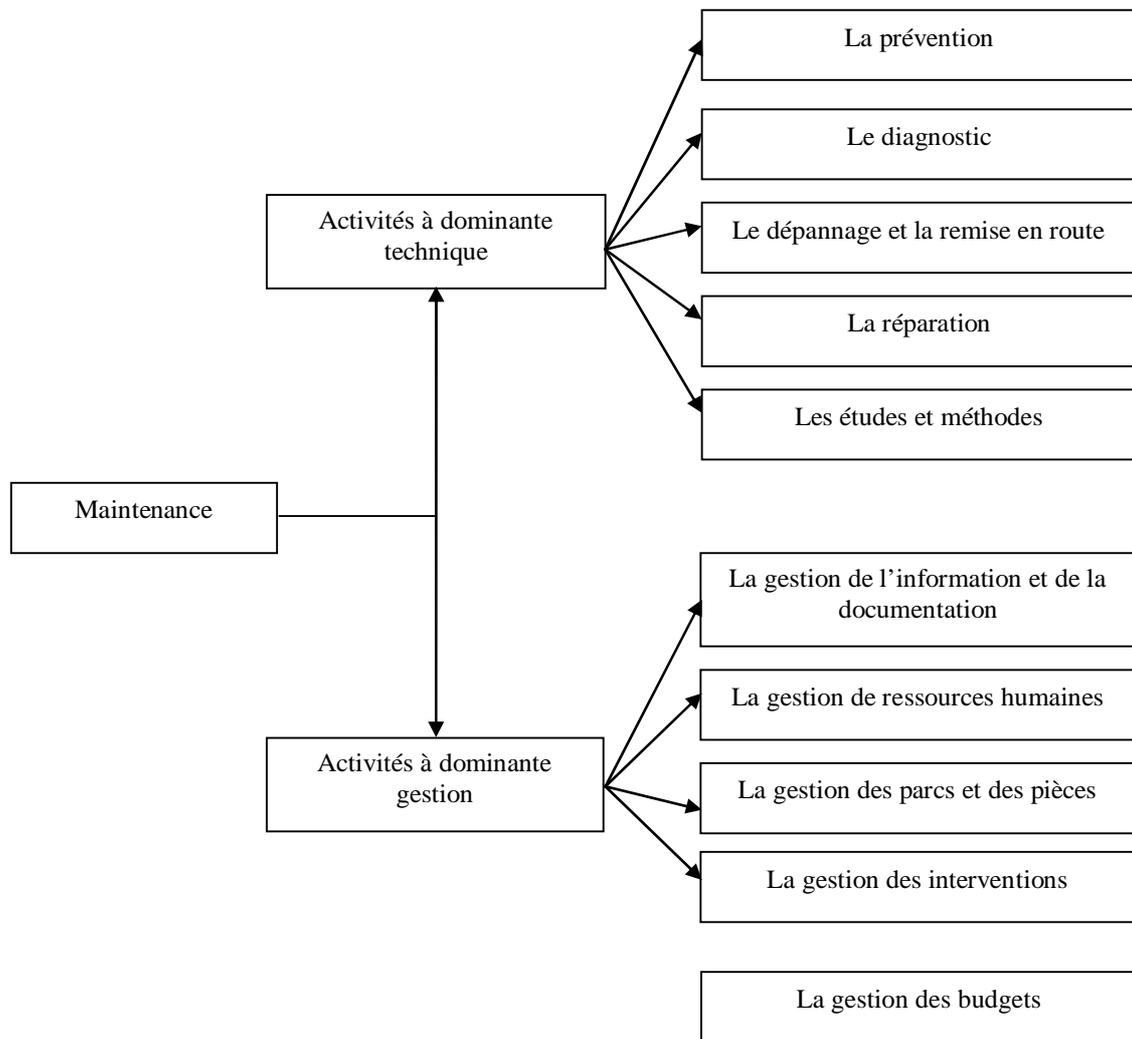
La troisième génération commence au milieu industriel dès les années 70, le processus de changement dans l'industrie rassemble encore plus de dynamiques et de remises en causes. Ces changements peuvent être classés sous les rubriques :

- Nouvelles attentes,
- Nouvelles recherches,
- Nouvelles techniques [24].

(Retour et al) dans [65] présentent la fonction maintenance comme ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominantes technique et les activités à dominante gestion, comme il est montré sur la (figure I.3).

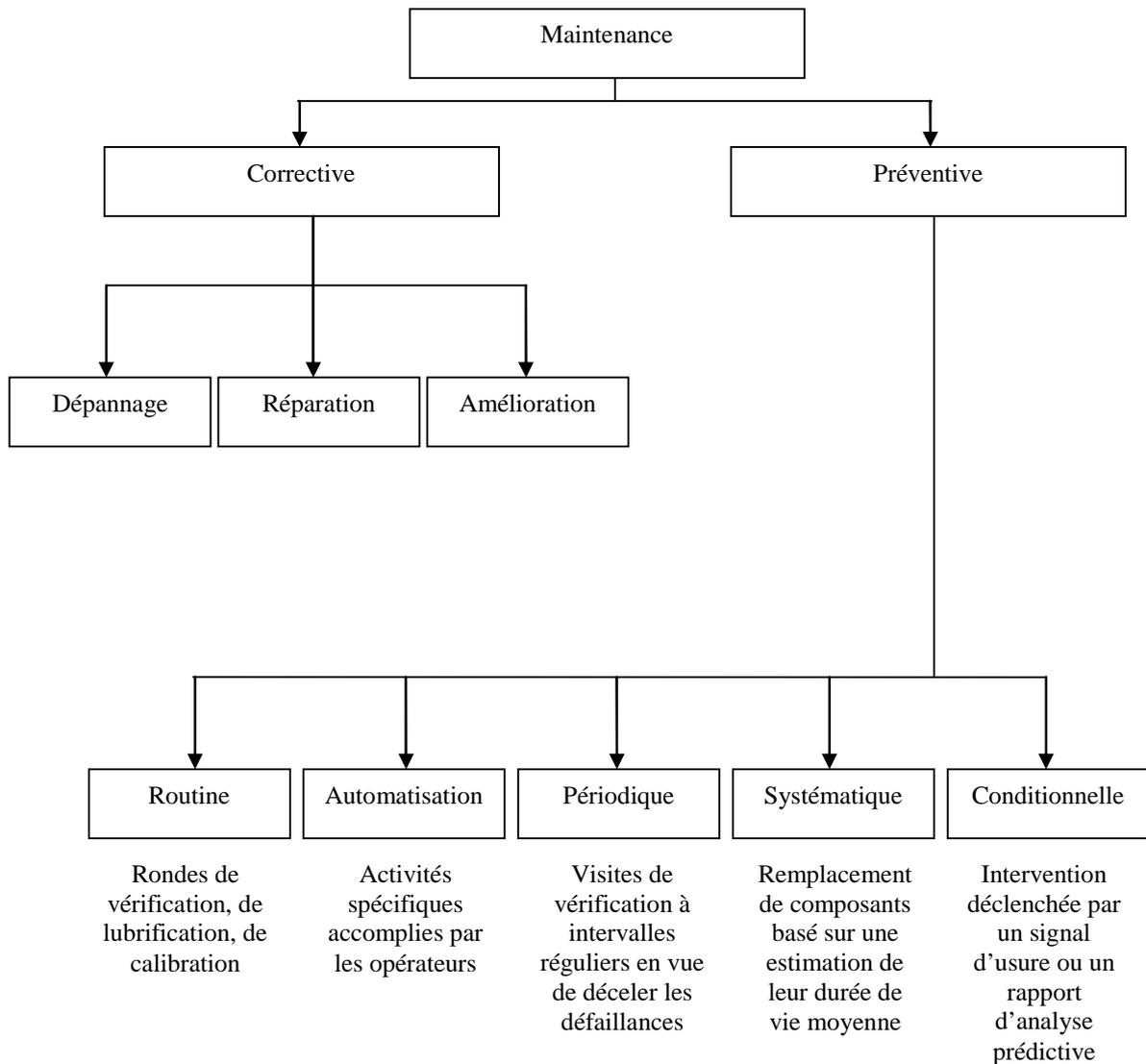


**Figure I.2 : Evolution de la maintenance depuis 1940**



**Figure I.3 : Contenu de la fonction maintenance**

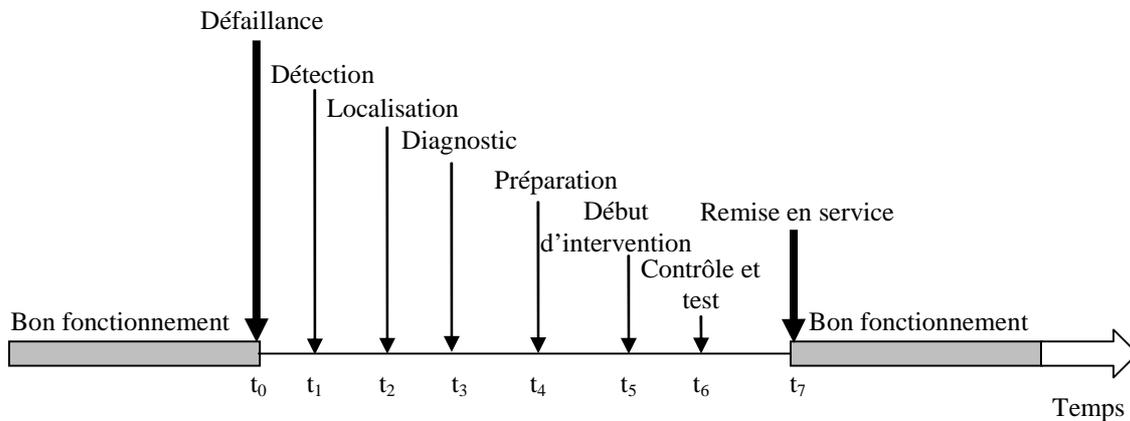
La norme FD X 60-000 (AFNOR, 2002) définit « la maintenance l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Dans la définition de la maintenance donnée par [2], nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive, le deuxième fait à l'aspect correctif. On peut résumer les différentes politiques de maintenance selon la (figure I.3). Une bonne synthèse de ces différentes stratégies de l'optimisation de la maintenance préventive, cela revient à attendre la défaillance, c'est-à-dire une maintenance corrective. De nombreuses études ont montré que les politiques de maintenance préventive (ou plutôt mixte) sont souvent les moins onéreuses sur le plan stratégique [24].



**Figure I.4 : Politique de maintenance**

La maintenance corrective est exécutée après une panne ou une défaillance (Figure I.4). Elle est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Pratiquement, c'est faire fonctionner sans entretien un système jusqu'à la « rupture, la panne ». Nous constatons, sur la (figure I.5), que les activités de maintenance corrective sont subies et découlent directement des conséquences de l'apparition d'une défaillance. Ces activités englobent deux types d'intervention [9]:

- Les interventions palliatives qui remettent le système en état de fonctionnement provisoire.
- Les interventions curatives permettant de réparer le système d'une manière définitive.



**Figure I.5 : Processus de déroulement d'une maintenance corrective**

La maintenance préventive peut se réaliser de diverses façons et comprend généralement :

- Les routines diverses sur le matériel, les interventions légères de surveillance, les corrections mineures ou ajustements réguliers [8]. On y inclut également les rondes de lubrification, de graissage et les vidanges dans le but de réduire les frottements, l'usure, éviter le grippage et économiser l'énergie.
- « L'auto-maintenance », ou la maintenance effectuée par les opérateurs de l'équipement [16]. Cette démarche appelée également TPM comprend généralement les réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou les remplacements d'éléments accessibles en toute sécurité.
- La maintenance périodique, impliquant un programme de maintenance établi en fonction du temps ou du nombre de cycles de fonctionnement. Elle comprend un ensemble de tâches d'inspection allant d'une simple vérification visuelle au démontage de composants dans le but d'identifier tout signe d'usure, toute détérioration notable nécessitant une réparation. Elle comporte également des tâches prédéfinies, comme le calibrage, le nettoyage, l'ajustement, la lubrification... . Si l'on ignore la durée de vie des pièces et des composants de l'équipement, ces visites périodiques imposent très souvent des travaux de maintenance décidés sur le champ ou planifiés dans un avenir rapproché [78].

- La maintenance systématique, demandant un suivi rigoureux du nombre d'heures ou de cycles de fonctionnement. Elle exige cependant une bonne connaissance des durées de vie et des caractéristiques de fiabilité des différents composants et sous-ensembles (ils seront remplacés systématiquement). Ce type de maintenance est souvent aux pièces critiques d'un équipement dont le coût d'indisponibilité serait élevé.
- La maintenance conditionnelle, plutôt subordonnée à un type d'événement prédéterminé (diagnostic, capteur, signal ou mesure) révélateur de l'état de dégradation. Ce type de maintenance est développé grâce à une meilleure connaissance de l'équipement, de leur cause et mode de défaillance tout en pouvant corréliser leurs apparitions avec un phénomène physique enregistrable. Pour cela, nous avons souvent recours aux analyses prédictives ou prévisionnelles permettant d'estimer la tendance évolutive du dysfonctionnement éventuel [49]. Cette détection est effectuée par un instrument de mesure associant le temps auquel il est possible de continuer à utiliser l'équipement avant la panne : par exemple, l'analyse des huiles, l'analyse des vibrations, la thermographie...

La maintenance prédictive est utilisée pour repérer les causes des problèmes survenant sur les machines ou les processus. Une implantation précise et opportune d'un plan d'action est ensuite systématiquement mise en place. Cette modalité de maintenance fournit à l'expert un moyen pour créer une réduction efficace du temps total de pannes des équipements. En fait, dans ce type de maintenance, les équipements fonctionnent presque sans subir d'arrêt non planifié ; le temps moyen entre les défaillances (MTBF) des équipements est considérablement allongé. L'objectif majeur d'une maintenance proactive est l'analyse de l'évolution « surveillée » des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions [49].

Les personnes responsables du management de la maintenance ont pour mission de piloter toutes les actions qui concourent à atteindre aux meilleures conditions techniques et économiques, les buts et objectifs qui leurs sont définis par la direction en matière de coûts, qualité, sûreté de fonctionnement, fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité, environnement, ...etc.

### **I.2.3. Politique de la maintenance**

La politique de maintenance fixe les orientations (méthode, programme, budget...etc), selon les objectifs fixés par la direction. Les activités de maintenance ont un effet de levier important sur la disponibilité des équipements de production de biens, la qualité du service

ou du produit, le coût d'exploitation comprenant en particulier les coûts de maintenance optimums [13].

Les contraintes à faire respecter et les objectifs à atteindre concernent généralement la sécurité des biens et des personnes, la préservation des équipements et leur durée de vie jusqu'à leur obsolescence, ainsi que la préservation de l'environnement. Ces exigences, performances et contraintes peuvent être contradictoires et les objectifs ne peuvent être que le résultat d'un compromis. C'est donc à partir de celui-ci que les activités de maintenance sont définies et planifiées [35]. La politique de maintenance conduit en particulier à faire des choix entre :

- Maintenance préventive et/ou corrective, systématique ou conditionnelle,
- Maintenance internalisée ou externalisée.

La politique de la maintenance est la définition, au niveau de l'entreprise, des objectifs technico-économiques relatifs à la prise en charge des équipements par le service maintenance. C'est dans le cadre de cette politique que le responsable du service de maintenance met en œuvre les moyens adaptés aux objectifs fixes ; on parlera alors de stratégie pour le long et moyen terme et de tactique pour court terme. La gestion de maintenance prend essentiellement en compte les aspects technique, économique et financier des différentes méthodes utilisables (corrective, préventive systématique et préventive conditionnelle) en vue d'optimiser la disponibilité des matériels. Elle s'organise en prenant pour base le budget affecté au service ; à partir de l'analyse d'observations, chiffrées ou non, calculées, relevées ou mesurées ; ce qui implique des choix. La définition des objectifs ne peut se faire qu'en concertation avec la direction technique et les services d'exploitation. La mise en œuvre d'une politique de maintenance représente un investissement, dont on attend des bénéfices.

Dans cette politique on doit s'attacher à la prévision des aléas pour les études d'inspection (entretien suivant diagnostic), faites à partir de relevés périodiques. On étudie la vie du matériel sur plusieurs années. Ces études de fiabilité vont servir à la détermination des probabilités des pannes, donc à la consommation des pièces de rechange et des différentes charges. Ce n'est qu'à partir de ces données qu'on peut élaborer les prévisions et le budget de maintenance. La maintenance est donc amenée à considérer alors les :

- **Prévision à long terme** : liées à la politique de l'entreprise permettant l'ordonnancement des charges, des stocks, des investissements en matériel.

- **Prévision à moyen terme** : la volonté de maintenir le potentiel d'activité de l'entreprise conduit à veiller à l'immobilisation des matériels à des moments qui perturbent le moins possible le programme d'exploitation.
- **Prévision à court terme** : dans ce cas le service de maintenance s'efforcera à réduire les durées d'immobilisations du matériel et des coûts de ses interventions. Sachant que les réductions des coûts et d'immobilisation ne sont possibles que si le matériel et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable, il est donc nécessaire de préparer le travail et d'étudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'exécution des interventions.

### I.3. Classification des méthodes de maintenance

Les stratégies de classification de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories [12]: la maintenance corrective et la maintenance préventive, comme il est montré sur la (figure I.6).

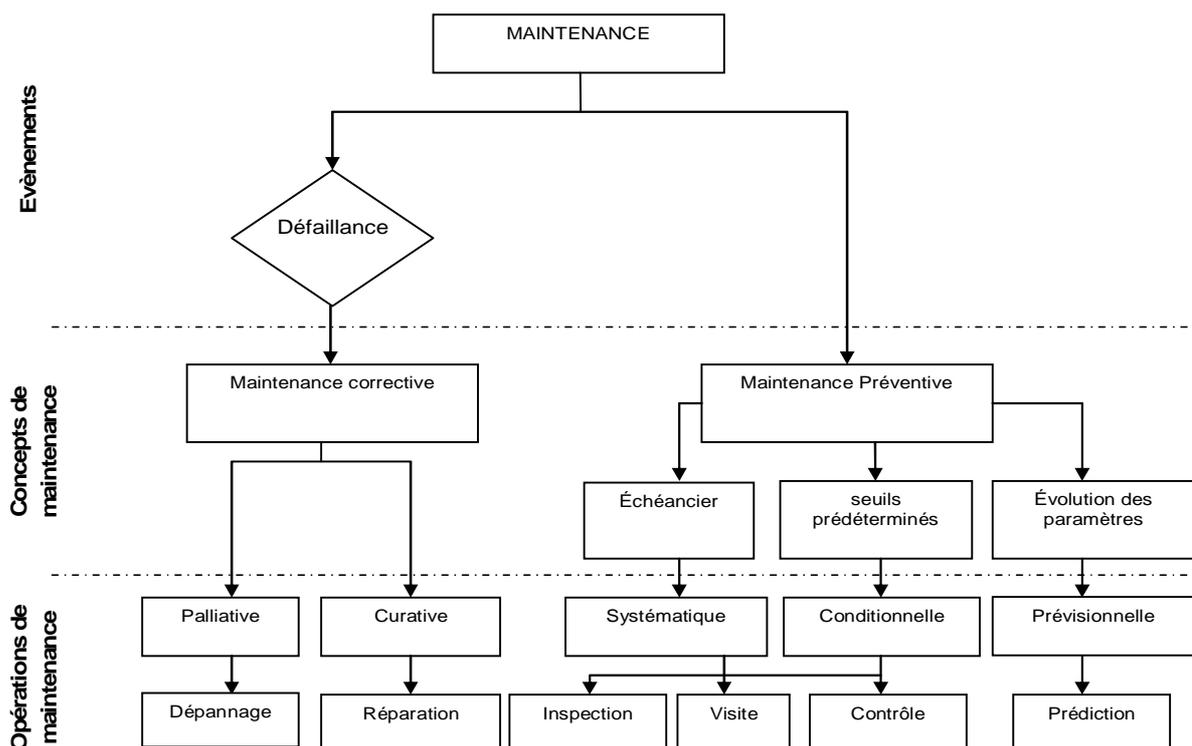


Figure I.6 : Classification des types de la maintenance

#### I.3.1. Maintenance corrective

La maintenance corrective (ou accidentelle) a pour objectif de rétablir le système après une défaillance (perte de la fonction requise) de manière à ce qu'il soit capable de fournir à

nouveau ses fonctions. On peut distinguer deux types de maintenance corrective : la maintenance curative et la maintenance palliative [13].

- **Maintenance curative**

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Cette remise en état du système est une réparation durable. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Une réparation est une opération définitive de la maintenance curative qui peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit après un dépannage, ce type de maintenance, provoque donc une indisponibilité du système [29].

- **Maintenance palliative**

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire. Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. Les opérations de dépannage sont souvent de courte durée et peuvent être nombreuses, et parce qu'elles ont lieu souvent ; elles sont également très coûteuses [16, 29].

### **I.3.2. Maintenance préventive**

Dans la définition de la maintenance préventive, nous incluons l'ensemble des contrôles, visites et interventions de maintenance effectuées préventivement. La maintenance préventive s'oppose en cela à la maintenance corrective déclenchée à partir des perturbations ou par les événements, et donc subie par la maintenance. La maintenance préventive comprend :

- Contrôles ou visites systématiques,
- Expertises, actions et remplacements effectués à la suite de contrôles ou de visites,
- Remplacements systématiques,
- Maintenance conditionnelle, ou contrôles non destructifs.

A partir de la définition générale de la maintenance préventive [24], on distingue trois variantes qui peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre:

- Maintenance préventive systématique,
- Maintenance préventive conditionnelle,
- Maintenance préventive prévisionnelle.

La maintenance préventive ne doit pas consister à dire à un agent de maintenance : « Si l'état de tel organe est bon » au moyen d'une liste de des points à examiner. Dans ce cas, si l'état est bon, on ne dit rien ; s'il n'est pas bon, il faut intervenir de suite, ce qui nécessite forcément une disponibilité en pièces de rechange, il s'agit d'une détection d'anomalie et non de maintenance préventive. Au contraire, la maintenance préventive doit consister à suivre l'évolution de l'état d'un organe, de manière à prévoir une intervention dans un délai raisonnable et l'achat de la pièce de remplacement nécessaire (donc on n'a pas besoin de la tenir en stock, si le délai normal le permet).

### **I.3.2.1 Maintenance préventive systématique**

Lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de maintenance systématique, l'opération de maintenance est effectuée conformément à un échéancier, un calendrier déterminé a priori. Aucune intervention ne peut avoir lieu avant l'échéance prédéterminée [13]. L'optimisation d'une maintenance préventive systématique consiste à déterminer au mieux la périodicité des opérations de maintenance sur la base du temps, du nombre de cycles de fonctionnement, du nombre de pièces produites... etc.

### **I.3.2.2 Maintenance préventive prévisionnelle**

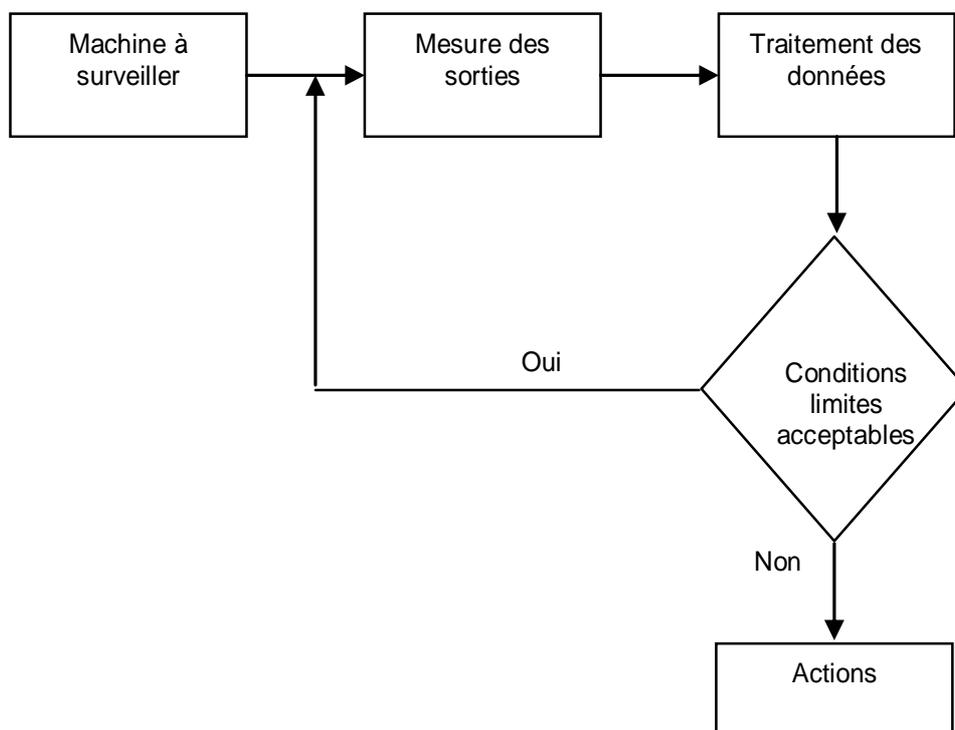
Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle. Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard [12].

### **I.3.3 Maintenance préventive conditionnelle**

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance conditionnelle ainsi : « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service », Donc il n'y a plus d'échéancier mais plutôt un événement, une condition, le franchissement d'un seuil, qui provoque l'intervention. Le signal peut être donné par un capteur décelant une dérive de comportement (élévation de

température, modification du niveau vibratoire, fuite, usure, etc...) comme il est montré sur la (figure I.8) à tout type de système pour lequel un capteur arrive à détecter une anomalie et c'est d'ailleurs grâce au développement de la technologie de ces capteurs que cette forme de maintenance a pu faire de tels progrès ces vingt dernières années [32].

Comme elle peut être appliquée suite d'une inspection ou d'un contrôle. Ainsi, le système n'est arrêté que lorsqu'il existe une certaine probabilité de défaillance, définie par l'analyse de niveaux d'indicateurs issus de mesures et établis en permanence au cours du fonctionnement. Cette méthode présente donc l'avantage d'éviter la surprise du disfonctionnements.



**Figure I.8 : Structure de la maintenance conditionnelle**

### I.3.3.1 Principe de la maintenance conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite [49]. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques de surveillance de l'état du bien (fiabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien. Cette opération nécessite de procéder au préalable au choix d'un certain nombre d'indicateurs de surveillance, issus d'un paramètre ou d'une grandeur plus ou moins élaborée dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. La (figure I.9) illustre le principe de ce type de maintenance conditionnelle [13].

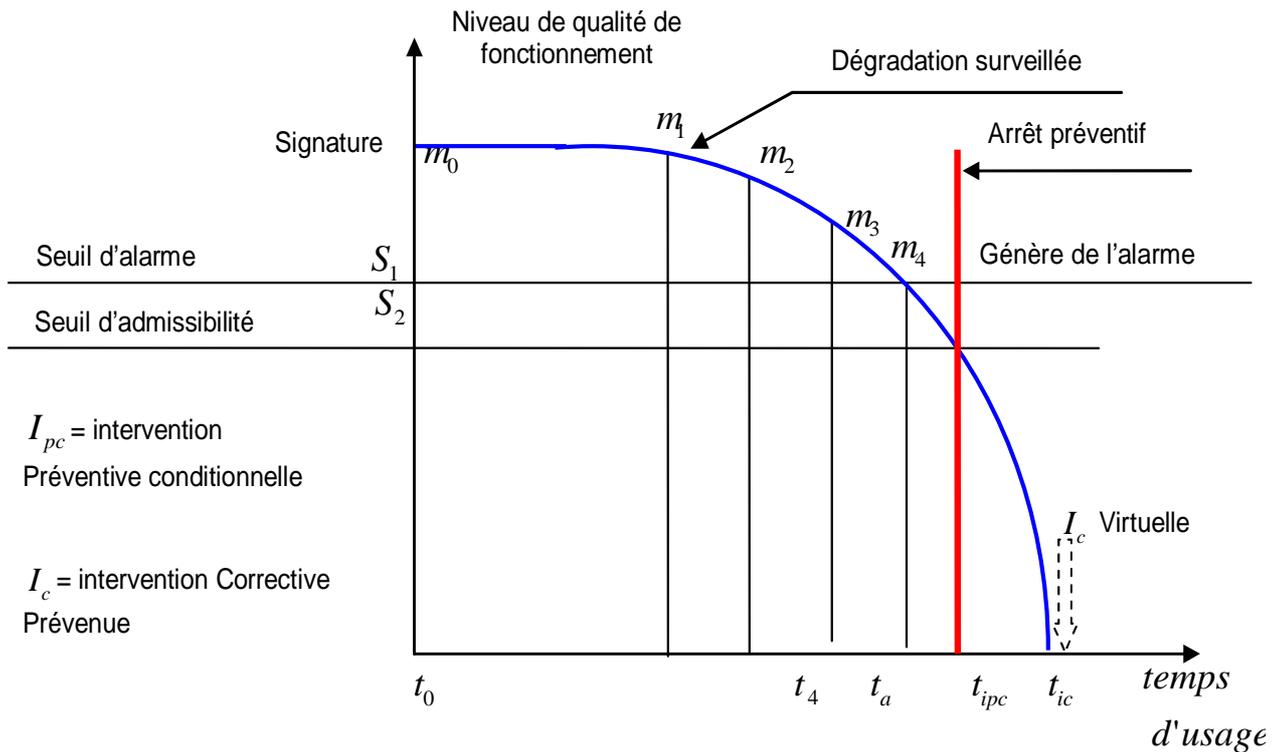


Figure I.9: Principe de la maintenance conditionnelle

### I.3.3.2 Outils de la maintenance préventive conditionnelle

Une variété de technologies peut être utilisée en tant qu'éléments d'un programme de maintenance préventive. Puisque les systèmes où les machines mécaniques occupent la plupart d'équipement d'usine, la surveillance de vibration est généralement la composante clé de la plupart des programmes d'entretien prédictif. Cependant, la surveillance de vibration ne peut pas fournir toutes les informations exigées pour un programme de maintenance préventif réussi [77]. Le suivi de l'évolution des paramètres permet de préciser la nature et la date des interventions, dans ce cas on peut utiliser une des trois méthodes suivantes voir la (figure I.10) :

- **Analyse des lubrifiants**
- **Thermographie**
- **Analyse vibratoire**

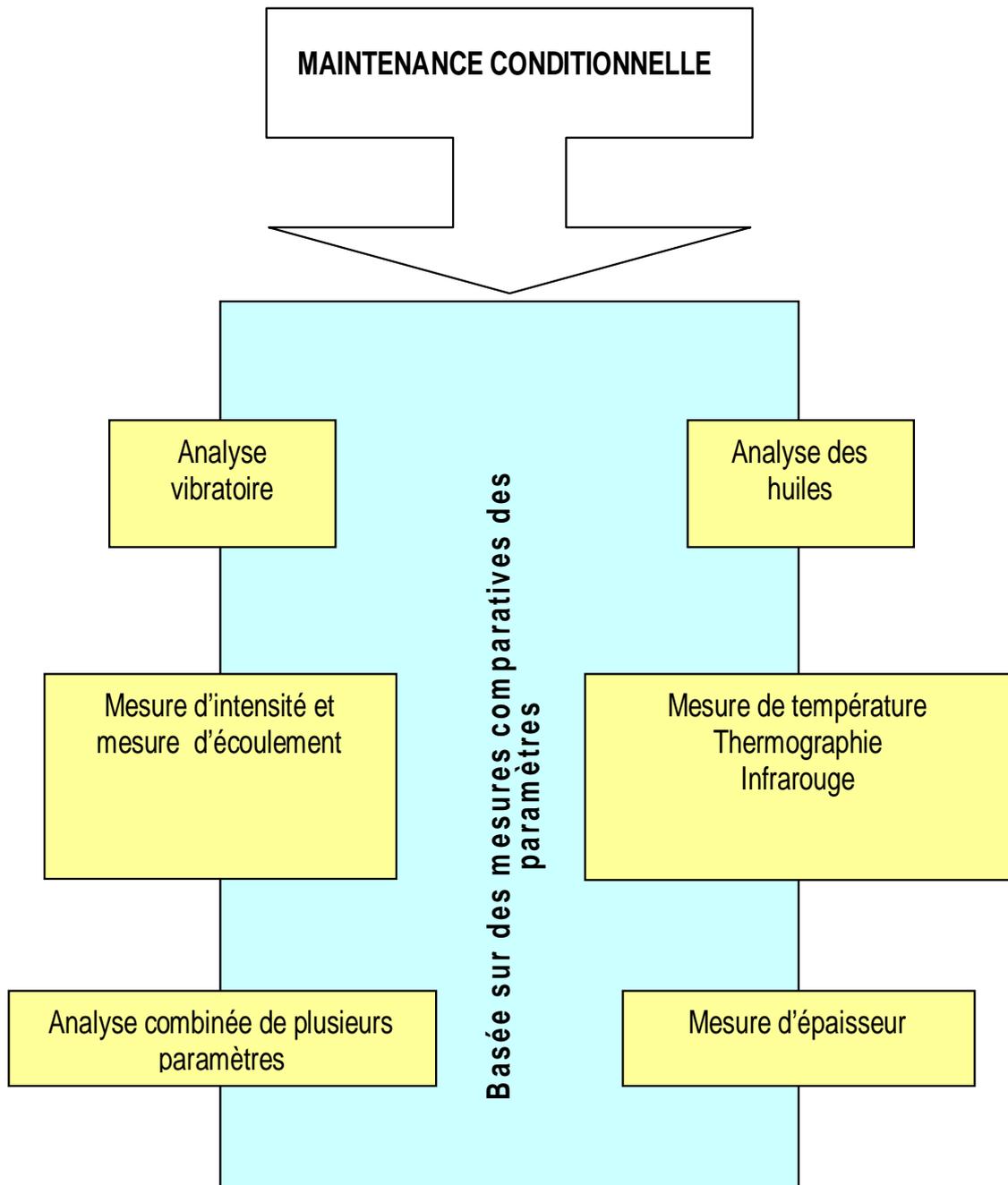


Figure I.10 : Paramètres de la maintenance conditionnelle

#### I.4. Classification des tâches de maintenance

Les tâches de maintenance sont classées en cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres, aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches [12] :

- **Tâches de maintenance du premier niveau**

Comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles

sans aucun démontage ; ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité, sans avoir la nécessité à un outillage spécifique.

- **Tâches de maintenance de deuxième niveau**

Comporte des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.

- **Tâches de maintenance de troisième niveau**

Nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc...) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.

- **Tâches de maintenance du quatrième niveau**

Est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis tel que du matériel d'essai ou de test, un banc de contrôle, ...etc.

- **Tâches de maintenance du cinquième niveau**

Comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur. Après avoir défini l'activité du service de maintenance dans le milieu industriel, nous allons maintenant en détailler la composition avec notamment ses ressources.

## **I.5. Choix des outils de surveillance**

Toutes les méthodes présentées dans les paragraphes précédents, ne permettent pas de voir les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine et la gravité du défaut. En effet, chaque méthode possède son champ d'application privilégié. Le (tableau I.1) montre des comparaisons entre les différentes méthodes de maintenance préventive.

|                     | Principaux avantages   | Principales limitations   | Champs d'applications privilégiée  |
|---------------------|--|---|--|
| Analyse vibratoire  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Détection de défauts à un stade précoce,</li> <li>▪ Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi,</li> <li>▪ Autorise une surveillance continue,</li> <li>▪ Permet de surveiller de l'équipement à distance (télémaintenance).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Spectres parfois difficiles,</li> <li>▪ Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses.</li> </ul>   | Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.   |
| Analyse d'huiles    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement,</li> <li>▪ Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules.</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ne permet pas de localiser précisément le défaut,</li> <li>▪ Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.</li> </ul>   | Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le processus (étanchéité) ... etc. |
| Thermographie<br>IR | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation,</li> <li>▪ Interprétation souvent immédiate des résultats.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire,</li> <li>▪ Contrôle limité à ce que 'voit' la caméra (échauffement de surface),</li> <li>▪ Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi</li> </ul> | Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).   |

|                           |   |   |   |
|---------------------------|---|---|---|
| <b>Analyse acoustique</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Permet de détecter de l'apparition de défauts audibles,</li> <li>▪ Autorise une surveillance continues.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sensibilité au bruit ambiant,</li> <li>▪ Diagnostic souvent difficile à réaliser,</li> <li>▪ Problèmes de répétitivité des mesures.</li> </ul> | Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire |
|---------------------------|---|---|---|

**Tableau.I.1: comparaisons entre les différentes méthodes de maintenance préventive [50]**

On signale avant de choisir, qu'il faut bien cerner la criticité de sa machine, et définir le type de surveillance qu'elle nécessite, comme il est présenté sur le (tableau I.2), par les principales méthodes de détection suivant les défauts potentiels.

| Type de défauts                    | Analyse Vibratoire           | Thermographie IR                    | Analyse de Huiles                        | Analyse Acoustique                     |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Déséquilibre, balourd              | <b>Oui</b>                   | <b>Non</b><br>(sauf s'il y a usure) | <b>Oui</b><br>(s'il y a un échauffement) | <b>Non</b>                             |
| Jeux, défauts de serrage           | <b>Oui</b>                   | <b>Non</b><br>(sauf s'il y a usure) | <b>Oui</b><br>(s'il y a un échauffement) | <b>Oui</b><br>(s'il y a une résonance) |
| Défauts spécifiques au roulement   | <b>Oui</b>                   | <b>Oui</b>                          | <b>Oui</b>                               | <b>Oui</b>                             |
| Défauts spécifiques aux engrenages | <b>Oui</b>                   | <b>Oui</b>                          | <b>Oui</b>                               | <b>Oui</b>                             |
| Défauts d'alignement               | <b>Oui</b>                   | <b>Non</b>                          | <b>Oui</b>                               | <b>Non</b>                             |
| Défauts liés à la lubrification :  | <b>Non</b><br>(Sauf paliers) | <b>Oui</b>                          | <b>Non</b>                               | <b>Oui</b>                             |

|   |                 |            |            |            |
|---|-----------------|------------|------------|------------|
| (dégradation de la qualité de l'huile)                            | <b>fluides)</b> |            |            |            |
| Manque d'huile  | <b>Oui</b>      | <b>Oui</b> | <b>Oui</b> | <b>Oui</b> |
| Défauts de nature électrique ou électromagnétique                 | <b>Oui</b>      | <b>Non</b> | <b>Oui</b> | <b>Oui</b> |
| Défauts liés aux écoulement (pour pompes et machines hydraulique) | <b>Oui</b>      | <b>Non</b> | <b>Non</b> | <b>Oui</b> |

**Tableau. I.2: Classement des défauts suivant les méthodes de détection [59]**

### **I.6. Objectifs visés par la maintenance conditionnelle**

La mise en œuvre d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle, nécessite les analyses techniques du comportement de système et leurs composants matériels. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances, dans le but d'améliorer la fiabilité des composants matériels de système industriel. Les objectifs de la mise en exploitation de ces méthodes de maintenance conditionnelle sont divers [49], et peuvent :

- **Garantir une bonne qualité des produits** : La qualité des produits est assurée avec l'augmentation du rendement. Cela est basé sur la surveillance quotidienne pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés.
- **Améliorer l'ordonnancement des travaux** : La garantie de fonctionnement sans interruption lourde permet d'envisager une réduction des encours de production, et une diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs. Cela implique une bonne coordination entre les deux services (production et maintenance) pour la planification des interventions et le respect du planning [8].
- **Assurer la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement** : La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning; elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

- **Améliorer la gestion des stocks** : La surveillance rapprochée permet le fonctionnement d'organes aux maximums de leurs durées de vie évitant ainsi la dépose et le rebut d'éléments ayant la capacité de rendre service. Ainsi, il en ressort une diminution sensible des stocks nécessaires de pièces de rechange, avec un approvisionnement des selon les besoins réels c'est à dire juste à temps.
- **Améliorer le climat de relations humaines** : Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production. Certains problèmes, comme par exemple le manque de pièces de rechange, entraîne l'immobilisation de la machine pendant longtemps, ce qui provoque une tension entre la production et la maintenance. En outre, la maintenance préventive conditionnelle valorise et motive le personnel du service par l'utilisation de techniques modernes pratiquées avec du matériel de haute technologie qui concoure à des interventions plus ciblées et bien organisées par la localisation préalable des pannes [50].
- **Réduction du coût global de la maintenance** : La maintenance conditionnelle a pour principal objectif l'amélioration et l'augmentation de la disponibilité des équipements. Pour cette forme de maintenance, les arrêts systématiques sont supprimés et l'augmentation du rendement est plus sensible. Le coup global de la maintenance est allégé car, la surveillance permet de déceler les petits défauts de conception ou de fonctionnement, de plus, l'observation de l'évolution d'une dégradation évite les destructions d'organes voisins par défaillance secondaire. Le risque de casses importantes et traumatisantes pour l'ensemble d'une machine, étant écarté, la durée de vie des systèmes est allongée.

### **1.7. Comparaison entre la maintenance corrective et celle préventive systématique**

Concernant la première forme, la défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants, les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Les contrôles des temps sont délicats, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions (coût de la main-d'œuvre élevés d'heures supplémentaires).

L'analyse des coûts d'entretien a prouvé que dépanner en mode réactif (c.-à-d., après la panne) sont normalement trois fois plus grands que même dépanner sur une base programmée [56]. Pour pallier à cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance. Le nombre

d'interventions reste en revanche faible.

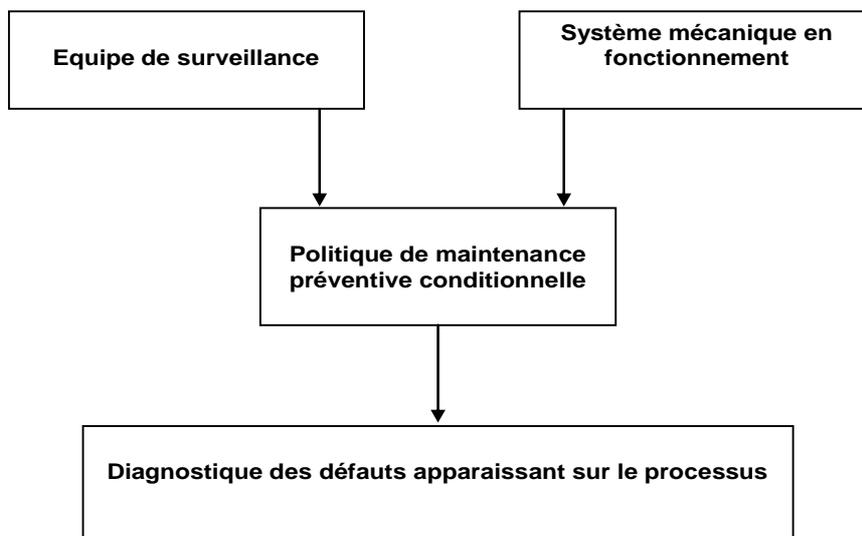
Pour le second cas de figure ; le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, mais les défaillances soudaines ne le sont pas. Les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion du personnel et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux :

- Bonne planification des opérations et des ressources,
- Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation). Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreurs humaines susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

### **I.8. Choix de la politique de maintenance**

Vu que la maintenance exige une combinaison rationnelle des moyens et qu'elle est permanente, elle nécessite une politique préalablement établie. Les travaux de recherche dans le domaine maintenance ont pour objectif de définir une politique de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils adéquats et adaptée à un système mécanique complexe. Cette politique de maintenance permettra ainsi à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement, et de décider des interventions de réparation [20], comme il est montré sur la (figure I.11).



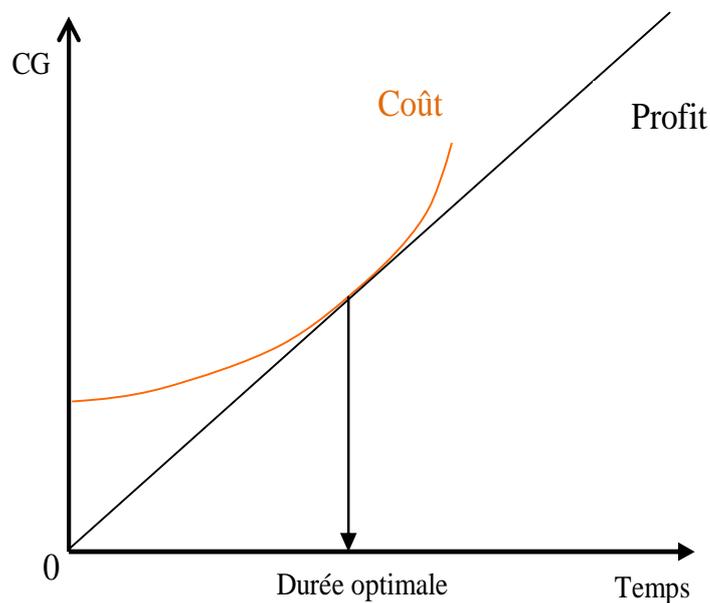
**Figure I.11 : Fonction globale de politique de maintenance préventive conditionnelle**

Le choix de cette politique de maintenance est déterminé par le calcul du coût global de durée de vie (life cycle cost.), en se basant sur des contraintes bien identifiées, A long terme, il s'agit d'abord de juger de la durée de vie optimale d'une machine en estimant la somme des coûts suivants : Coût d'achat  $A$ , coût de fonctionnement  $f$ , coût total de maintenance  $M$  et la valeur de revente éventuelle  $VR$ , le coût global est donné par l'équation (I.1) suivante :

$$CG = A + f + M - MR \quad (I.1)$$

Le coût total de maintenance ayant tendance à augmenter avec l'âge de la machine, et la valeur de revente à diminuer, il est intéressant de déterminer la durée au bout de laquelle on atteint un minimum [19].

Cette durée de vie optimale correspond à l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine présentée sur la (figure I.12) :



**Figure I. 12 : Détermination de la durée de vie optimale**

Le coût total de maintenance étant réalisé, il faut choisir pour chaque machine ou groupe de machines un type de maintenance approprié. On peut utiliser des critères de choix simple, résumés par des arbres présentée sur la (figure I.13).

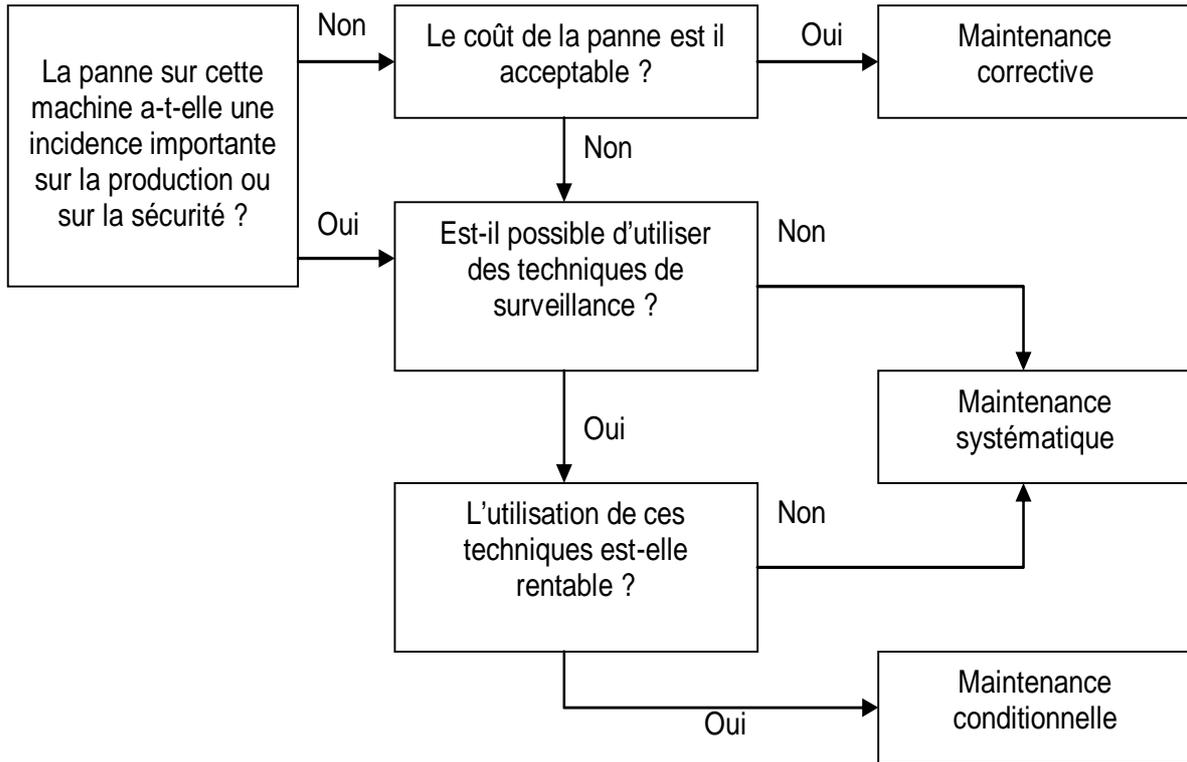


Figure I. 13 : Choix d'une politique de maintenance

Dans le premier cas, nous suivons l'évolution du taux de défaillance du composant en fonction du temps. Nous choisissons le type de maintenance en fonction de l'évolution de ce taux, de l'incidence sur la sécurité et la progressivité de la panne. On peut aussi dans le deuxième cas, estimer pour chaque élément, le rapport entre le coût (**c**) d'une intervention préventive effectuée dans de bonnes conditions, et le coût (**C**) supplémentaire supporté en cas de défaillance.

Si ce rapport **C/c** est négligeable, la maintenance corrective est la plus intéressante. S'il est élevé, une maintenance préventive systématique ou conditionnelle s'impose. Si le composant présente des paramètres mesurables (huile dans une boîte à vitesse, éléments tournants, etc.), on peut choisir la maintenance conditionnelle sinon la maintenance systématique est adoptée. On peut alors classer les éléments de la machine en fonction de la valeur de ce rapport en : vital (**C/c** élevé), important (**C/c** moyen), secondaire (**C/c** faible) [24].

L'efficacité de la maintenance s'appuie sur une connaissance exhaustive du matériel et de

son comportement. Il est utile de connaître l'évolution dans le temps de la fiabilité des éléments vitaux et de pouvoir préciser leurs types de défaillances probables. Ces connaissances proviennent de l'expérience sur le terrain mais aussi de l'exploitation statistique des défaillances constatées.

### **I.9. Mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle**

La mise en place d'un programme de maintenance prévisionnelle et sa pérennité nécessitent une préparation minutieuse (figure I.14) qui peut se scinder en trois phases : l'étude de faisabilité, le choix des acteurs et le démarrage du programme. La méthodologie de la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle est proposée, en plusieurs étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l' **lpc** :

- Sélection des défaillances à prévenir,
- Sélection d'un (ou n) paramètre physique descriptif de l'évolution du défaut,
- Choix du mode de collecte des informations,
- Suivre le paramètre descriptif dans le temps à l'aide de courbes de tendance (Maintenance continue ou périodique, périodicité à définir),
- Choix du traitement de l'information,
- Établir des seuils limites d'avertissement (pré- alarme),
- Établir le diagnostic de défaut,
- Prédire la date de bris (extrapolation de courbes),
- Commander les pièces de rechange,
- Organisation de l'intervention préventive conditionnelle **lpc**,
- Bilan d'efficacité et retour d'expérience.

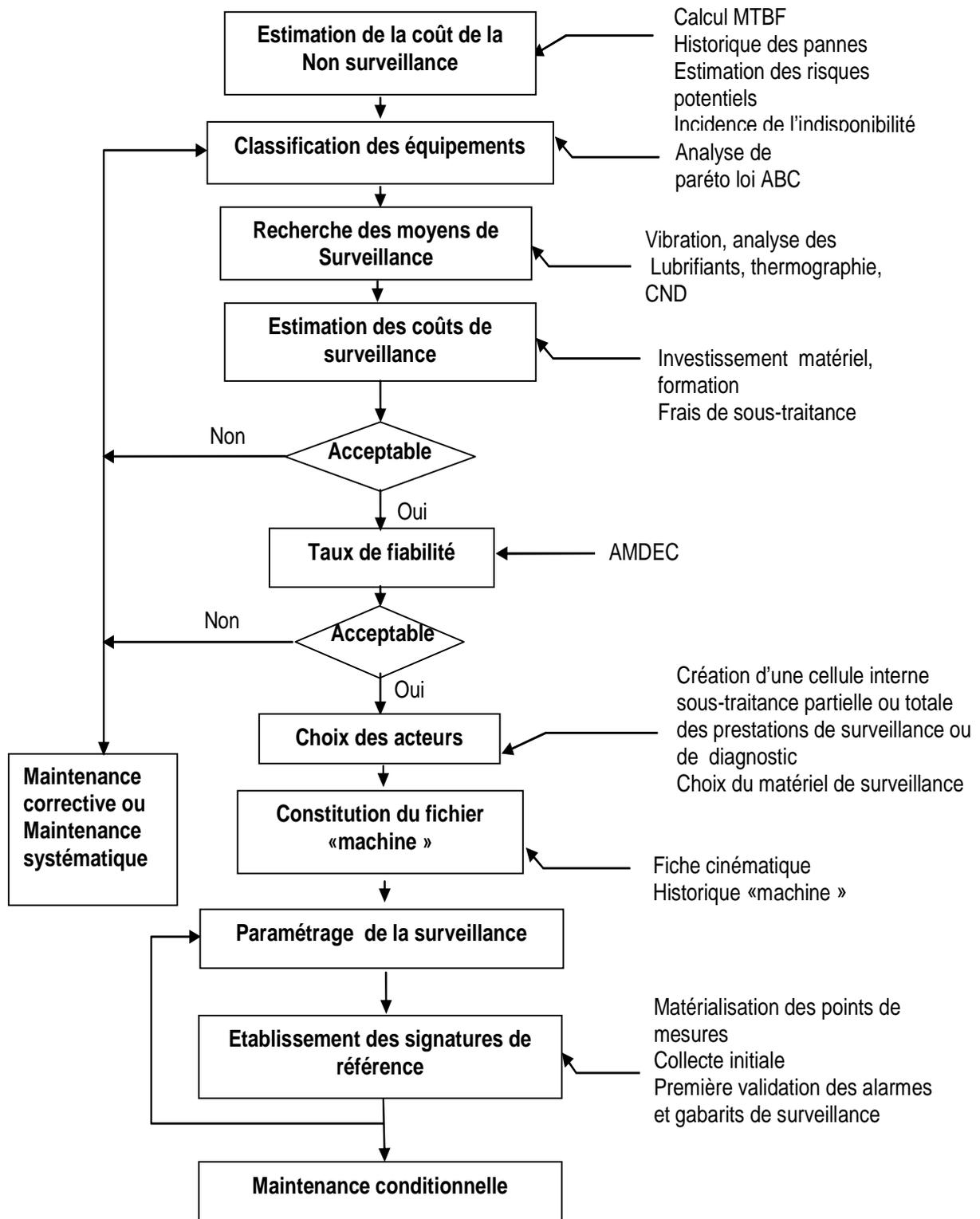


Figure I.14 : Chemin logique de la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle

### I.9.1 Avantages et inconvénients de la maintenance conditionnelle

#### . Avantage :

##### ❖ Aspect financier

1- Diminution des coûts des interventions ;

- En orientant l'intervention mécanique pendant l'arrêt grâce à un diagnostic préalable de manière à optimiser la durée de l'intervention et les stocks de pièces de rechange ;
- En estimant la nécessité de l'arrêt (prolongement des intervalles de temps entre les arrêts systématiques).

2- Diminution des pertes d'exploitation (gain parfois très important)

- En évitant les arrêts intempestifs qui génèrent des pertes d'exploitation.

3- Optimisation des contrats d'assurance par des actions sur les primes, les franchises,...

##### ❖ Aspect sécurité –sûreté

Eviter les défaillances pouvant entraîner des dégâts matériels et corporels.

#### . Inconvénients :

##### ❖ Aspect financier

Le coût des suivis et des diagnostics, nécessite un investissement en ressources humaines (formation) et en matériels (outillages spécifiques).

##### ❖ Les illusions

- L'illusion d'appliquer une politique de maintenance conditionnelle alors que l'on ne s'en donne pas les moyens ou que la solution retenue est mal adaptée au parc machines.
- L'illusion de croire que la maintenance conditionnelle est une assurance tous risques (injecter de l'eau dans une turbine surveillée ou pas, la machine sera détruite dans tous les cas [22,48]).

## ❖ Analyse

- Les illusions sont supprimées dès que l'on en a pris conscience, par contre il faut maîtriser les coûts. Alors, le montant et les coûts de la mise en place de la maintenance conditionnelle sont coûteux [13].

### I.10. Optimisation de la maintenance conditionnelle

Beaucoup de programmes de maintenance conditionnelle mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances. Ces résultats quelques peu décevants n'ont pas été provoqués par la limitation de la technologie, mais plutôt par deux problèmes importants concernant respectivement, la gestion et le financement notamment [19]:

- Un problème purement organisationnel, logistique et culturel : sa mise en œuvre dans l'entreprise,
- Un problème financier et politique: le financement de l'approfondissement des connaissances sur le comportement vibratoire des machines en phase de vieillissement, le financement du développement des outils de surveillance et de diagnostic et des techniques d'investigation sur lesquelles elles reposent.

Comme minimum vitale, les étapes proactives suivantes peuvent éliminer ces restrictions et en conséquence aider à gagner les avantages maxima du programme de la maintenance prévisionnelle.

Les différentes démarches d'optimisation de la maintenance, ont pour but de sélectionner les tâches de maintenance en se basant sur des études du retour d'expérience [36]. De nouvelles méthodes d'optimisation de la maintenance sont développées suite à l'importance du processus de maintenance et de son impact sur la rentabilité et les coûts d'exploitation des équipements [65]. Le but de l'optimisation d'un programme de maintenance est de déterminer, pour chaque équipement, la bonne intervention à effectuer et identifier la périodicité auquel doit être affectée, afin de répondre aux exigences réglementaires, aux objectifs de la sûreté, ainsi qu'à la fiabilité et à la disponibilité de l'équipement. L'optimisation de la maintenance représente l'équilibre entre les coûts et les avantages apportés par les tâches des entreprises.

Maintenir un programme de maintenance optimal est un objectif difficile à réaliser car les conditions sont en constantes évolutions. Les conditions économiques, les hypothèses de performance, la capacité de production, les technologies et les compétences des différentes

ressources ne sont pas fixes mais elles varient dans le temps. Ainsi une maintenance optimale aujourd'hui peut ne pas l'être demain. L'optimisation d'un programme de maintenance préventive implique une revue continue des décisions prises précédemment en fonction des nouvelles connaissances ou données disponibles.

La maintenance doit être réalisée de façon efficace et efficiente, car même si les coûts de maintenance peuvent être importants, les coûts liés aux défaillances et aux pertes de production sont souvent de plus grande envergure. La disponibilité des équipements croît avec la diminution des délais affectés aux tâches de maintenance.

Ainsi les tâches fréquents de maintenances achevées, reviennent les défaillances latentes qui sont réparables. L'inverse est aussi vrai. Par conséquent, l'utilisation d'une périodicité optimale permet d'éviter que les tâches de maintenance soient effectuées souvent, ainsi d'éviter l'utilisation des ressources inutiles, de réduire les risques dus aux interventions humaines, de réduire les indisponibilités dues à la maintenance, de remplacer les pièces avant qu'elles atteignent leurs durées de vie utile et de s'assurer que les tâches de maintenance sont réalisées assez fréquemment afin de réduire les probabilité de défaillance des composants des équipements en exploitation.

Pour le cas du problème considéré dans cette étude, il existe deux approches pour déterminer la solution optimale de la périodicité à laquelle doit s'effectuer une tâche de maintenance préventive. La première approche basée sur une modélisation quantitative la plus commune pour l'optimisation de la maintenance est la MBF, aussi le nom de « reliability-centered maintenance » (RCM).

Cette approche s'appuie sur des opinions subjectives, le jugement d'expert, l'historique des équipements et sur les recommandations des constructeur. L'utilisation de l'approche à MBF est une méthode structurée qui permet d'identifier les besoins en maintenance d'un équipement. Les modèles utilisés pour la MBF représentent les concepts de défaillance potentielle et fonctionnelle. Le modèle qualitatif est généralement utilisé pour représenter l'état d'un équipement qui varie dans le temps et l'intervalle de défaillance potentielle et fonctionnelle, [17, 21, 24, 36], le modèle qualitatif permet seulement d'affirmer que les activités de maintenance doivent être réalisées à une fréquence inférieure à celle estimée.

Selon (Aghezzaf E.H et all) dans [3] ;( Fleurquin G et all) dans [24] ; (Wang Hongzhou, et all) dans [82], les méthodes d'optimisation sont soit exactes ou heuristiques, et elles peuvent se regrouper comme il est présenté sur le (tableau I.3).

| Méthodes<br>Objectifs                    | AMDEC | Monte Carlo | Echelle de probabilité et de gravité | Algorithme génétique | Algorithme génétique multi-objectifs | Markov | Semi-Markov | Coûts Bénéfice |
|--|-------|-------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------|-------------|----------------|
| Sécurité du personnel                    | *     |             | *                                    |                      | *                                    |        |             | *              |
| Sûreté /Risque                           | *     |             | *                                    | *                    | *                                    | *      |             | *              |
| Environnement                            | *     |             | *                                    |                      |                                      |        |             | *              |
| Fiabilité                                |       |             | *                                    | *                    | *                                    | *      |             |                |
| Disponibilité                            |       | *           | *                                    | *                    | *                                    | *      |             |                |
| Coûts de maintenance                     | *     |             | *                                    | *                    | *                                    | *      | *           | *              |
| Equipement en redondance                 |       | *           |                                      |                      |                                      |        |             |                |
| Réparation imparfaite                    |       | *           |                                      | *                    |                                      |        |             |                |
| Ressources nécessaires                   |       | *           |                                      | *                    |                                      |        |             |                |
| Améliorer la périodicité                 |       |             |                                      | *                    |                                      |        |             |                |
| Déterminer la probabilité de défaillance |       |             |                                      |                      |                                      |        |             |                |
| Conditions opérationnelle                |       |             |                                      | *                    |                                      |        |             |                |

**Tableau I.3 : Méthodes à utilisées en fonction des objectifs recherchés**

### **I.11. Maintenance basée sur la fiabilité (M.B.F)**

Les origines de la MBF viennent de la RCM (Reliability Centerd Maintenance) qui a été introduite en aéronautique vers 1960 aux Etats-Unis pour déterminer les programmes de maintenance [59]. La publication du document MSG (Maintenance Streering Groupe) a fixé les bases de la méthode de développement d'un programme de maintenance recevable à la fois pour les constructeurs d'avions, pour les autorités de l'aviation civile et pour les compagnies. La maintenance basée la fiabilité MBF peut être définie comme une politique de maintenance ayant pour objectifs d'illustrer un programme des interventions préventives afin de contribuer à maintenir et améliorer la fiabilité des fonctions des équipements qui sont importantes pour la sûreté et la disponibilité [42].

Les objectifs de la maintenance basée sur la fiabilité sont la maîtrise des coûts et l'optimisation économique de la maintenance, suivant le principe : « exercer l'effort au bon endroit », la mise en œuvre d'une méthode structurée et rationnelle, analyse de chaque mode de défaillance fonctionnelle et l'utilisation du retour d'expériences pour réajuster les programmes de maintenance et leur pertinence. L'objectif de la MBF est de proposer une méthode structurée permettant d'établir un plan de maintenance sélectif à partir de la criticité des équipements, puis de leurs défaillances identifiées et cela à partir d'une démarche participative.

L'objectif principal de la maintenance basé sur la fiabilité est l'amélioration de la disponibilité des équipements sélectionnés comme critique ; améliorer la disponibilité implique la réduction des défaillances techniques par la mise en place d'un plan préventif « allant à l'essentiel », mais aussi la réduction des durées de pertes de production par une nouvelle répartition des tâches entre production et maintenance. D'autres objectifs sont recherchés comme la maîtrise des coûts par l'optimisation du plan de maintenance préventive, en faisant porter l'effort de prévention « au bon endroit au bon moment », donc par élimination de tâches préventives constatées improductives ; la mise en œuvre d'une démarche structurée, par analyse systématique de chaque mode de défaillance qui permet de justifier les décisions prises et la mise en œuvre d'une démarche participative au niveau des groupes de travail MBF ou au niveau des tâches réparties entre production et maintenance.

La méthode s'appuie sur une démarche de type AMDEC et des matrices de criticité pour hiérarchiser les équipements, puis les causes de défaillances. L'utilisation ultérieure d'arbre de décisions permet de déterminer les actions à entreprendre dans le cadre d'un plan de maintenance préventive, ce qui permet par la suite à une étude type OMF.

## I.12. Etudes basée sur l'optimisation de la maintenance par la fiabilité OMF

L'application des études d'optimisation de maintenance basée sur la fiabilité (OMF) passe par plusieurs étapes [36] :

- L'analyse fonctionnelle (représentations du fonctionnement des systèmes étudiés)
- L'analyse de dysfonctionnement des systèmes (identification des modes de défaillance des équipements)
- L'analyse du retour d'expérience (rassembler les données essentielles pour établir les choix de maintenance)
- L'analyse des dysfonctionnements des équipements (fournir les informations nécessaires à l'évaluation de la criticité des modes de défaillances)
- La sélection des tâches de maintenance (proposition des tâches élémentaires justifiées pour couvrir les modes de défaillance significatifs et écrire le programme de maintenance préventive)

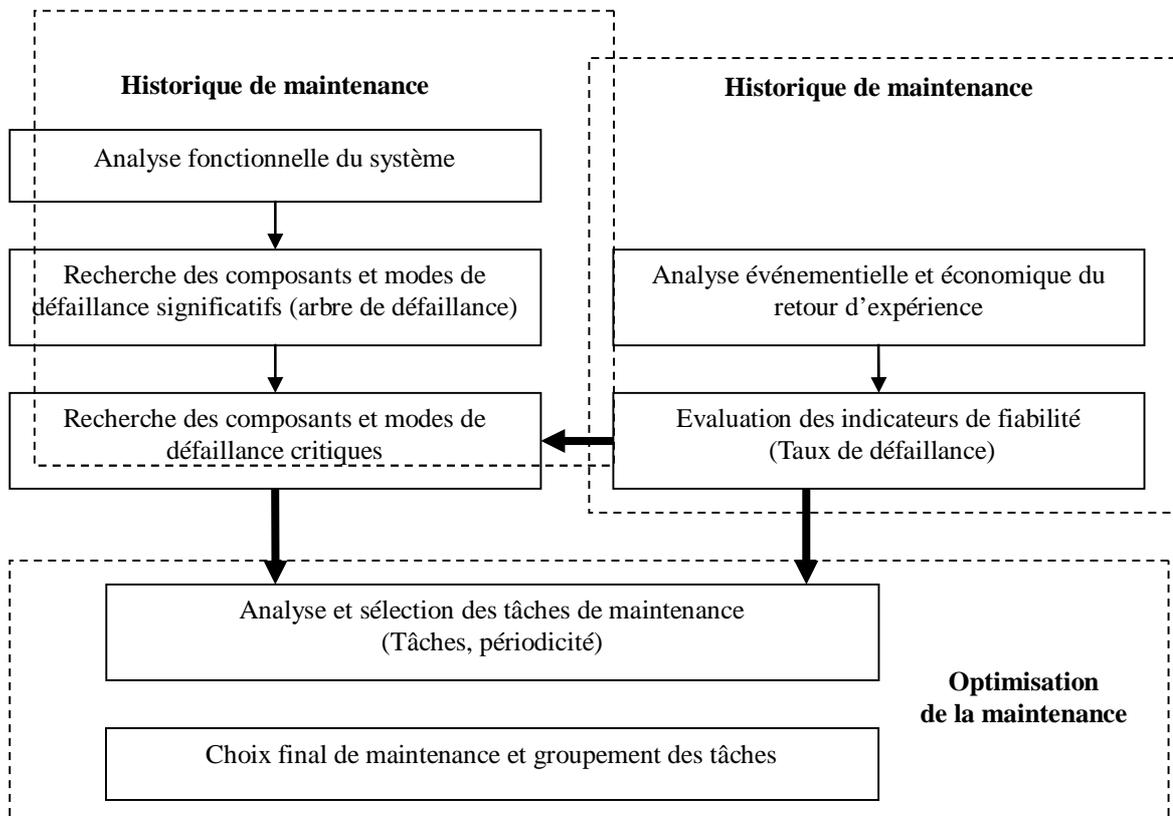


Figure I.15 : Méthode d'optimisation basée sur la fiabilité

A partir du retour d'expérience (REX), on détermine ce qui est passé aux équipements ou composants en termes de fiabilité, disponibilité et coûts, et les actes de maintenance ou modification réalisées.

Durant la phase d'évaluation des risques on envisage les événements graves qui pourraient se passer, et on met en œuvre les techniques d'analyse de fonctionnement et de dysfonctionnement pour prévenir les défaillances jugées grave et qui ont de forte chance de se produire, afin d'envisager des tâches de maintenance préventive. Durant la phase d'optimisation de la maintenance on détermine les tâches à effectuer ainsi que leurs fréquences de réalisation.

### **I.12.1. Evaluation des stratégies de maintenance de type OMF**

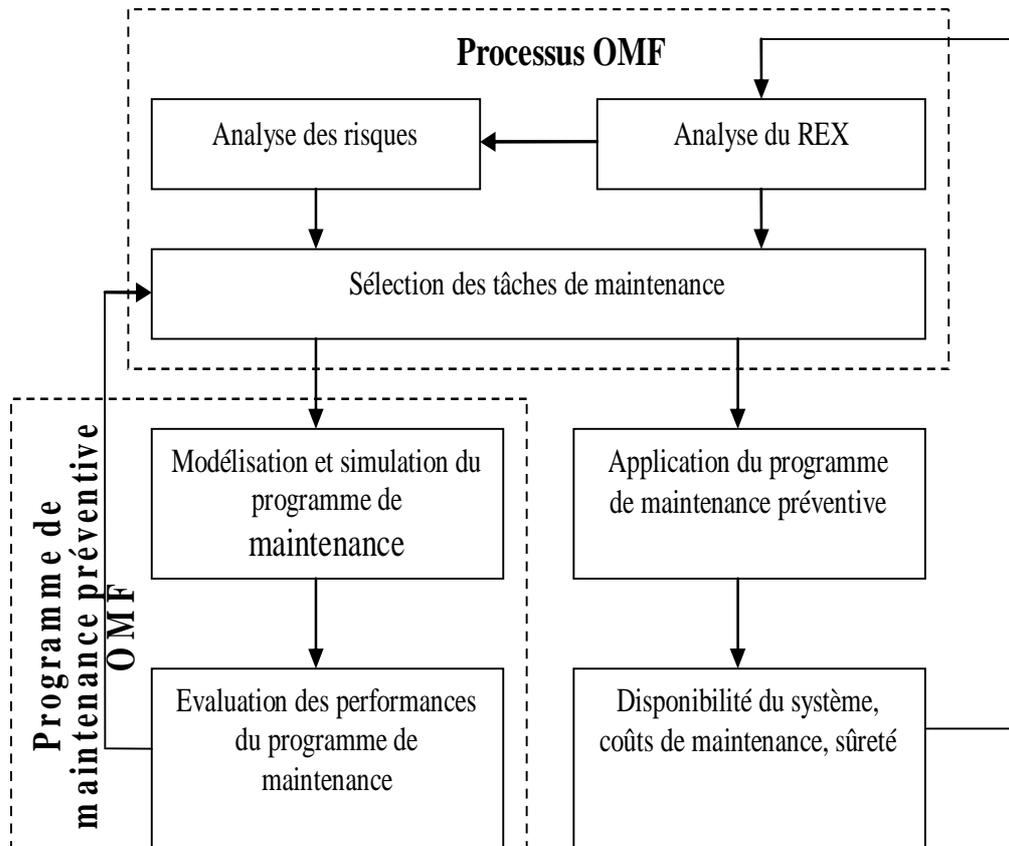
Une stratégie de maintenance peut être définie comme une règle de décisions qui établit la séquence des actions de maintenance à entreprendre en fonction du niveau de dégradation de l'équipement et des seuils acceptables d'exploitation. Chaque action de maintenance permet de spécifier l'utilisation des ressources appropriées [50].

Un coût est encouru pour effectuer chaque action de maintenance. Les performances d'un programme de maintenance défini par le processus OMF peuvent être obtenues après plusieurs années d'application, et entraîner éventuellement des modifications pour la mise en œuvre d'un programme.

Pour éviter d'attendre à nouveau plusieurs années d'application avant d'obtenir ces informations, il semble nécessaire de pouvoir prédire l'évolution de la fiabilité des équipements et ainsi les conséquences de la mise en place du nouveau programme, comme il est montré sur la (figure I.16).

La modélisation du programme de maintenance, traduit l'objectif visé et les contraintes techniques et économiques en fonction des variations de décisions et des paramètres qui caractérisent la stratégie de maintenance considérée, et permet, entre autres, d'établir les conditions d'existence et d'unicité d'une stratégie optimale et d'effectuer des analyses de sensibilité.

La prise en compte, dans le modèle, de tous les facteurs ayant un impact significatif sur la tenue de l'équipement et sur sa performance peut conduire à des modèles analytiques complexes et parfois difficiles à résoudre.

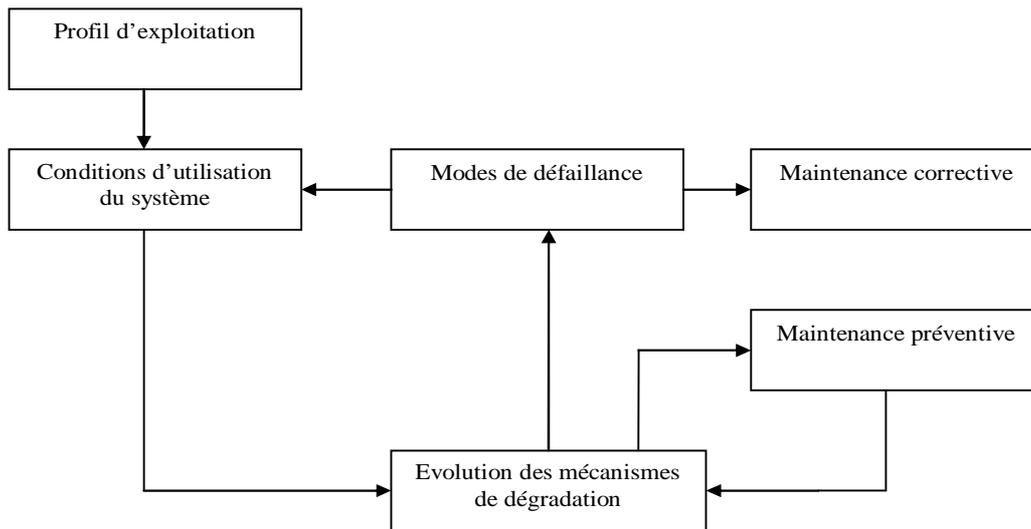


**Figure I.16 : Evaluation des performances de maintenance de type OMF**

### I.12.2. Exploitation et comportement des équipements

Il est nécessaire de décrire la globalité du comportement des équipements, comme le montre la (figure I.17) ; de manière à faire apparaître l'impact des conditions d'utilisation sur l'évolution des dégradations et ainsi l'occurrence des modes de défaillance en prenant en compte les tâches de maintenance réalisées.

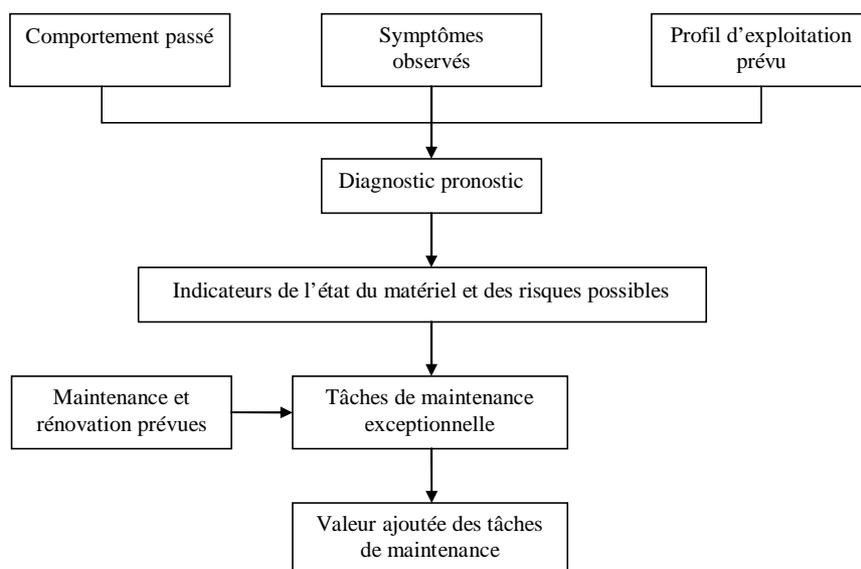
En connaissant les effets des conditions d'exploitation sur les performances du système, on peut quantifier l'impact d'une modification envisagée et décider alors d'optimiser le profil d'utilisation ou d'adapter le programme de maintenance aux nouvelles conditions de fonctionnement [29].



**Figure I.17 : Relations entre le profil d'exploitation et le comportement des matériels d'un système maintenu**

### I.12.3. Evaluation de la maintenance et états des équipements

La connaissance de l'état d'équipement est utile pour la prévision de son comportement futur en fonction des conditions d'exploitation et au calcul du rapport coût/profit ainsi qu'à la hiérarchisation des priorités de l'action. Le classement peut être défini en se basant sur l'état du matériel à un instant donné. Pour cela, on prend en compte le comportement du matériel en connaissant les phénomènes de dégradation et de défaillance ainsi que les tâches de maintenances réalisées. On simule ensuite son comportement futur afin de caractériser cet état, comme il est montré sur la (figure I.18).



**Figure I.18 : Evaluation de la maintenance et état des équipements**

### **I.13. Conclusion**

Selon l'étude bibliographique faite, il existe actuellement de nombreux modèles qui illustrent les différentes hypothèses posées sur l'équipement, son mode de défaillance, de dégradation, les exigences et les objectifs de la maintenance. Pour un équipement, dont l'évolution est décrite par un processus aléatoire, la construction de la politique de maintenance se ramène à la caractérisation d'une structure paramétrique de maintenance. Dans le cas où la seule information disponible sur l'équipement est sa durée de vie, une politique de maintenance basée sur la durée de fonctionnement maximale est très bien adaptée. Si on arrive à modéliser le niveau de dégradation, une structure de maintenance conditionnelle de type limite de contrôle permet l'optimisation du critère de performance choisi. Le plus souvent rencontré dans la littérature est le coût moyen de maintenance à long terme par unité de temps.

Compte tenu des enjeux et du contexte industriel, des recherches bibliographiques ont été effectuées dans le but d'identifier les méthodes appliquées à la modélisation des stratégies de maintenance, les techniques et outils associés, et les problématiques traitées. Il en résulte que de nombreux travaux visent à développer des modèles d'évaluation des performances de maintenance, en termes de coûts et souvent de disponibilité. Cependant, l'application des modèles développés n'est pas toujours immédiatement adaptée. Certains modèles semblent en effet peu propices à une utilisation concrète, le plus souvent par manque de données nécessaires à leur mise en œuvre. Il s'avère également que certaines modifications n'amènent qu'un faible apport utile réel aux professionnels de la maintenance, qu'ils soient responsables de maintenance ou responsable d'exploitation.

# CHAPITRE II

## ETAT DE L'ART DE LA MAINTENANCE

### BASEE SUR LA FIABILITE

---

Dans ce chapitre, on illustre une présentation de la démarche connue par Maintenance Basée sur la Fiabilité MBF ; qui peut nous mener à l'optimisation des actions de maintenance préventives basée principalement sur l'évolution des anomalies lors de l'exploitation, ou encore sur les modèles de survies des entités critiques qui nécessitent un plan optimal de maintenance. La finalité de la démarche est de cibler les actions de maintenance à mettre en place pour une rentabilité optimale.

## II.1. Introduction

La concrétisation de l'application de la MBF pour les machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures nécessite l'identification des éléments critiques, ainsi que leurs modes de défaillances et par la suite la détermination d'un optimum du plan d'action de maintenance. La MBF est une approche qui utilise les différents outils issus des méthodes déjà bien connues telles que la matrice de criticité, les grilles d'analyse de modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticité (AMDEC) et le logigramme de décision. On représente par la suite la méthodologie de la MBF.

## II.2. Méthodologie de la MBF

Les différentes étapes de la méthodologie envisagée sont présentées à la (figure II.1) [59]

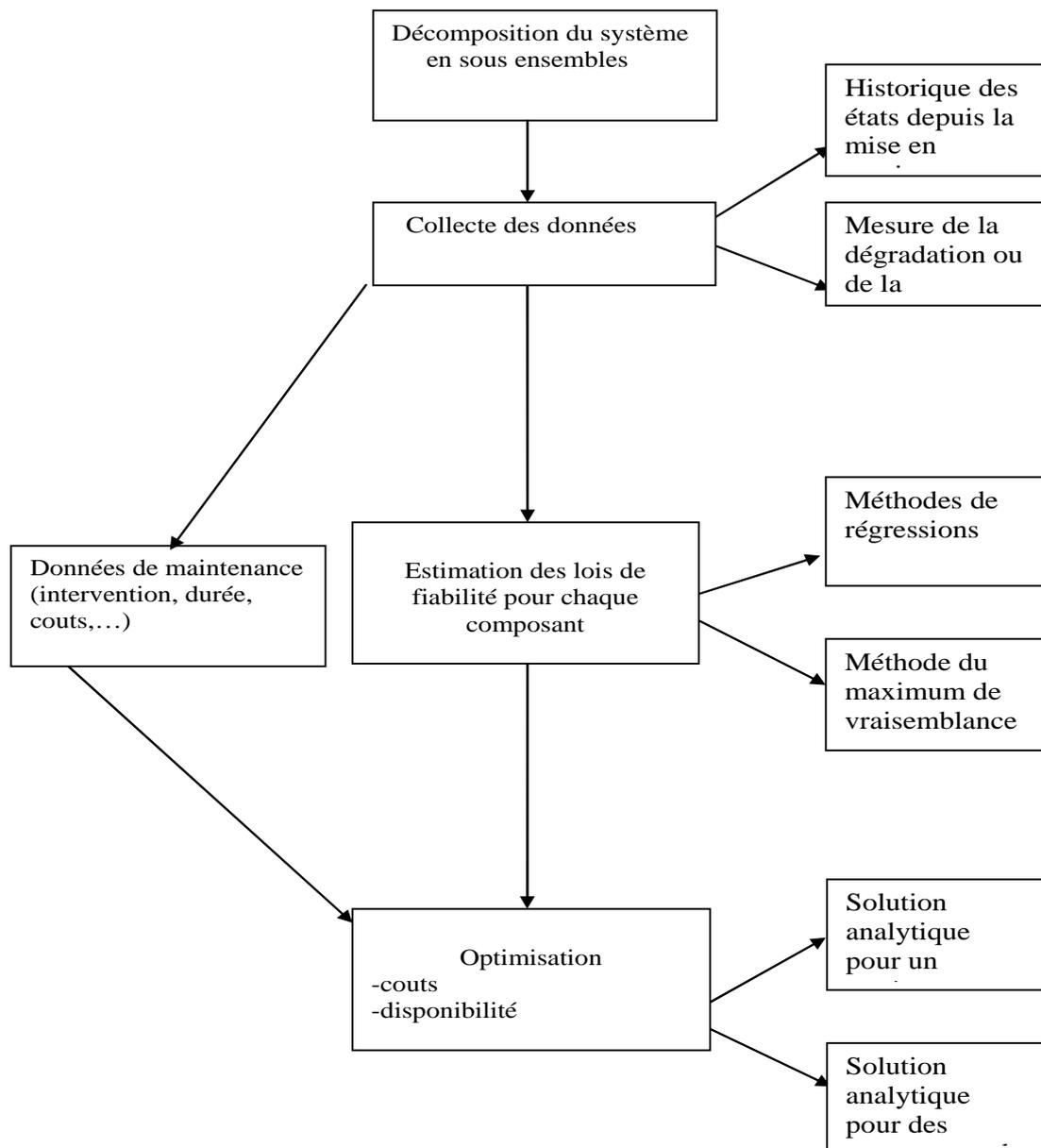


Figure II.1. Schéma synoptique de la méthodologie

### **II.2.1. Représentation du système à étudier en schémas blocs**

De manière générale, un système est modélisé comme un ensemble d'éléments dont l'état de bon fonctionnement conditionne celui du système. Pour ce faire, on a recours à une analyse des modes de défaillance qui va conduire à un modèle topologique du système où chaque élément est représenté par un bloc [19]. Ceux-ci sont associés en série lorsque la défaillance d'un seul élément provoque la défaillance de l'ensemble. Par contre, pour qu'une association en parallèle soit défaillante, il faut que tous ses éléments le soient également. D'autres types de configurations sont envisageables, notamment pour modéliser une redondance ou un élément de secours.

### **II.2.2. Collecte des données**

L'étape suivante consiste à collecter des données pour chaque machine du système. Ces données peuvent soit provenir d'un historique d'événements ou de mesures de dégradation [13].

Dans le premier cas, les états de la machine sont enregistrés depuis sa première mise en service (mise en marche, première panne, maintenance, remise en marche, arrêt pour inspection, remise en marche, deuxième panne,...). Il peut parfois arriver que l'historique soit incomplet (données manquantes entre deux événements), les méthodes mises en œuvre doivent donc être capables de prendre en compte les données censurées [17].

Dans le deuxième cas, les données de dégradation mesurées peuvent soit provenir d'inspections ponctuelles réalisées manuellement ou être enregistrées en continu à l'aide d'un dispositif de monitoring (VA. Koupnov) dans [77]. On distingue également les cas où la dégradation est directement mesurable ainsi que des cas où elle est mesurée d'une façon indirecte par l'intermédiaire de variables explicites de la dégradation (Co-variables).

### **II.2.3. Estimation de la loi de fiabilité de chaque composant**

La caractérisation de la fiabilité d'un équipement peut être obtenue selon trois approches qui se distinguent par le type de données qu'on dispose (figure II.2). Ces données d'après (Fleurquin et al) dans [24] peuvent correspondre à des temps de défaillance issus d'un historique de panne (modèles statistiques sur base d'un historique d'événements), à des mesures de la dégradation physique prélevées au cours du temps dont on connaît la loi de dégradation (modèles physiques de défaillance), ou bien à l'évolution de variables explicites de la dégradation (suivi d'un indicateur de dégradation) [12].

Les méthodes d'estimation des lois de fiabilité à partir de ces données sont soit des méthodes de régression soit des méthodes de maximum de vraisemblance. Dans le premier cas, le principe consiste à linéariser la loi de fiabilité paramétrique que l'on souhaite ajuster et d'identifier les paramètres par une régression linéaire.

Dans le second cas, l'idée est d'estimer les paramètres de la loi de fiabilité qui maximisent la vraisemblance et de retrouver les temps de défaillances observées [69]. Ces deux méthodes seront expliquées et illustrées ultérieurement.

L'approche basée sur la fiabilité permet également de calculer la durée de vie résiduelle moyenne de l'équipement, c'est-à-dire l'espérance mathématique du temps de bon fonctionnement. Cette information est une donnée principale pour mettre en œuvre une politique de maintenance appropriée [19].

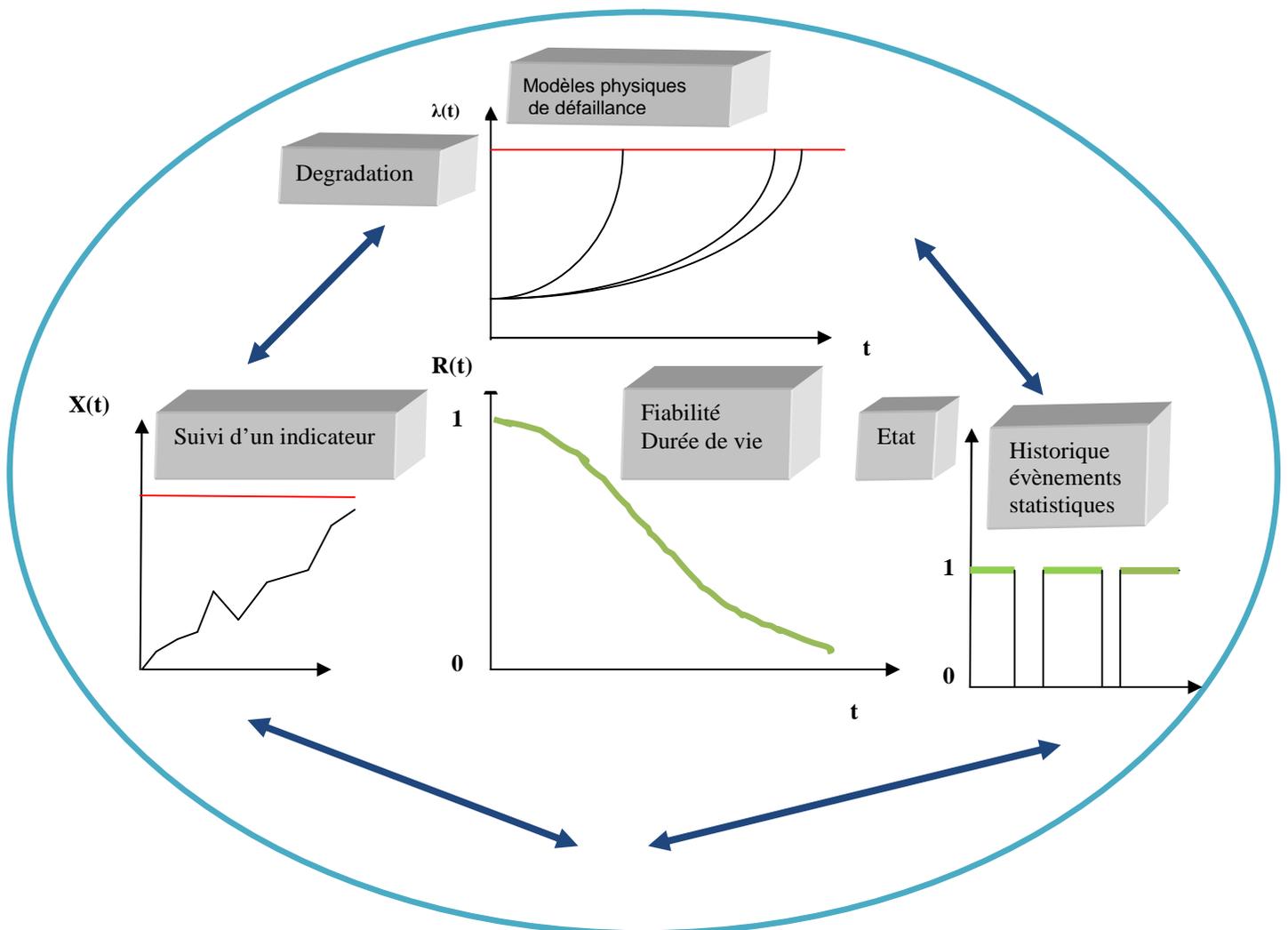


Figure II. 2. Les trois approches pour l'estimation de la fiabilité et de la durée de vie.

#### II.2.4. Optimisation de la maintenance

Lorsque la fiabilité de chaque composant a été identifiée, la dernière étape consiste à déterminer la périodicité de la maintenance préventive optimale [24]. Pour cela, les données de maintenance sont nécessaires. Parmi ces données on recense :

- la possibilité de faire du correctif ou uniquement du préventif ;
- les coûts fixes du préventif et du correctif ;
- les coûts variables du préventif et du correctif, c'est-à-dire les coûts indirectes liées aux pertes production ;
- la durée des interventions de la maintenance préventive et corrective ;
- la fréquence d'inspection de chaque composant ;
- le degré de réparation après une intervention de maintenance.

#### II.3. Estimation des lois de fiabilité des composants

Lors de l'exploitation des équipements, la décision de mettre en application telle ou telle politique de maintenance est prise souvent sur la base des résultats de mesures des paramètres caractérisant leurs fonctionnements [78]. L'utilisation de telles informations a posteriori sur l'état de l'équipement permet d'augmenter sensiblement l'efficacité de son exploitation et en particulier, l'augmentation de la fiabilité avec la minimisation des coûts de maintenance ; ce qui nous permet de présenter les différents aspects et définitions liées à l'optimisation de la fiabilité des systèmes par des approches déterministes.

##### II. 3.1. Illustration mathématique de la fiabilité

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée [2]. Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu. D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'heures, ou d'unités d'usage durant lesquelles il a effectivement fonctionné [3].

La durée de vie  $T$  d'un système est une variable aléatoire non négative, à partir de laquelle la loi de dégradation du système peut être déterminée. L'équation (II.1) exprime la probabilité que la durée de vie  $T$  du système soit comprise entre  $t$  et  $t + dt$  , ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre  $t$  et  $t + dt$  .

$$f(t).dt = \Pr(t < \text{durée de vie } T \leq t + dt) \quad (II.1)$$

Avec  $f(t)$  la fonction de densité de probabilité associée aux durées de vie, et la fonction de répartition des durées de vie  $F(t)$  ainsi que la fonction de la fiabilité  $R(t)$  ; elles sont reliées par l'équation (II.2).

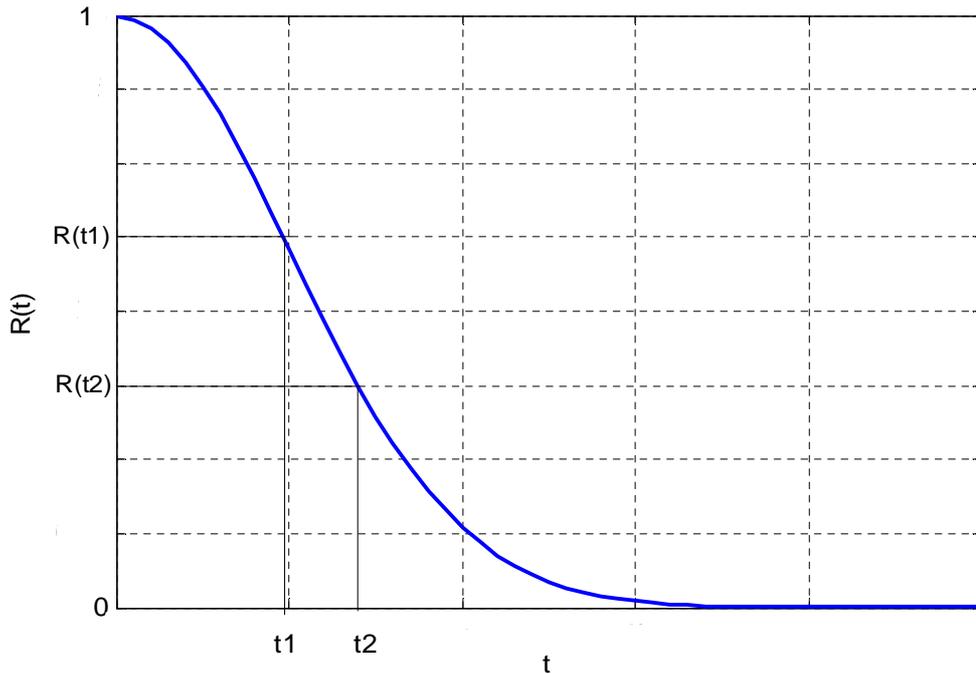
$$F(t) = \Pr(\text{durée de vie } T \leq t) \text{ et } R(t) = \Pr(\text{durée de vie } T > t) \quad (II.2)$$

Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  ou  $r(t)$  est la quatrième fonction permettant de caractériser la loi de dégradation d'un système. Il s'agit de la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à  $t$ . Cependant, la loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une seule de ces quatre caractéristiques. Le (Tableau II.1) présente ces relations.

|        | $f(t)$                              | $F(t)$                              | $R(t)$                                   | $r(t)$                      |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| $f(t)$ | •                                   | $\frac{dF(t)}{dt}$                  | $-\frac{dR(t)}{dt}$                      | $r(t).e^{-\int_0^t r(x)dx}$ |
| $F(t)$ | $\int_0^t f(x)dx$                   | •                                   | $1 - R(t)$                               | $1 - e^{-\int_0^t r(x)dx}$  |
| $R(t)$ | $\int_t^\infty f(x)dx$              | $1 - F(t)$                          | •  | $e^{-\int_0^t r(x)dx}$      |
| $r(t)$ | $\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x)dx}$ | $\frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)}$ | $-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$ | •                           |

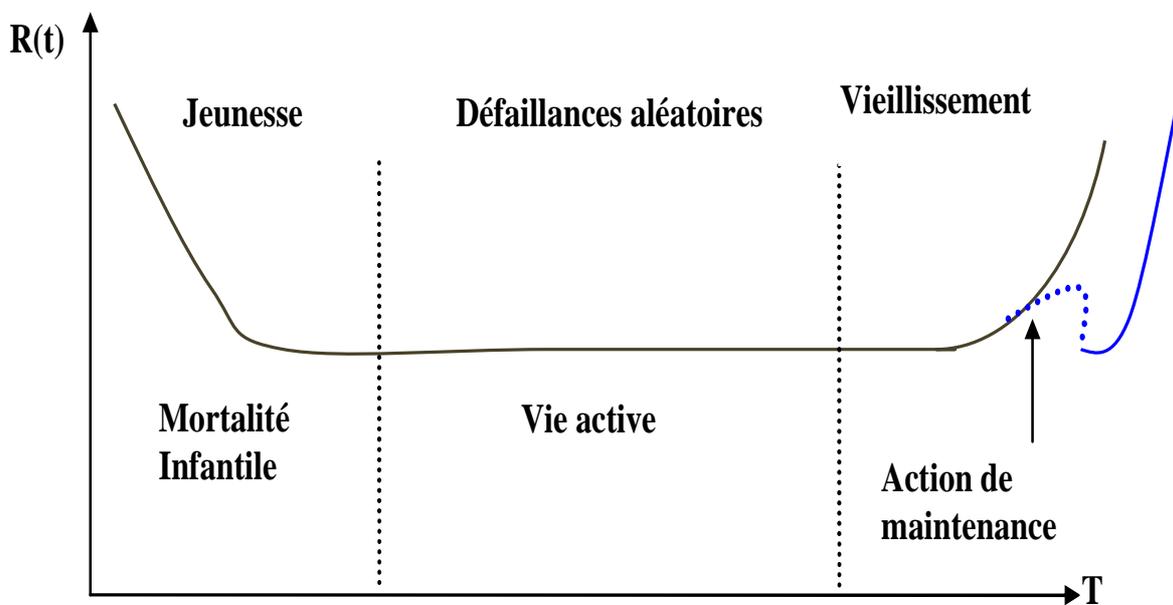
**Tableau II.1 : Relations entre les composants de la fiabilité**

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (Figure II.1), de telle manière que  $R(t_1) > R(t_2)$  si  $t_1 < t_2$ .



**Figure II.3 : Fiabilité décroissante avec le temps**

Le comportement temporel du taux de défaillance est représenté par la courbe en baignoire de la (figure II.2). Cette courbe comporte trois phases pour lesquelles on détaille les causes potentielles et les actions à entreprendre pour améliorer le comportement du système.

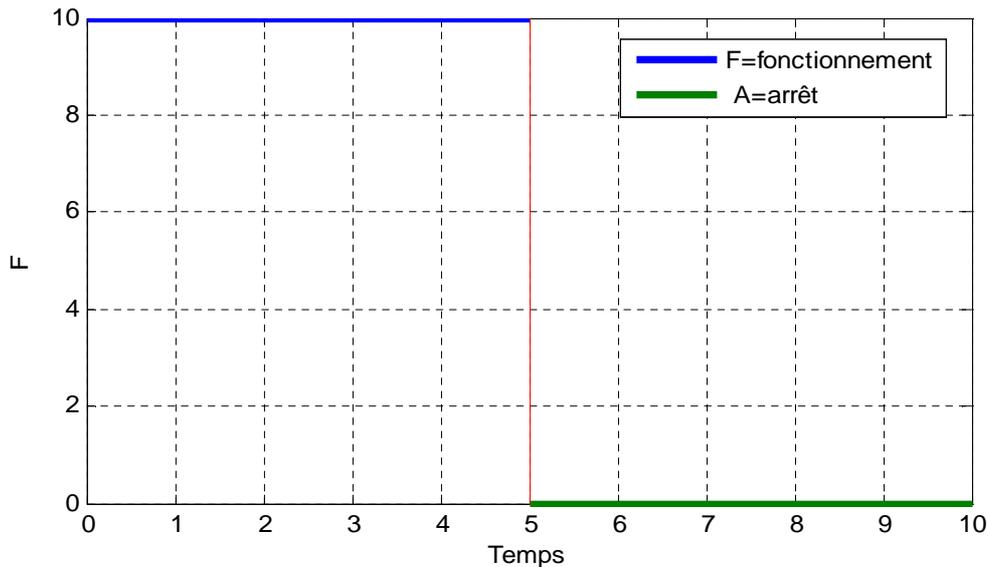


|                          |                                 |                                    |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b><u>Causes</u></b>     | <b><u>Causes</u></b>            | <b><u>Causes</u></b>               |
| . Défauts de fabrication | . Environnement                 | . Fatigue                          |
| . Contrôle de la qualité | . Charges aléatoires            | . Corrosion                        |
| . Conception             | . Erreur humaine                | . Âge                              |
| . Assemblage             | . Catastrophes naturelles       | . Frottement                       |
| . Contamination          |                                 | . Charges cycliques                |
| <b><u>Remèdes</u></b>    | <b><u>Remèdes</u></b>           | <b><u>Remèdes</u></b>              |
| . Tests de validation    | . Redondance                    | . Réduction du taux de défaillance |
| . Vérification           | . Amélioration de la résistance | . Maintenance préventive           |
| . Contrôle de la qualité |                                 | . Remplacement préventif           |
|                          |                                 | . Technologie                      |

**Figure II.4 : Évolution du taux de défaillance (courbe en baignoire)**

### II.3.2. Fiabilité des ensembles non réparables

Un matériel non réparable est un matériel que l'on ne peut pas remettre en état. Il doit donc fonctionner une seule fois pour une mission particulière. Les sous-ensembles de secours sont en nombre limité et il y a défaillance dès que le nombre de sous-ensembles en état est insuffisant d'après l'organisation du système pour un tel ensemble, on s'intéresse donc aux chances de succès de la mission, c'est-à-dire à la probabilité que le matériel fonctionne sans défaillance jusqu'à un temps donné, autrement dit à la fiabilité du matériel [21]. On devra donc calculer la fonction fiabilité à la fin de la mission et aux instants jugés intéressants, ainsi que les valeurs correspondantes du taux de défaillance. L'usage de la moyenne des temps jusqu'à défaillance (ou entre défaillances) est ici à exclure totalement [12]. En effet cette moyenne étant calculée jusqu'à des temps infiniment grands n'a aucune signification pour la redondance sans réparation qui n'a d'intérêt que pour les missions de courte durée (figure II.5)



**Figure II.5 : Fiabilité des ensembles non réparables**

### II. 3.2.1. Schémas blocs

Les composants d'un système peuvent former différentes configurations. L'objectif des schémas blocs est de prévoir comment ils collaborent entre eux pour assurer le bon fonctionnement du système. Soit  $C_i$  les composants du système et  $R_i(t)$  est leur fiabilité.

La (figure II.6) présente la configuration la plus simple, celle d'un système série de  $M$  composants, tandis que la relation (II.3) donne la fiabilité du système, en considérant les composants indépendants. Cette hypothèse est courante pour simplifier les calculs à partir de ce diagramme. Si l'information est disponible, il est possible de tenir compte de la dépendance structurelle, mais on préfère souvent faire l'hypothèse de l'indépendance pour éventuellement corriger les résultats par un coefficient de sécurité.

$$R(t) = \prod_{i=1}^M R_i(t) \quad (II.3)$$



**Figure II.6 : Structure en série**

La représentation par schémas blocs (ou *RBD* pour *Reliability Block Diagram*) est couramment utilisée pour traduire le fonctionnement du système connaissant l'état des composants.

Plusieurs méthodes permettent d'exprimer la fonction de fiabilité à partir de la structure du schéma blocs : les méthodes des chemins, des coupes, le théorème de décomposition de Shannon etc,... [3].

### II.3.2.2. Arbres de défaillances

Au même titre que le comportement d'un système dépend de ses composants, le comportement du composant ou du sous-système dépend de ses différents modes de défaillance. Une défaillance traduit la cessation d'une entité à accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. Une entité est déclarée défaillante lorsque ses caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception ou si elle ne satisfait pas à une ou à plusieurs attentes du client. Le mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée (le symptôme). À chaque défaillance potentielle on associe un mode et des causes de défaillance.

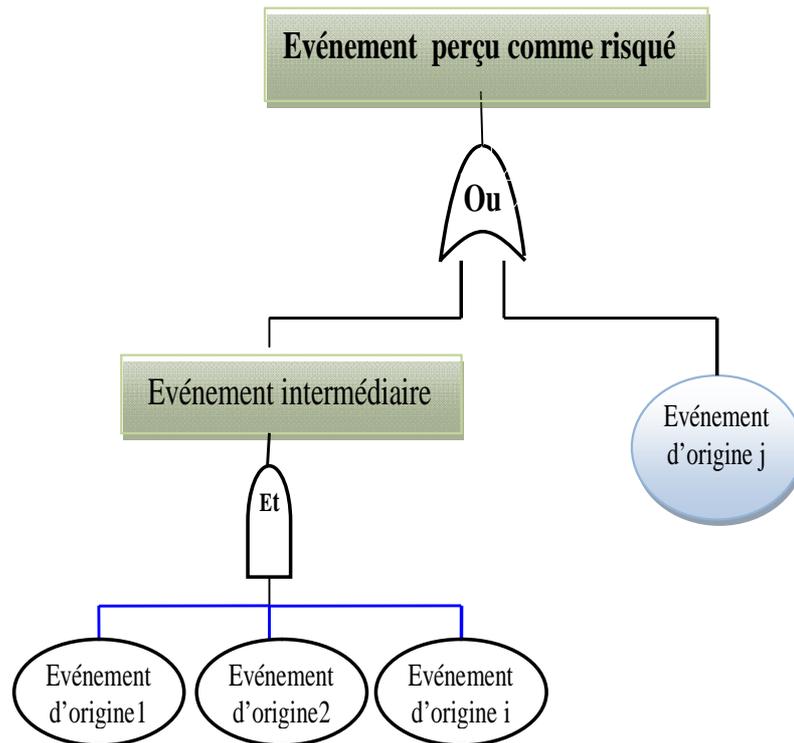
L'arbre de défaillance est un outil de recensement de toutes les causes et défauts entraînant l'apparition d'un événement indésirable. Il a pour objectif d'analyser et réduire les risques. Pour chaque défaillance potentielle, l'arbre de défaillance est construit comme suit :

- rechercher les causes immédiates provoquant directement l'événement indésirable,
- classer les événements intermédiaires en trois classes (événements de base, défauts de conception et défauts de système),
- analyser les défauts des composants : chercher la défaillance première puis la défaillance seconde,
- réitérer la méthode précédente jusqu'à obtention des événements d'origine.

Pour analyser le risque lié à cette défaillance, l'arbre de défaillance associe l'événement perçu comme risqué à une chaîne de causes (événements d'origine) pour lesquelles il existe une probabilité d'occurrence [4].

Lewis dans [48] donne de plus amples informations sur la construction et l'évaluation qualitative et quantitative des arbres de défaillances. Cependant, le calcul du risque qu'un événement indésirable se produise est basé sur les liens de causalité, qui peuvent être :

- Inclusifs ( $A$  ET  $B$ ) :  $\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \cdot \Pr(B)$  avec  $A$  et  $B$  indépendants
- Exclusifs ( $A$  OU  $B$ ) :  $\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A \cap B)$



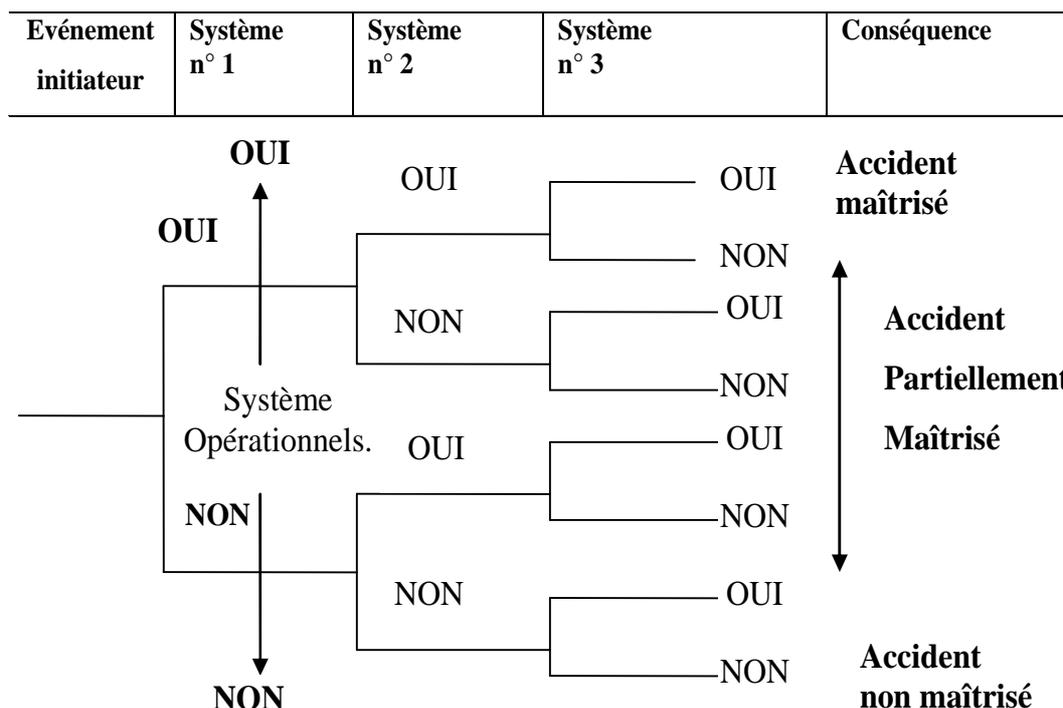
**Figure II.7 : Structure d'un arbre de défaillance**

Cette technique est dépendante des probabilités d'occurrence des événements, ce qui, cette fois encore, pose la question de la disponibilité des données historiques. Certaines approches compensent le manque de données par les jugements d'experts, qui vont concentrer l'étude sur les modes de défaillance les plus importants.

### II.3.2.3. Arbres d'évènements

L'arbre d'évènements est une technique d'analyse inductive qui est basée sur une logique binaire. Cette technique permet de décrire, de façon graphique, comment un événement initial se propage à travers un système, en évaluant systématiquement tous les chemins fortuits et de succès qui peuvent résulter.

L'analyse débute avec un événement initial et elle continue avec l'étude de ses conséquences possibles qui sont déterminées par l'action de succès ou de défaillance des dispositifs prévus pour empêcher la propagation. L'événement initial est une défaillance qui affecte une ou plusieurs des fonctions essentielles de l'installation et qui requiert l'intervention des systèmes de sécurité ou barrières pour la contrôler. L'événement initial peut être interne, par exemple la défaillance d'un composant du système ; ou externe, comme l'action humaine. Ces dernières peuvent être naturelles ou anthropogéniques, comme la chute d'un avion sur une installation [12]



**Figure II.8 : Exemple d'arbre d'événements**

#### II.3.2.4. Diagramme de fiabilité

C'est la plus ancienne méthode utilisée pour le calcul de la fiabilité des systèmes non réparables. Bien qu'elle puisse aussi s'appliquer aux systèmes réparables, son usage y reste limité. Le diagramme de fiabilité est une représentation graphique du système. C'est une modélisation naturelle car proche du schéma fonctionnel de celui-ci. Pour comprendre la terminologie et la représentation, on peut voir le système comme un circuit électrique ou hydraulique.

Un diagramme de fiabilité est un graphe orienté sans boucle, comprenant une entrée et une sortie. Dans les cas les plus simples les nœuds du graphe (repérés par des rectangles appelés blocs) représentent des composants et un nœud est "passant " si le composant correspondant est en marche. Le système fonctionne si est seulement s'il existe un chemin dans le graphe entre l'entrée et la sortie.

Dans les cas les plus complexes certains nœuds (représentés par des cercles) peuvent avoir des étiquettes (systèmes k sur n, redondance passive) et le diagramme peut comporter en plus des signes ayant une signification particulière (redondance passive). La perte d'un composant dans un circuit électrique en série empêche le passage du courant. Par analogie, la défaillance d'un composant interrompt le chemin du succès [13].

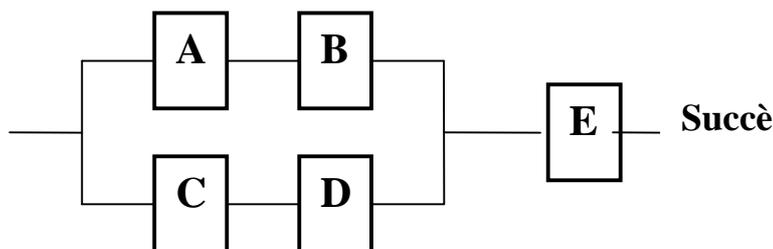


Figure II.9 : Exemple du diagramme de fiabilité

### II.3.2.5. Fonction de structure d'un système

L'étude d'un système par la fonction de structure permet de décrire de manière analytique comment l'état d'un système dépend de l'état de ses éléments. Les hypothèses sont les suivantes :

- ❖ Le système est à état binaire : il fonctionne ou ne fonctionne pas (en panne),
- ❖ Les composants du système : ils sont aussi à état binaire et l'état du système ne dépend que de l'état des composants.

(Kaufmann, Gronchko et Cruon) dans [44], ont défini une fonction à valeurs dans le sous ensemble des entiers  $\{0,1\}$  muni des opérations d'addition, soustraction et multiplication sur les entiers et ils ont montré qu'elle peut se mettre sous une forme réduite à partir de laquelle on obtient la fiabilité du système.

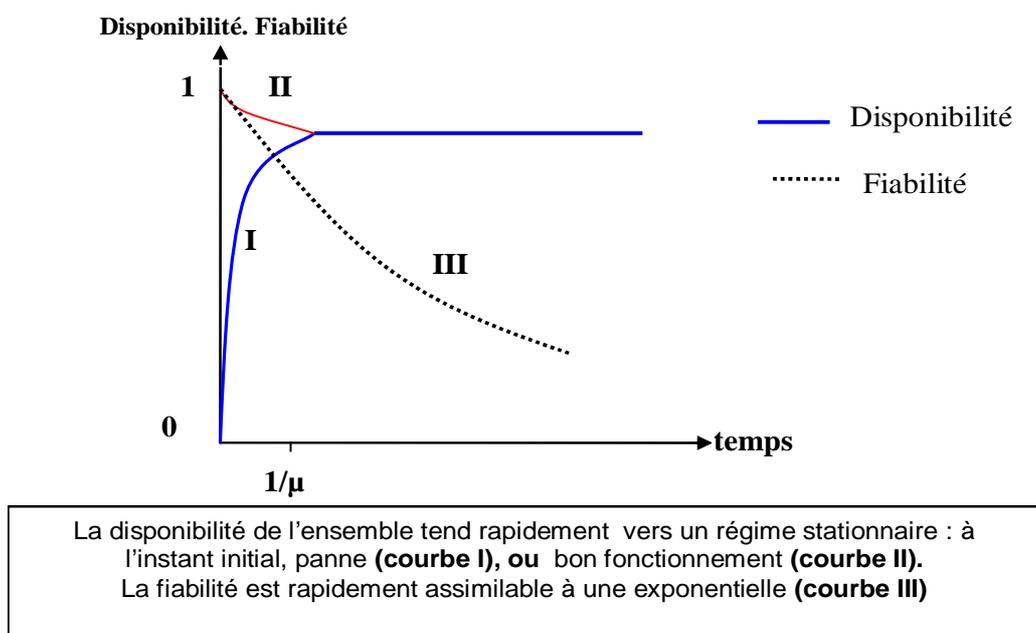
On peut conclure que les méthodes combinatoires ne permettent que d'identifier et d'évaluer les combinaisons d'événements qui conduisent à l'occurrence d'un événement redouté susceptible d'apparaître dans le système étudié. Ces combinaisons ou coupes, à la différence des séquences accidentelles, ne prennent pas en compte l'ordre d'apparition des événements qui la constituent. En fait, ces méthodes combinatoires ne s'intéressent pas aux instants d'occurrence des événements mais simplement au fait qu'elles ont eu lieu. Pour pallier ces carences, comme nous le verrons, différentes approches ont été proposées dans la littérature et ont donné, lors de différentes applications, des résultats intéressants [20, 21, 22, 83].

### II.3.3. Fiabilité des ensembles réparables

Un matériel réparé est destiné à être réutilisé après remise en état. On peut penser que c'est le cas le plus général (les exceptions sont connues : fusées, satellites, etc.). Deux caractéristiques sont utiles ici :

- L'indisponibilité (de préférence à la disponibilité, lorsque celle-ci est proche de 1) est la caractéristique la plus utilisée pour les systèmes réparés. C'est la probabilité pour qu'à l'instant considéré l'ensemble soit défaillant malgré la redondance éventuelle et les mises en état et sa valeur se stabilisent rapidement. C'est aussi la fraction du temps pendant laquelle le matériel n'est pas utilisable (entre sa défaillance et sa remise en état).
- La fiabilité ou de préférence le taux de défaillance élémentaire est une caractéristique moins utilisée mais cependant indispensable. En effet, le taux de défaillance rend compte de la fréquence des défaillances, et cette fréquence devient vite constante [11].

La fiabilité seule ne suffit pas à définir l'efficacité d'un système, il faut en mesurer la disponibilité lorsque le système est multi composants.



**Figure II.10 Fiabilité et disponibilité des systèmes réparables**

### II.3.4. Disponibilité des systèmes

La disponibilité instantanée,  $A(t)$  est la probabilité que le système soit en opération au temps  $t$  si, à chaque panne, une action de maintenance est entreprise pour remettre le système en état de fonctionnement. De façon stationnaire, la proportion du temps de bon fonctionnement sur un horizon infini ( $UTR$  pour Up Time Ratio) ou  $A(t)$ .

L'équation (II.4) montre que la disponibilité fait intervenir la fiabilité (via les temps moyens de bon fonctionnement –  $MUT$  pour *Mean Up time*) et la maintenabilité (via les durées moyennes de réparation –  $MTTR$  pour *Mean Time To Repair*) [2].

$$UTR = \frac{MUT}{MUT + MTTR} = \frac{MUT}{MTBF} = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (II.4)$$

La (figure 1.9) représente les changements d'états d'un système réparable : (1) en fonction et (0) en panne. Les équations (II.5) et (II.6) montrent que le  $MUT$  pour (*Mean Up time*) ou Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement, équivalent est  $MTBF$ .

$$MUT = E(X_i) \quad \text{et} \quad MTTR = E(Y_i) \quad (II.5)$$

$$MTBF = MUT + MTTR \quad (II.6)$$

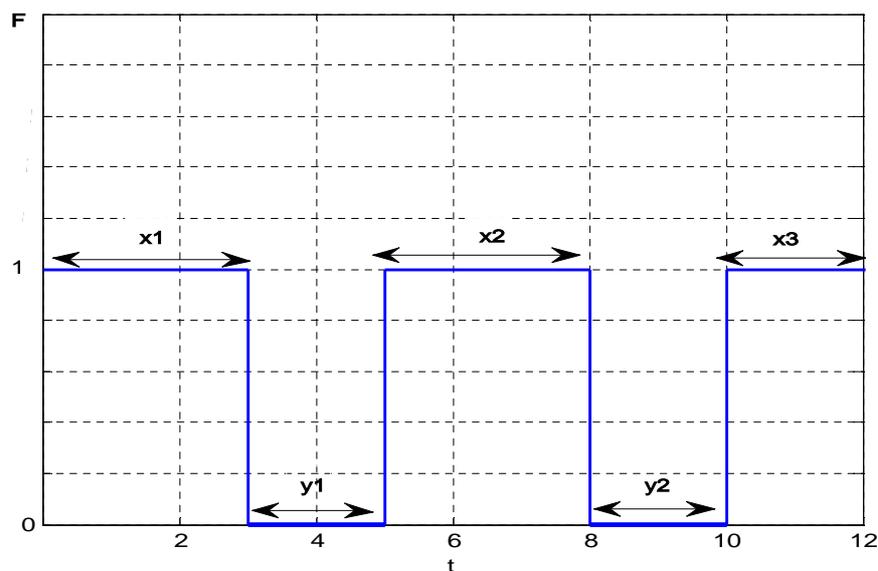


Figure II.11 : Chronogramme d'un système réparable.

#### II.3.4.1. Amélioration de la disponibilité

L'équation (II.4) montre que la disponibilité peut être améliorée par une augmentation des temps moyens de bon fonctionnement (par la fiabilité) et par une diminution des temps moyens de réparations (par la maintenabilité). Avant de présenter la maintenabilité et ses critères, mentionnons les stratégies de maintenance à même de réduire les durées moyennes de réparation.

On présente plusieurs stratégies de remplacements périodiques, celles de type âge où les remplacements sont effectués à la panne et après  $T$  unités de temps sans panne et celles de type bloc avec des remplacements à des instants prédéterminés, indépendamment de l'âge et de l'état de l'équipement [3].

### II.3.5. Maintenabilité des systèmes

La maintenabilité est la probabilité qu'un matériel, lorsqu'il nécessite une intervention de maintenance, soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions données [2].

Pour un système réparable, la durée de réparation est une variable aléatoire dont la fonction de densité est  $h(t)$ , la probabilité que le système hors d'usage soit remis en état d'opération entre  $t$  et  $t + dt$  est  $h(t).dt$ . La fonction de densité permet de calculer les autres grandeurs représentant la maintenabilité : la probabilité qu'une réparation soit effectuée dans un intervalle donné  $H(t)$ , la durée moyenne des réparations  $MTTR$ , le taux de réparation  $\mu(t)$ .

L'équation (II.7) donne le temps moyen d'une réparation ou  $MTTR$  dans le cas d'une distribution exponentielle des durées de réparation  $h(t)$  dont le taux de réparation  $\mu$  est constant. Notons cependant que la distribution log-normale s'avère, en général, plus réaliste.

Pour ajuster les durées de réparation des systèmes réparables.

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (II.7)$$

#### II.3.5.1. Mesure de la maintenabilité

La mesure de la maintenabilité peut se faire par des études statistiques sur la durée des opérations de maintenance effectuées sur des installations qui sont en service depuis un certain temps, de la même manière que l'étude de la fiabilité peut passer par l'analyse d'historiques de pannes [79]. Les indices de la maintenabilité les plus courants et reconnus sont :

- le temps moyen de réparation ;

- le temps maximum de réparation ;
- le temps moyen de maintenance ;
- le temps de réparation de l'équipement ;
- la moyenne géométrique des durées de réparation;
- les heures travaillées en maintenance ;
- le taux de réparation ;
- le taux de maintenance ;
- la probabilité de détection des défaillances ;
- la proportion des défaillances isolables ;
- la capacité de détection automatique de la défaillance ;
- le pourcentage de fausses alarmes ;
- le pourcentage de mauvais remplacements.

Les données de réparation requises peuvent être obtenues de plusieurs sources : entre autres du service de maintenance, des rapports de défaillances et des réclamations de garanties des consommateurs, des expériences passées sur des produits semblables ou identiques, etc.

### **II.3.5.2. Analyse du système de maintenabilité**

Comme pour la fiabilité, il est parfois nécessaire de calculer la maintenabilité avant que ces données ne soient disponibles. On réalise alors des prototypes pour vérifier la maintenabilité d'un produit qui vient d'être conçu et ainsi acquérir une expérience pratique sur un produit concret, dans un environnement opérationnel [78].

La (figure II.10) regroupe en 6 catégories les conditions qui doivent être respectées pour une telle étude :

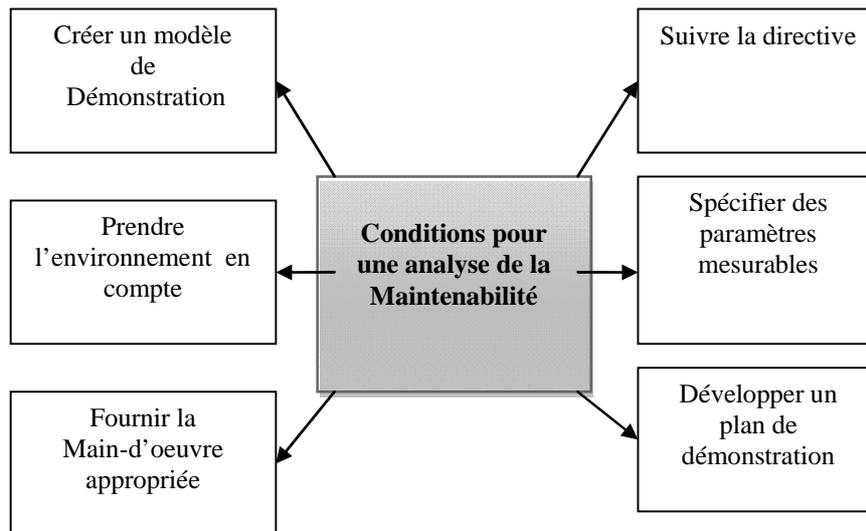


Figure II.12 : Conditions pour une analyse de maintenabilité

| <u>Diminution des durées</u>             | <u>Recommandations</u>  |
|--|---|
| <b>Durée de détection de défaillance</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les dispositifs de vérification permettent de suivre le bon fonctionnement des matériels : appareils de mesures (débit, pression, températures.etc. voyants, niveaux à visualiser, dispositifs d'essai ou d'étalonnage ;</li> </ul>  |
| <b>Durée de diagnostic</b>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les dispositifs de recherche de défauts peuvent être manuels ou automatiques.</li> </ul> <p>Les dispositifs de vérification permettent aussi une réduction de la durée de diagnostic .Mais d'autres éléments interviennent :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le repérage et l'accessibilité des points de mesure ;</li> <li>▪ La qualité de documentation de maintenance ;</li> <li>▪ Les procédures logiques, méthodiques de vérification (logigramme de dépannage, tableau de diagnostic, etc) ;</li> <li>▪ La connaissance de la probabilité de défaillance .</li> </ul> |
| <b>Durée de réparation</b>               | Minimisation de la durée d'une intervention en agissant sur :   |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Durée nécessaire au contrôle</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'accessibilité ;</li> <li>▪ La facilité de démontage et de remontage ;</li> <li>▪ L'interchangeabilité ;</li> </ul> <p>La durée de phase de contrôle d'un matériel peut être diminuée par les possibilités d'essais en exploitation à l'aide de dispositifs de vérification, d'appareils de mesures spécifiques conçue pour faciliter la maintenance et le contrôle.</p> |
|--|--|

**Tableau II.2 : Recommandations pour améliorer la maintenabilité**

### II.3.5.3. Choix des tests

L'objectif principal d'une démonstration formelle de la maintenabilité est de vérifier si les paramètres mesurés se conforment bien à ceux qui ont été définis dans le cahier des charges. Tous les tests de maintenabilité n'ont pas pour objectif d'accepter ou de rejeter la conception. Par exemple, avant l'acceptation du design, la gestion administrative, stratégique et logistique de la maintenance a besoin des données issues de ces tests pour mettre au point les actions correctives, revoir les besoins et le support nécessaire aux actions de maintenance [22]. On classe les différents tests en plusieurs catégories : fonctionnels, statiques ou dynamiques, marginaux et en boucle ouverte ou fermée.

Si les problèmes de la maintenabilité sont détectés trop tard, les défauts sont plus coûteux que s'ils avaient été prévus au stade de la définition du produit. La prévision de la maintenabilité a pour objectif d'anticiper les conséquences de la conception sur la réparation du système. Initialement, cette prévision était énoncée par des termes qualitatifs (points de test appropriés, accessibilité, facilité de maintenance, ...etc.). Par la suite, le besoin d'une définition explicite des caractéristiques prévisionnelles a promu un traitement quantitatif de la maintenabilité.

Pour évaluer la maintenabilité sur des prototypes, il faut que la conception soit suffisamment avancée pour permettre l'élaboration partielle d'un produit. Afin d'agir encore plus tôt dans le stade de la conception, il est nécessaire de concevoir le système en suivant certains principes de base, énoncés par la conception pour la maintenabilité ou (*Design for Maintainability*).

#### **II.3.5.4. Critères de la maintenabilité**

En recensant les différents moyens d'améliorer la maintenabilité, un certain nombre de mots clés apparaissent [2] : l'accessibilité, l'interchangeabilité, etc., représentant les critères de maintenabilité, comme il est résumé sur le (tableau II.2).

#### **II.3.5.5. Prévisions de la maintenabilité**

La demande pour des méthodes de prévision fiables n'a cessé d'augmenter durant les années [70]. L'objectif est d'être en mesure de faire une évaluation systématique de la maintenabilité pour une proposition de conception donnée et de fournir un indicateur au concepteur afin de lui permettre de comparer différentes propositions de conception et de les améliorer [72].

Un grand nombre d'approches ont été proposées et la plupart peuvent être classées en trois catégories :

- L'extrapolation, basée sur le principe que la performance du nouveau produit peut être raisonnablement prévue à partir de l'expérience acquise sur un équipement similaire ;
- Décomposition de l'effort de maintenance en tâches élémentaires et somme des durées moyennes de chaque tâche ;
- La liste de contrôle, qui donne les caractéristiques importantes d'un système à classer et à évaluer.

#### **II.3.5.6. Indices de la maintenabilité**

L'objectif est d'estimer la maintenabilité globale à partir de plusieurs critères pour éventuellement la convertir en coût en proposant une liste de contrôle de plusieurs critères à évaluer pour estimer cet effort de maintenance.

|                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1) Accessibilité             | 7) Modularité                     |
| 2) Désassemblage /assemblage | 8) Tribologie                     |
| 3) Standardisation           | 9) Personnel et ergonomie         |
| 4) Simplicité                | 10) Environnement                 |
| 5) Identification            | 11) Outils et équipements de test |
| 6) Diagnosticabilité         | 12) Documentation                 |

**Tableau II.3 : Critères de l'indice de la maintenabilité**

Chaque critère ou interrelation entre deux critères est évalué manuellement. La valeur est comprise entre 0 (nul) et 4 (fort), ce qui représente l'importance de l'apport positif pour la maintenance. Dans la littérature, on trouve une interprétation associée à chaque niveau de la pondération. Enfin, grâce à une représentation par graphe orienté ou par matrice, l'indice de la maintenabilité est défini par le permanent de la matrice [47].

Ce type d'approche peut également être spécifique au désassemblage. (Eward.f et all) dans [20] proposent un modèle multi- critère pour évaluer l'effort et le coût de désassemblage d'un produit en fin de vie.

Ils proposent l'indice *DEI* ( Disassembly effort index) qui repose sur six facteurs requis au désassemblage :

- le temps et outillage ;
- la technique d'enlèvement ;
- l'accessibilité ;
- les instructions de désassemblage ;
- les protections ;
- l'effort.

Chaque critère dispose d'une échelle quantitative et qualitative qui lui est propre, incluant la pondération.

## II.4. Analyse des modes de défaillances par la méthode AMDEC

L'AMDEC est une méthode d'analyse préventive qui recense et met en évidence les risques potentiels [3]. L'« AMDEC conception » permet de déterminer les points faibles, de préciser les moyens de se prémunir contre certaines défaillances et de classer les défaillances selon certains critères (fréquences, capacité de détection, criticité, gravité, etc.).

L'AMDEC conception constitue donc un outil extrêmement puissant d'aide à la conception des systèmes. Cependant, bien qu'applicable lors de la conception, cette méthode d'analyse est plus performante lorsqu'elle est appliquée à des systèmes déjà en exploitation et que l'on veut améliorer la politique de maintenance.

### II.4.1. Analyse qualitative de la défaillance

La première étape consiste à recenser de façon la plus complète possible tous les modes de défaillances potentiels et plausibles de l'entité analysée. À ce stade, on suppose que la défaillance peut avoir lieu mais n'intervient pas nécessairement. Pour la cause de défaillance, une technique efficace de recherche consiste à utiliser le diagramme en «arrête de poisson». À l'aide d'un diagramme par mode de défaillances, les causes interdépendantes sont identifiées et regroupées de façon arborescente.

Chaque mode provoque un effet de défaillance, c'est à dire une conséquence sur la fonction ou sur les systèmes environnants. Certains fabricants définissent l'effet comme « ce que le client pourrait remarquer en supposant que la défaillance intervienne ».

La capacité de détection de la défaillance peut être prévue et facilitée par un certain nombre de dispositifs. Il s'agit de recenser les moyens déjà existants, soit pour prévenir l'apparition de la cause, soit pour détecter la défaillance.

Il s'agit de pouvoir évaluer la défaillance à travers plusieurs critères par l'attribution d'une note à chacun des critères. En règle générale, on utilise trois critères ou indices : la fréquence, la gravité et la détection.

1. L'indice de fréquence « F » ou d'occurrence « O » marque la probabilité que la cause se produise et qu'elle entraîne le mode de défaillance concerné. C'est aussi une estimation de la probabilité d'occurrence de la cause de défaillance considérée.
2. L'indice de gravité « G » s'intéresse à la gravité provoquée par l'effet. C'est aussi l'impact des effets des défaillances sur le produit ou une estimation de la sévérité de l'effet maximum de la défaillance.

3. L'indice de détection « D », plus souvent appelé risque de non -détection par souci de synthèse, marque la probabilité que la cause et le mode étant apparus, la défaillance atteigne l'utilisateur.

L'indice de criticité « C » est la résultante des facteurs de risques présentés ci- dessus. Il est déterminé par le produit des trois indices

$$C = D.F.G \quad (II.8)$$

Si chaque indice est noté de 1 à 4, la criticité peut évoluer de 1 à 64. Plus l'indice est grand, plus le risque lié aux défaillances potentielles est élevé. Une stratégie d'amélioration des produits consiste à traiter les criticités supérieures à un seuil donné.

| <b>Gravité G : impact des défaillances sur le produit ou l'outil de production</b>  |   |   |  |
|---|---|---|--|
| 1   | <b>Sans dommage</b> : défaillance mineure ne provoquant pas d'arrêt de production et aucune dégradation notable des matériel. | 3 | <b>Important</b> : défaillance provoquant un arrêt significatif, et nécessitant une intervention importante.                   |
| 2   | <b>Moyenne</b> : défaillance provoquant un arrêt de production et nécessitent une petite intervention.                        | 4 | <b>Catastrophique</b> défaillance provoquant un arrêt impliquant des problèmes graves.   |
| <b>Fréquence F: indice d'apparition d'une défaillance</b>                           |   |   |  |
| 1   | <b>Exceptionnelle</b> : la possibilité d'une défaillance est pratiquement inexistante.  | 3 | <b>Certains</b> : il ya eu traditionnellement des défaillances dans le passé.  |
| 2   | <b>Rare</b> : une défaillance occasionnels s'est déjà produite ou pourrait se produire.                                       | 4 | <b>Très fréquente</b> : il est presque certain que la défaillance se produira souvent.   |
| <b>Non- détection D : indice de probabilité de non- détection de la défaillance</b> |   |   |  |
| 1   | <b>Signes avant-coureurs</b> : l'opérateur pourra détecter facilement la défaillance  | 3 | <b>Aucun signe</b> : la recherche de la défaillance n'est pas facile.  |
| 2   | <b>Peu de signes</b> : la défaillance est décelable avec une certaine recherche.  | 4 | <b>Expertise nécessaire</b> : la défaillance n'est pas décelable ou encore sa localisation nécessite une expertise approfondie |

**Tableau II.4 : Analyse des modes de défaillances**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>C &lt; 16</b>      | <b>Ne pas tenir compte</b>                    |
| <b>16 ≤ C &lt; 32</b> | <b>Mise sous préventif à fréquence faible</b> |
| <b>32 ≤ C &lt; 36</b> | <b>Mise sous préventif à fréquence élevée</b> |
| <b>36 ≤ C &lt; 48</b> | <b>Recherche d'amélioration</b>               |
| <b>48 ≤ C &lt; 64</b> | <b>Reprendre la conception</b>                |

**Tableaux II.5 : Echelle de criticité****II.4.2. Application de l'AMDEC**

Ces outils peuvent procurer un encadrement très utile car les analyses qualitative et quantitative de l'AMDEC s'insèrent dans une méthodologie globale (également applicable pour un produit déjà conçu) :

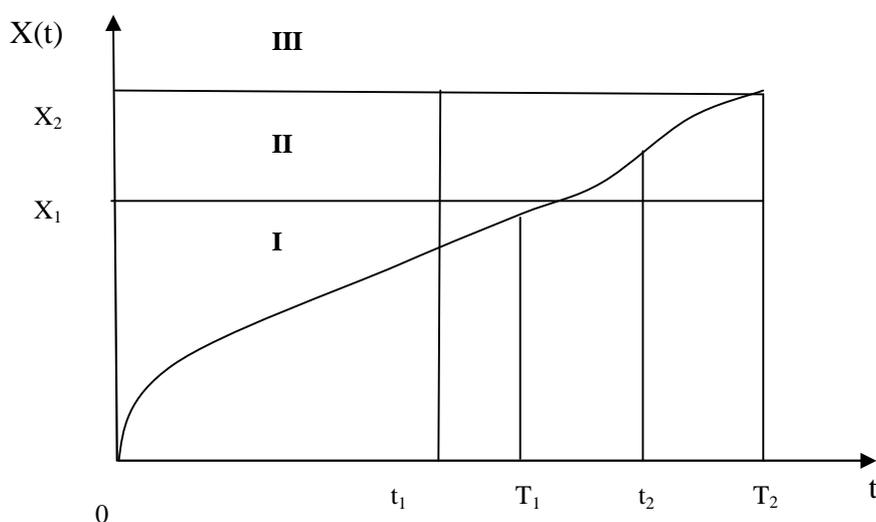
- définition de l'étude ;
- préparation de l'étude ;
- analyse et évaluation des défaillances potentielles ;
- actions correctives ou préventives ;
- réévaluation après actions correctives ;
- criticité résiduelle et liste des points critiques ;
- planification et mise en place des actions correctives.

À partir de ces analyses préalables, un premier prototype est élaboré pour être testé. Chaque problème constaté amène de nouvelles analyses et des modifications qui poussent à l'élaboration d'un nouveau prototype. Comme il s'agit de produits différents, les données de fiabilité de chaque prototype apparaissent indépendantes.

L'analyse de l'accroissement de la fiabilité (ou *RGA* pour Reliability Growth Analysis) tire profit de l'ensemble des résultats des essais, sans soit, pour différents prototypes améliorés selon une procédure test -fixe- test Cette approche, tout comme les essais accélérés, n'est pas simplement mathématique. Une bonne méthodologie est nécessaire pour mener à des conclusions pertinentes ; donc la méthode peut évaluer le potentiel de développement de la fiabilité pour une stratégie donnée. Le produit peut être amélioré ou laissé non corrigé après apparition d'un mode de défaillance. De ce fait, l'AMDEC est considérée comme un outil de planification du développement de la fiabilité.

## II.5. La maintenance selon l'état avec le contrôle des paramètres

L'essentiel de la méthode consiste à la mise en pratique d'un contrôle continu ou périodique et la mesure des paramètres déterminants l'état technique des composants des équipements dont le but est le maintien d'une fiabilité donnée durant l'exploitation et une utilisation plus complète des ressources individuelles de chaque composant [63]. La réalisation de cette méthode, peut être considérée sur la base du modèle de remplacement d'un composant (figure II.13).



**Figure II.13. Schéma du modèle « remplacement selon l'état technique avec contrôle d'un paramètre »**

- I .Etat non défaillant
- II. Etat avant défaillance ou zone de dégradation
- III. Etat de défaillance

Supposons que l'état d'un composant est déterminé par les valeurs des paramètres contrôlés et considérons le cas où le paramètre  $X(t)$  [77] est une fonction aléatoire monotone du temps correspondante au paramètre contrôlé du composant ; et  $X_2$  est la valeur limite du paramètre dont l'intersection avec les réalisations du processus aléatoire  $X(t)$  conduit à la défaillance du composant et  $X_1$  est la valeur du paramètre avant défaillance ; l'intervalle  $\Delta X = X_2 - X_1$  détermine la tolérance de dégradation.

Le domaine  $0 - X_1$  de la variation de la fonction aléatoire  $X(t)$  est nommé le domaine de bon état de fonctionnement du dispositif considéré (Etat 1), le domaine  $X_2 - X_1$  de variation de la fonction  $X(t)$  est le domaine du remplacement préventif (Etat2) et, enfin le domaine  $X_2 \rightarrow \infty$  est nommé le domaine de la perte de la fonction requise du composant considéré (Etat 3).

On prend les hypothèses suivantes relatives à la fonction aléatoire  $X(t)$  :

Un composant qui n'a jamais fonctionné ( $t = 0$ ), se trouve dans l'état 1 avec une probabilité égale à l'unité. A l'instant  $t = T_1$  le processus aléatoire  $X(t)$  correspond à l'état 1 avec une probabilité  $R_1$ , et dans l'état 2 avec une probabilité  $P_1$ , et dans l'état 3 avec une probabilité  $Q_1$ . Ainsi la distribution du processus selon les états du composant est soumise à la condition [7].

$$P_1 + Q_1 + R_1 = 1 \quad (\text{II.9})$$

On suppose aussi qu'après le remplacement; le nouveau composant installé est selon son état équivalent à un nouveau composant.

Alors au moment indiqué  $t = T_1$  on vérifie l'état du composant. Si à ce moment, il se trouve dans l'état 1, alors son utilisation est admise ; s'il se trouve dans l'état 2, alors son remplacement préventif sera programmé, et s'il se trouve dans l'état 3 alors une réparation urgente doit être exécutée. Le moment de vérification doit être choisi de façon que  $X_1 < X(t) < X_2$ .

Les niveaux  $X_1$  et  $X_2$  se coupent avec le processus aléatoire  $X(t)$  aux moments aléatoires  $T_1$  et  $T_2$  Cependant il est très clair que l'état des remplacements préventifs doit correspondre à la condition  $t_1 < T_1$

Supposons, que dans les résultats d'études statistiques, on a obtenu une description formelle du processus aléatoire  $X(t)$ , et il est connu la valeur limite du paramètre déterminant  $X_2$ .

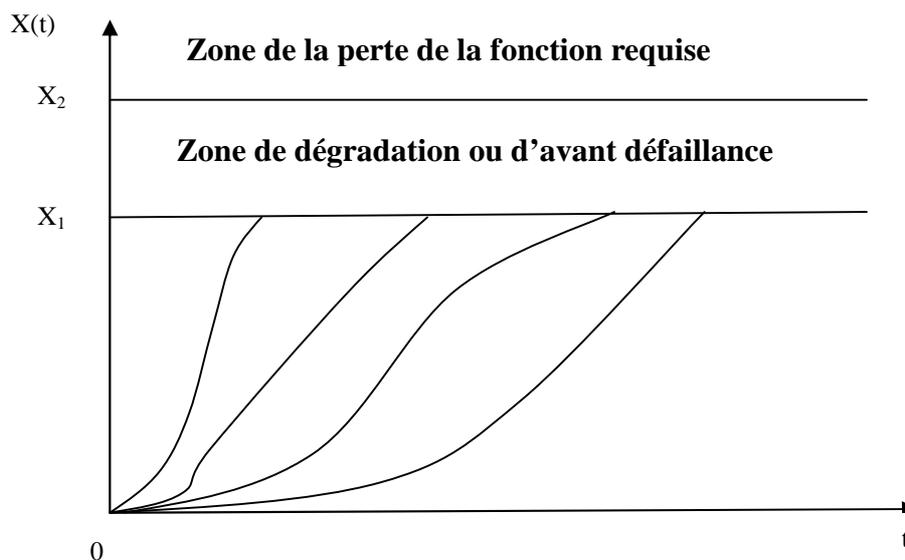
Alors le problème consiste à déterminer la liaison de la périodicité des travaux de vérification  $\Delta t = t_2 - t_1$  et la tolérance de dégradation  $\Delta X$  sur le paramètre contrôlé afin d'assurer un niveau de fiabilité donné, et aussi pour un régime de diagnostic optimal.

L'idée d'optimisation consiste à ce qui suit : Pour un processus aléatoire connu  $X(t)$ , avec ses valeurs données de la limite  $X_2$  et de la probabilité tolérée de défaillance  $Q(t)$ , chaque valeur de la tolérance de dégradation correspond à un nombre concret de périodicité des vérifications. Cependant plus les valeurs de  $X_1$  et  $X_2$  sont grandes, tant que les coûts de maintenance le sont. Le régime local optimal du diagnostic correspond au régime assurant des coûts spécifiques sommaires de maintenance minimale.

La méthode de maintenance par le contrôle de paramètres d'état est utilisée pour les équipements ayant un niveau suffisant de contrôlabilité des défaillances qui influent sur la disponibilité et la sécurité pour des sauts importants des valeurs du temps de fonctionnement jusqu'à la défaillance. La mise en pratique de cette méthode est précédée aussi par une évaluation économique de la rationalité de leur utilisation. La méthode considérée peut être assurée soit par un contrôle continu ou discret des paramètres contrôlés.

### II.5.1. Modèle de remplacement par le contrôle continu des paramètres

Sur la (figure II.14) est représenté le modèle de remplacement de la  $n^{\text{eme}}$  quantité du composant identique par le contrôle continu des paramètres. La possibilité de défaillance des composants lors de ce contrôle est exclue, puisqu'ils sont tous remplacés par des nouveaux, lorsqu'ils atteignent l'état d'avant défaillance.

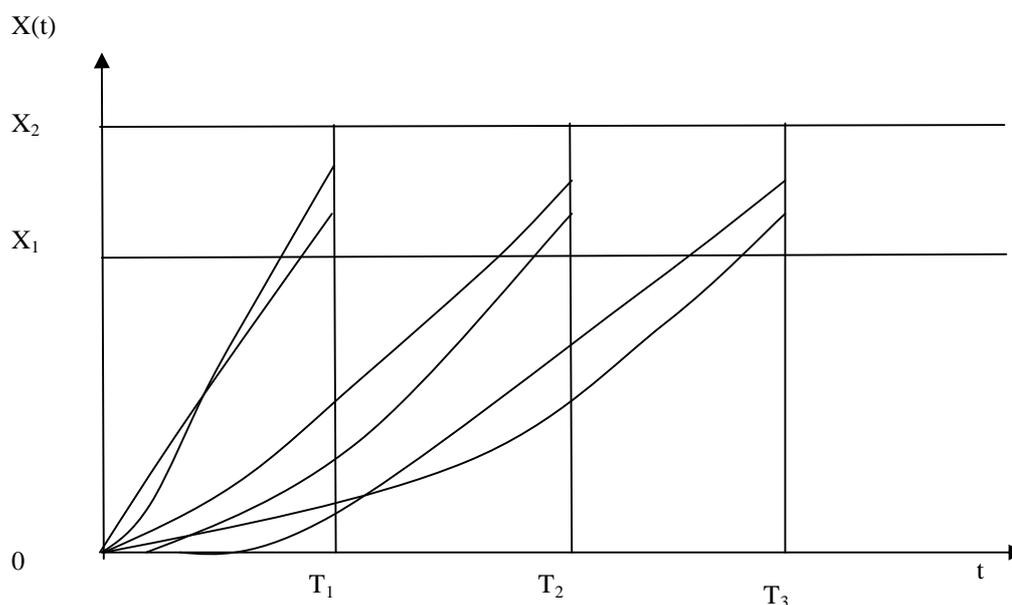


**Figure II.14. Schéma du modèle de remplacement d'un composant selon son état lors du contrôle continu des paramètres.**

Le contrôle continu des paramètres est un processus complexe et très coûteux, c'est pourquoi on utilise souvent le contrôle discret des paramètres (figure II.15).

### II.5.2. Modèle de remplacement par le contrôle discret des paramètres

Dans cette méthode ; lorsque le temps de fonctionnement du composant est  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  etc., et à l'aide des appareillages du diagnostic on fait le contrôle des paramètres et on remplace les composants dont les paramètres montrent qu'ils se trouvent dans la zone de dégradation. La prédiction des variations des paramètres du contrôle des composants restants permet la possibilité de déterminer la périodicité de leurs prochains remplacements.



**Figure II.15. Schéma du modèle de remplacement selon l'état lors du contrôle discret des paramètres.**

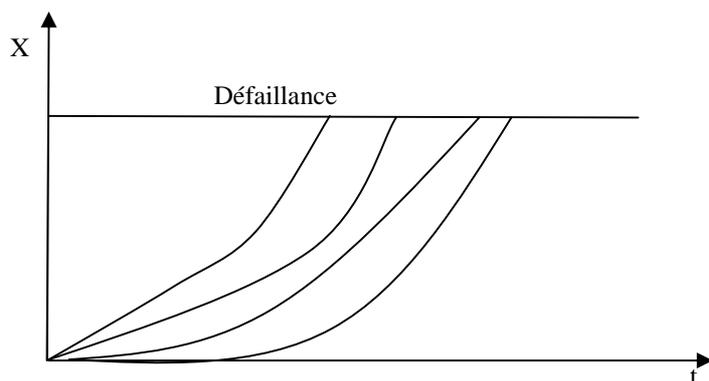
L'état technique des équipements est déterminé par l'ensemble de ses paramètres de diagnostic dont les valeurs dépendent du caractère de l'interaction entre les composants structuraux de l'équipement (paramètres structuraux). Le paramètre de diagnostic doit avoir une seule valeur qui correspond à l'état de défaillance, un champ large de mesure, l'accessibilité et la facilité de mesure du paramètre.

L'état technique d'un équipement est déterminé par l'ensemble des paramètres de diagnostic, des paramètres structuraux décisifs (critiques) au changement. Comme paramètre de diagnostic, peuvent être utilisés des paramètres fonctionnels, s'ils sont décisifs au changement des paramètres structuraux.

### II.5.3. Méthodes de maintenance selon l'état par le contrôle du niveau de fiabilité

Selon cette méthode l'équipement est exploité jusqu'à la défaillance sans limitation du temps de fonctionnement entre les réparations. L'opération de maintenance se résume à l'élimination des conséquences de la défaillance. Avec cela doit être assuré une indication à temps de la défaillance de l'équipement en fonctionnement ; ou bien la détection de la défaillance lors de l'entretien opérationnel ou périodique. Le niveau contrôlé de fiabilité sous forme de paramètre de défaillance est indiquée dans les documents techniques d'exploitation et il est vérifié durant l'exploitation. Lors de la diminution de la fiabilité, le composant est mis au point ou bien on change le régime d'exploitation.

Sur la (figure II.16) est représenté le modèle de remplacement des composants des équipements lors de la maintenance par le contrôle du niveau de fiabilité (jusqu'à la défaillance non dangereuse) [36]. Le schéma est caractérisé par sa simplicité puisqu'il ne nécessite pas la fixation de la tolérance de dégradation du paramètre de diagnostic, nécessaire pour l'exploitation par le contrôle des paramètres.



**Figure II.16. Schéma du modèle de remplacement d'un composant lors d'une défaillance non dangereuse (par contrôle du niveau de fiabilité)**

## II.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons passé en revue tous les caractéristiques des études de fiabilité des systèmes. Le principal objectif de ce chapitre est de trouver une solution optimale des structures en satisfaisant simultanément un certain niveau de fiabilité. Généralement, un problème d'optimisation fiabiliste est formulé comme un problème général d'optimisation classique en prenant en compte l'indice de fiabilité dans les contraintes. La disponibilité a été étendue à une entité quelconque : elle n'est donc plus limitée à un matériel (cela, pour prendre en compte la maintenabilité de différents systèmes).

Par ailleurs, l'état de fonctionnement que l'on trouve dans les définitions de la fiabilité (accomplir une fonction requise) doit être de plus en plus interprété comme un fonctionnement correct, comme l'exécution correcte des tâches : autrement dit une exécution erronée de tâches est aussi grave (souvent) que l'arrêt total de fonctionnement.

# CHAPITRE III

## DETECTION DES DEFAUTS ET DETERMINATION DES PERIODICITES OPTIMALES DE REPARATION D'UN SYSTEME INDUSTRIEL

---

Dans cette partie de thèse, on développe deux approches basées sur des principes de la maintenance préventive systématique dans le but de la détermination de la périodicité optimale de réparation d'un système industriel ; dont la première est développée à partir d'une modélisation probabiliste à partir des paramètres d'état qui définissent la dégradation. La seconde approche conduit à une fonction objectif du coût de maintenance basée sur les lois de survies des composants vitales du système étudié afin de nous permettre la planification optimale des opérations de maintenance. Dans notre cas, on a choisi deux équipements largement utilisés dans l'industrie des hydrocarbures, qui sont les pompes et les compresseurs.

Dans le but de la détection de l'évolution des défauts, et à base de l'analyse spectrale qui fait partie des principes de la maintenance préventive conditionnelle ; on a développé une approche qui repose sur l'analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée.

### III.1. Introduction

L'amélioration de la maintenance préventive systématique des installations industrielles, nécessite la connaissance de leurs comportements et cela en maîtrisant l'évolution de leurs états ou en ayant les modèles mathématiques de survies.

Pour réaliser cet objectif, dans notre étude on a visé à déterminer la périodicité optimale de la réparation d'un palier portant appartenant à un turbocompresseur par une modélisation probabiliste à partir de ses paramètres d'état qui définissent sa dégradation.

Pour élaborer une planification des actions de maintenance des entités vitales d'un compresseur centrifuge à partir de leurs coûts directs et indirects en connaissant leurs modèles de survies actualisés ; on a développé un modèle mathématique basé sur la linéarisation des taux de défaillances des modules critiques du matériel considéré.

La détection et l'identification des défauts dans les systèmes industriels, qui fait partie de la maintenance préventive conditionnelle est un enjeu important dans l'industrie moderne. En effet dans beaucoup d'applications, il s'agit souvent, au-delà des considérations purement économiques, d'assurer la sécurité des personnes et de préserver leur environnement [71, 72].

Dans ce chapitre, et pour déterminer la périodicité de réparation systématique, nous développerons une approche aléatoire basée sur l'évolution du paramètre qui définit l'état des matériels à maintenir. La seconde approche est basée sur la construction d'un modèle mathématique à partir des taux de défaillances des composants responsables de l'indisponibilité dont le but est l'optimisation de la planification des charges dans le cadre de la maintenance préventive systématique. Dans le volet conditionnelle de l'art, et dans le but de prédire les défaillances ; l'analyse spectrale, qui repose sur une analyse du signal vibratoire afin de rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, et de leurs fréquences d'excitation. Notre choix est justifié par son utilisation dans le cadre de l'élaboration du choix de la stratégie de maintenance conditionnelle pour les applications industrielles.

## III.2. Maintenance Préventive Systématique

La maintenance préventive systématique est onéreuse et peu efficace tant que les conditions normales d'exploitation des équipements ne sont pas respectées. Pour construire un plan de maintenance, on s'appuie sur la connaissance des paramètres de fiabilité des composants à contrôler. Cette connaissance est soit mathématique, ce qui n'est pas toujours possible dans l'industrie, soit obtenue à partir de différentes estimations qui sont souvent implicites [1].

### III.2.1. Approche probabiliste à partir des paramètres d'état de dégradation

On envisage dans ce travail la détermination des cycles de réparation à partir des paramètres d'état de dégradation courant des composants d'un équipement donné ; afin que les opérations de maintenance ne soient pas entreprises au moment où l'usure atteint un degré tel que l'équipement sera inévitablement mis hors service d'une part ; et pour éviter des remplacements systématiques des composants coûtant chers et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives de façons continues ou périodiques [15]. Pour profiter des avantages d'une telle politique de maintenance, il faut déterminer les périodicités optimales des cycles de réparation des équipements [11]. Dans ce contexte, et en utilisant une approche probabiliste, on détermine les périodicités optimales de remplacement des composants des équipements.

#### III.2.1.1. Modélisation probabiliste au problème considéré

L'état de dégradation d'un élément est déterminé par les variations d'un certain paramètre d'état  $X$ . Si la valeur du paramètre  $X$  dépasse un certain seuil toléré et fixé par la technologie de réparation  $X_r$  ou par les clauses techniques d'utilisation  $X_e$ , la réparation devient nécessaire, et elle est considérée comme une défaillance. Les variations du paramètre  $X$  forment un processus aléatoire dans le temps [4], et au niveau de la section correspondante à  $T=0$  le paramètre  $X$  a une certaine distribution de densité  $f(x,t=0)$ , et une fonction de répartition  $F(x,t=0)$  d'espérance mathématique  $E_{x,0}$  et d'écart type  $S_{x,0}$  (figure III.1). Au cours du temps de fonctionnement ces caractéristiques varient comme suit :

$$E_{x,t} = E_{x,0} + \alpha E.t \quad (\text{III.1})$$

$$S_{x,t} = S_{x,0} + \alpha S.t \quad (\text{III.2})$$

Où  $\alpha E$ ,  $\alpha S$  des coefficients constants.

Après un certain temps de fonctionnement  $t$ , la densité de distribution du paramètre  $X$  sera  $f(x,t)$  dont les caractéristiques sont déterminées par les expressions (III.1) et (III.2).

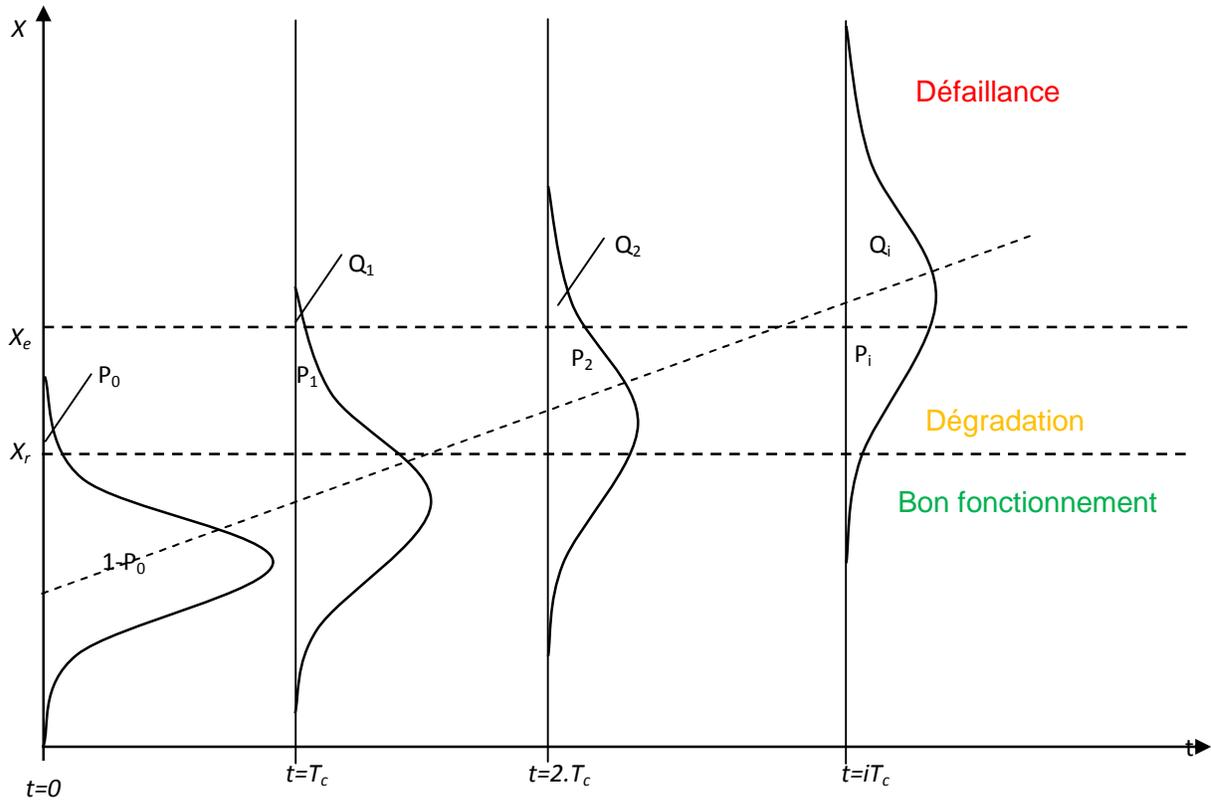


Figure III.1 : Schéma du processus aléatoire des variations du paramètre  $X$

-A l'instant  $t = T_c$  :

La probabilité que le paramètre d'état  $X$  soit dans la zone de bon fonctionnement s'exprime par la relation suivante [44]:

$$P(x < X_r, T_c) = F(X_r, T_c) \quad (III.3)$$

Probabilité que  $X$  soit dans la zone de dégradation [77] est :

$$P_1 = P(X_r \leq x < X_e, T_c) = [F(X_e, T_c) - F(X_r, T_c)] \quad (III.4)$$

Ainsi que la probabilité que  $X$  soit dans la zone de la perte de la fonction est :

$$Q_1 = P(x > X_e, T_c) = 1 - F(X_e, T_c) \quad (III.5)$$

-A l'instant  $t = 2Tc$  :

La probabilité que le paramètre d'état  $X$  soit dans la zone de dégradation tout en étant au bon fonctionnement à l'instant précédent s'exprime par la relation suivante :

$$P_2 = P(Xr \leq x < Xe, 2Tc) = [F(Xe, 2Tc) - F(Xr, 2Tc)].F(Xr, Tc) \quad (III.6)$$

La probabilité que  $X$  soit dans la zone de défaillance tout en étant au bon fonctionnement a l'instant précédent est :

$$Q_2 = P(x > Xe, 2Tc) = [1 - F(Xe, 2Tc)].F(Xr, Tc) \quad (III.7)$$

Pour un équipement déterminé de périodicité du cycle de réparation  $Tc$ , les probabilités totales de subir une intervention non planifiée après la  $i$ ème période du cycle est donnée par l'expression :

$$Q_i = [1 - F(xe, iTc)] \prod_{j=0}^{i-1} F(xr, jTc) \quad (III.8)$$

Où  $iTc$  : durée du temps jusqu'à la  $i$ ème période du cycle de réparation.

$F(x, ti)$  : fonction de distribution du paramètre d'état  $X$  relative au moment  $ti$ .

La probabilité de subir une intervention planifiée au moment  $t = iTc$  est donnée par l'expression :

$$P_i = [F(xe, iTc) - F(xr, iTc)] \prod_{j=0}^{i-1} F(xr, jTc) \quad (III.9)$$

Sachant que les fonctions de répartitions à l'instant  $iTc$  s'expriment par les relations suivantes :

$$F(Xe, iTc) = \int_{-\infty}^{Xe} f(x, iTc) dx \quad (III.10)$$

$$F(Xr, iTc) = \int_{-\infty}^{Xr} f(x, iTc) dx \quad (III.11)$$

De la même façon s'exprime la densité de distributions a l'instant  $iTc$  selon la loi de GAUSS :

$$f(x, iTc) = \frac{e^{-\frac{1}{2}[(x - Ex, o - \alpha E. iTc)/(S + \alpha S. iTc)]^2}}{\sqrt{2\pi} \cdot (Sx, o + \alpha S. iTc)} \quad (\text{III.12})$$

En divisant le cycle de réparation en  $k$  intervalles, et selon le théorème de BAYES [7], la probabilité correspondante à un arrêt d'urgence non programmé de l'équipement est donné par l'expression :

$$Q = \lim_{s \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^s [1 - F(xe, iTc)] \prod_{j=0}^{i-1} F(xr, jTc) \quad (\text{III.13})$$

La probabilité totale correspondante à un remplacement d'un composant de l'équipement considéré est donnée par l'expression :

$$P = \lim_{s \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^s [F(xe, iTc) - F(xr, iTc)] \prod_{j=0}^{i-1} F(xr, jTc) \quad (\text{III.14})$$

Dans ce cas, le temps moyen de service du composant est donné par l'expression :

$$T_m = \lim_{s \rightarrow +\infty} \left( \sum_{i=1}^s Q_i T_i^* + \sum_{i=1}^s P_i T_i^{**} \right) \quad (\text{III.15})$$

Où :  $T_i^* = (2i - 1)Tc / 2$  et  $T_i^{**} = iTc$

L'espérance mathématique des coûts sommaires éventuels des interventions planifiées et non planifiées sur l'équipement relative à un composant déterminé est donnée par l'expression [64] :

$$E(Tc) = Cd.Q + Cp.P = Cd(Q + \lambda c.P) \quad (\text{III.16})$$

Où :

$Cd$  : Coût total d'une intervention non planifiée

$Cp$  : Coût total d'une intervention planifiée.

$$\lambda c = Cp / Cd$$

Le coût spécifique de réparation de l'élément considéré est :

$$U_s = E(T_c)\ddot{Y} / T_m \quad (\text{III.17})$$

Ou :

$\ddot{Y} = (x_e - x_r) / \alpha.E$  : Durée moyenne possible de fonctionnement de l'élément jusqu'à la défaillance ( $x > x_r$ ), dans le cas où l'intervention préventive n'est pas réalisée. La périodicité optimale [15] est déterminée par la résolution de l'équation :

$$dU_s / dT_c = 0 \quad (\text{III.18})$$

### III.2.2. Approche basée sur la linéarisation du taux de défaillance

La fiabilité de fonctionnement d'un système est préservée si la fiabilité de fonctionnement de chaque appareil, machine, tuyauterie et tout dispositif lié au circuit technologique est garantie [92]. Par la maintenance et le suivi on prévoit des réparations prophylactiques planifiées afin de maintenir et rétablir la capacité de bon fonctionnement des équipements [5].

On se basant sur la définition de la fiabilité des composants, on doit prendre en compte leurs conditions d'utilisations (charge, vitesse, conditions d'environnement, etc...) ainsi que leurs conditions de maintenance (lubrification, qualité de montage et d'ajustement, état des autres composants, etc..) ; qui sont désignées par conditions normales dont le non-respect entraîne des dégradations forcées [77].

Une dégradation forcée permanente entraîne une augmentation de la vitesse de défaillance. Le seuil de défaillance est donc atteint avant de la réalisation de la première inspection programmée. Pour éviter cela, on peut décider de programmer plus tôt la première inspection. Mais cette décision est extérieure aux prévisions réalisées et occasionne des contrôles plus fréquents donc une maintenance préventive coûteuse [58].

Le phénomène de vieillissement oblige à effectuer un remplacement systématique. La période de remplacement sera déterminée de telle manière que le taux de défaillance du au vieillissement ne fasse pas augmenter de manière importante le taux de défaillance de la période de vie utile. Durant le vieillissement le taux de défaillance augmente avec la durée totale d'utilisation du matériel.

Les phénomènes de vieillissement évoluent en général lentement et sont accompagnés des signes précurseurs. Cette période est caractéristique des phénomènes d'usure, de corrosion et de fatigue. La maintenance conditionnelle sera choisie pour un équipement dont le taux de défaillance augmente dans le temps et pour lequel les symptômes de dégradation sont observables.

La maintenance systématique sera utilisée en période d'usure dans les deux cas suivants :

- ou on ne sait pas encore observer ou détecter les symptômes d'usure
- la durée de vie moyenne est bien connue, et présente une dispersion faible.

L'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité vise à détecter les anomalies latentes sur les matériels par des actions d'entretien dont la périodicité est déterminée en fonction d'un critère d'optimisation.

### III.2.2.1. Estimation du nombre d'interventions durant l'intervalle du temps [0,T] :

D'après la loi de Poisson en prenant la variable aléatoire  $h$  comme nombre de défaillances dans l'intervalle du temps [0,T] on présente la probabilité d'avoir  $h$  défaillances [7] dans l'intervalle [0,T] :

$$P(T, h) = \frac{\alpha^h}{h!} e^{-\alpha} \quad (\text{III.19})$$

Ou

$\alpha$  : Espérance mathématique du nombre de défaillance dans l'intervalle [0,T]

$$\alpha = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (\text{III.20})$$

Avec  $\lambda(t)$  : Taux instantané de défaillance

Pour un matériel composé essentiellement de  $m$  composants dont les taux de défaillances progressent linéairement, on a :

$$\lambda_i(t) = \lambda_i + k_i t \quad ; \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{III.21})$$

$\lambda_i$  : Taux de défaillance initial du  $i^{\text{eme}}$  composant du matériel

$k_i$  : Coefficient de proportionnalité

Le taux de défaillance global, en considérant les composants en série du point de vue fiabilité est déterminé par l'expression suivante :

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \sum_1^m k_i t \quad (\text{III.22})$$

Avec  $\lambda_0 = \sum_1^m \lambda_i$

On considère qu'après chaque réparation planifiée au niveau du sous ensemble  $i$ , son taux de défaillance prend sa valeur initiale  $\lambda_i$  l'espérance mathématique du nombre de défaillances dans l'intervalle  $[0, T]$  s'écrit comme suit :

$$\alpha = \lambda_0 T + \sum_1^m \frac{k_i T^2}{2} \quad (\text{III.23})$$

### III.2.2.2. Fonction objectif

On considère les périodicités et la structure des interventions planifiées en maintenance sur un intervalle de temps  $[0, T]$ . Les périodes planifiées sont désignées par  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ , et  $\Delta_{m-1}$  pour un matériel dont  $m$  composants exigent une maintenance systématique préalablement planifiée aux moments  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$  on peut écrire les relations suivantes :

$$t_2 = t_1 + i\Delta_1$$

$$t_3 = t_1 + i\Delta_1 + j\Delta_2$$

$$t_m = t_1 + i\Delta_1 + j\Delta_2 + \dots + p\Delta_{m-1} \quad (\text{III.24})$$

Ou

$i, j, \dots, p$  : nombres d'interventions planifiés appliqués consécutivement sur les sous-ensembles 2 et  $m$  pendant le temps  $t_m$ .

Dans ce cas l'expression du taux de défaillance peut être présentée de la façon suivante :

$$\lambda(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m) = \lambda(t_1, i, j, \dots, p)$$

Désignons par  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$  les quantités de périodes du temps dont les durées sont respectivement  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_m$  étalées pendant la période  $[0, T]$  tel que :

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{\Delta_3}{\Delta_1}; & n_2 &= \frac{\Delta_3}{\Delta_2} \\ n_3 &= \frac{\Delta_4}{\Delta_3}; & n_m &= \frac{T}{\Delta_{m-1}} \end{aligned} \quad (III.25)$$

Les relations entre la quantité de périodes de temps de durées  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_m$  et la quantité des interventions planifiés sur la période  $[0, T]$  sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} n_{p1} &= (n_1 - 1) \prod_2^m n_i \\ n_{p2} &= (n_2 - 1) \prod_3^m n_i \\ n_{p3} &= (n_3 - 1) \prod_4^m n_i \\ n_{pm} &= (n_m - 1) \end{aligned} \quad (III.26)$$

En tenant compte des expressions (III.24) ; (III.25) et (III.26), la relation (III.23) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} a(t_1, n_1, n_2, n_3, \dots, n_m) &= n_m \sum_{p=0}^{n_m-1} \dots \sum_{j=0}^{n_2-1} \sum_{i=0}^{n_1-1} \int_0^{\Delta_1} [\lambda_0 + k_1 t_1 + k_2 (i \Delta_1 + t_1) + k_3 (i \Delta_1 + j \Delta_2 + t_1) + \dots \\ &+ k_m (i \Delta_1 + j \Delta_2 + \dots + p \Delta_{m-1} + t_1)] dt_1 \end{aligned} \quad (III.27)$$

Le moment de la réalisation des interventions planifiées (i) correspond à des chutes des taux de défaillances correspondantes à leurs valeurs initiales  $\lambda_i$  et le taux de défaillance se réduit jusqu'à la valeur  $\lambda_0$  seulement lors de la réalisation de la révision générale

L'aire de la courbe  $\lambda(t_1, t_2, \dots, p)$  et l'axe des abscisses correspond à l'espérance mathématique des nombres de défaillance ; et dans le cas limite, lors de la réalisation d'un nombre non limité de réparation ; l'espérance mathématique du nombre de défaillance tend vers la valeur  $\lambda_0 T$ .

Après quelques transformations, le résultat de l'intégration de l'expression (III.27) est présenté sous la forme suivante :

$$a(T, n_1, n_2, n_3, \dots, n_m) = \lambda_0 T + \frac{k_1 T^2}{2n_1 n_2 n_3 \dots n_m} + \frac{k_2 T^2}{2n_2 n_3 \dots n_m} + \frac{k_3 T^2}{2n_3 \dots n_m} + \dots + \frac{k_m T^2}{2n_m} \quad (III.28)$$

Notons que l'expression (III.28) correspond au cas où le temps est à l'origine de l'échelle ; au début de la période de calcul de durée  $[0, T]$ , c'est-à-dire après la réalisation de la révision générale ,y compris toutes les opérations courantes. C'est pourquoi en posant  $n_{p1} = 0$ ,  $n_{p2} = 0$ ,  $n_{p3} = 0 \dots$  et  $n_{pm} = 1$ , on détermine la valeur de l'espérance mathématique du nombre de défaillance pour le cas où les travaux de réparations prophylactiques ne sont pas réalisés pendant l'intervalle du temps  $[0, T]$ ,.

La structure et la périodicité du planning des interventions préventives sont déterminées en utilisant comme critère d'optimisation, les dépenses des réparations planifiées et non planifiées durant la période de calcul de durée  $T$  et en prenant en compte la relation (III.28), la fonction des coûts à optimiser (fonction objectif) aura la forme suivante :

$$S = \left( C_A \lambda_0 T + C_{A1} \frac{k_1 T^2}{2n_1 n_2 n_3 \dots n_m} + C_{A2} \frac{k_2 T^2}{2n_2 n_3 \dots n_m} + C_{A3} \frac{k_3 T^2}{2n_3 \dots n_m} + \dots + C_{Am} \frac{k_m T^2}{2n_m} \right) + C_1 (n_1 - 1) n_2 n_3 \dots n_m + C_2 (n_2 - 1) n_3 \dots n_m + C_3 (n_3 - 1) n_4 \dots n_m + \dots + C_m (n_m - 1) \quad (III.29)$$

$S$ : coût sommaire de maintenance

$C_{Ai}$  : coût d'une réparation non planifiée du  $i^{eme}$  composant.

$C_i$  : coût d'une réparation planifiée du  $i^{eme}$  composant.

Ainsi dans notre étude l'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité des équipements, consiste à optimiser la fonction objectif (III.29) ; c'est-à-dire déterminer la combinaison  $(n_1, n_2, n_3, \dots, n_m)$  qui donne le coût minimale de maintenance :

$$\min S = C_A \lambda_0 T + \sum_{i=1}^m [C_{Ai} \frac{k_i T^2}{2 \prod_{j=i}^m n_j} + C_i (n_i - 1) \prod_{j=i+1}^m n_j] \quad (III.30)$$

### III.3. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle (mis à part le coût de sa mise en œuvre) est l'unique forme préventive dont les décisions se basent sur l'état réel du matériel à maintenir. Les techniques de surveillances (détection et localisation des défaillances) dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle sont en évolution, et demeure l'analyse vibratoire occuper une large partie de l'art [83]. Un signal vibratoire délivré par un capteur, est représenté en fonction du temps (représentation temporelle). Cette représentation est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement [9].

Le spectre d'un signal vibratoire (figure III.2), est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine [9]. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée l'amplitude. Notons que dans certains cas, il peut être représenté par des pics.

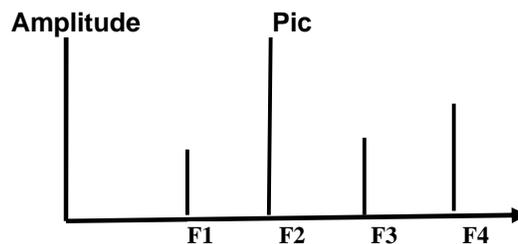


Figure III.2 : Exemple d'un spectre

Les spectres issus de signaux vibratoires réels sont très riches en raison du grand nombre de sources vibratoires présentes dans une machine. Par suite, les informations intéressantes dans le spectre ne correspondent pas forcément aux fréquences présentant des maxima d'amplitude. Des raies spectrales d'amplitude faibles au regard des autres peuvent être d'un intérêt de premier plan pour le diagnostic. Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une échelle logarithmique des amplitudes du signal. Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes [83].

### III.3.1. Représentation d'un signal par la méthode de Fourier

Si  $x(t)$  est une fonction du temps  $t$ , absolument intégrable sur  $(-\infty, +\infty)$  la transformée de Fourier de ce signal est définie comme suit:

$$X(\omega) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{III.31})$$

Cette transformée est inversible par:

$$x(t) = F^{-1}[X(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{III.32})$$

En appliquant cette transformée à une fonction, on passe du domaine temporel au domaine des fréquences, comme il est montré sur la (figure III.3). L'énergie est conservée, l'énergie de la représentation fréquentielle est égale à l'énergie de la représentation temporelle [5].

On a  $x(t)$  tend vers le zéro lorsque  $t$  tend vers l'infinie. Souvent en traitement de signal  $x(t)$  est échantillonné pour des raisons pratiques. Autrement dit qu'on se disposant d'un ensemble fini de valeur du signal  $x(t)$  est obtenue en discrétisant la formule (III.32), soit :

$$x(f_k) = \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} x(t_i) e^{-2j\pi f_k t_i}, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (\text{III.33})$$

$x(f_k)$  est donc une approximation de  $x(t)$  aux points  $f_k$ . La densité spectrale de puissance est définie comme étant le module carré de la transformée de Fourier du signal  $x(t)$ .

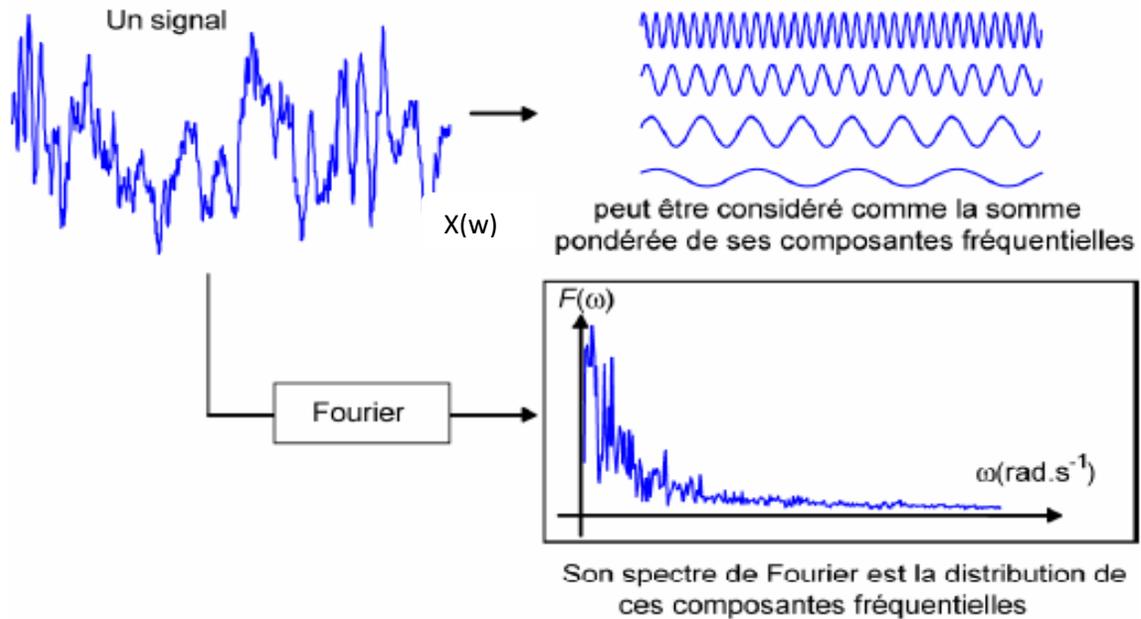


Figure III.3: Un signal et son spectre de Fourier

### III.3.2. Estimation de la densité spectrale par la méthode de PRONY

La méthode proposée par PRONY constitue une somme de  $p$  exponentielle afin que le modèle s'approche à une suite  $x(n)$  qui est donnée par [10]:

$$x(n) = s(n) = \sum_{m=1}^p B_m z_m^n \quad (\text{III.34})$$

Dans ce modèle, les exponentielles  $Z_n$  notées 'pôles' du modèle sont porteuses de quatre types d'information familière en traitement du signal et en modélisation du système :

$$B_m = A_m e^{j\phi_m} \quad \text{et} \quad Z_m = e^{j(am + 2\pi f_m)\Delta t}$$

Où  $A_m$ ,  $\phi_m$ ;  $\Delta t$  sont respectivement l'amplitude, la phase et le pas d'échantillonnage. Pour l'estimation des coefficients du polynôme et l'ordre du modèle, on utilise un des algorithmes d'estimation des paramètres AR. Dans notre travail, nous avons utilisé l'algorithme de moindres carrés récursifs. Pour déterminer les fréquences et les coefficients d'amortissement on utilise les équations suivantes :

$$a_m = \frac{\ln |Z_m|}{\Delta t} \quad (III.35)$$

$$f_m = tg^{-1} \left( \frac{\text{Im}(Z_m) / \text{Re}(Z_m)}{2\pi\Delta t} \right)$$

La détermination des amplitudes et des phases se fait par l'équation suivante :

$$B = [\phi^H \phi]^{-1} \phi^H X \quad (III.36)$$

La fonction d'approximation devient alors :

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i \exp(\alpha_i i \Delta t) \exp[j(2\pi f_i i \Delta t + \phi_i)] \quad (III.37)$$

La densité spectrale de puissance [15] par le modèle de Prony est alors donnée par :

$$\begin{cases} S_{prony} = |\hat{x}(f)| \\ \hat{x}(f) = \sum_{i=1}^p A_i \exp(j\Phi_i) \frac{2\alpha_i}{\alpha_i^2 + [2\pi(f-f_i)]^2} \end{cases} \quad (III.38)$$

### III.3.3. Estimation des fréquences à partir des paramètres AR

Lorsqu'on désire avoir des informations sur le contenu spectral du signal (DSP, recherche de fréquences,...), la modélisation n'est qu'une première étape : une deuxième étape est nécessaire pour accéder aux informations spectrales. Supposons qu'à partir de points du signal,

on ait estimé des paramètres AR  $\left\{ \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_p \right\}$  et la variance du bruit d'entrée  $\hat{\sigma}^2$ . On peut

alors estimer la densité spectrale de puissance du signal par :

$$\hat{S}_x(f) = \frac{\hat{\sigma}^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p \hat{a}_k e^{-j2\pi kf} \right|^2} \quad (\text{III.39})$$

On a ainsi accès à une écriture paramétrique du spectre, où n'apparaît plus directement le signal, comme c'est le cas pour la Transformée de Fourier [10].

La modélisation paramétrique de signaux constitue un moyen très utilisé de représentation fine, à un niveau de synthèse et après analyse préalable, soit les phénomènes physiques ayant donné naissance à un signal soit les mécanismes de production de ce signal (par exemple filtrage, modulation, etc.). Elle permet de traduire, avec un nombre fini -généralement faible de paramètres les principales caractéristiques du signal [5].

Elle possède donc l'avantage principal de réduire l'espace de représentation, en général, de diminuer la charge calculatoire associée au traitement du signal. Il convient de noter qu'une telle approche n'est envisageable que lorsqu'on possède de nombreuses informations a priori sur le signal. Par conséquent, l'opérateur doit tenir compte de la validité des hypothèses émises car celles-ci conditionnent la performance mais aussi la robustesse d'estimation.

#### III.4. Conclusion

L'étude de la transformée de Fourier, et la représentation de Prony était prise comme une préparation des outils de base pour l'analyse spectrale, dans le but de son application dans la partie suivante de ce travail de thèse ; en commençant l'application d'abord aux cas de signaux déterministes continus ; et par la suite, la théorie sera étendue à des processus aléatoires stationnaires, échantillonnés dont les propriétés sont parfaitement connues et enfin, des algorithmes rapides vont être élaborés pour rendre le diagnostic du système industriel étudié particulièrement intéressant.

Entre le bon état et le dysfonctionnement d'un système, il existe un état dans lequel peut fonctionner, comme il peut à n'importe quel instant provoquer une intervention non programmée dont le coût est souvent trop élevé. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une approche de détermination de la périodicité optimale de la réparation par une modélisation probabiliste basée sur les paramètres qui définissent l'état de dégradation des systèmes considérés.

A la fin ; on a contribué à résoudre un problème de maintenance des équipements à la troisième tranche d'âge dont le planning des interventions préventives de base commence à ne pas satisfaire les exigences de leurs états de vieillesse. Pour le faire, on a développé un modèle mathématique décrivant le coût de maintenance basée sur la linéarisation des taux de défaillances des composants du matériel considéré.

# CHAPITRE IV

## RESULTATS D'APPLICATION ET INTERPRETATIONS

---

L'objectif de ce chapitre est l'illustration des résultats concernant la détection des défauts basée sur l'analyse spectrale d'une part et d'autre part la détermination de la périodicité optimale de la réparation, pour l'élaboration du choix de la stratégie de maintenance pour des applications industrielles dans le domaine des hydrocarbures. L'application des méthodes d'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité permet de conserver le plus longtemps possible les performances des équipements au moindre coût.

## IV.1. Introduction

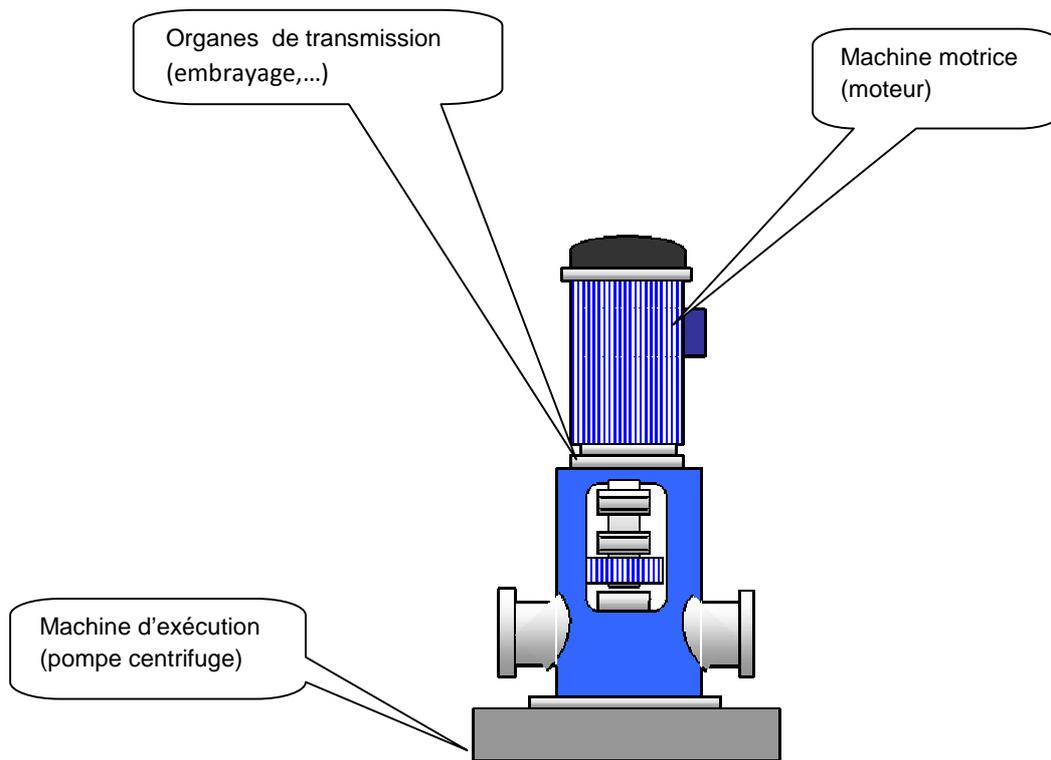
La surveillance et le diagnostic des endommagements dans les machines dynamiques constituent un domaine d'intérêt grandissant dans l'industrie des hydrocarbures. L'analyse spectrale est l'outil majeur pour l'étude des signaux vibratoires des machines dynamiques. Dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle, beaucoup de problèmes liés à la détection des défauts sur les organes de machines peuvent être résolus par les techniques classiques fondées sur l'analyse spectrale par la représentation de Fourier. Néanmoins, il existe des cas où l'analyse fait allusion aux signaux comportant des non stationnaires locales (cas des pompes par exemple), la transformée de fourrier n'est pas adaptée à de telles situations car elle met en évidence les non stationnarités locales qui sont généralement brèves sur ce type de signaux [21].

Dans la première partie de ce chapitre, nous donnons les résultats des signaux physiques relevés d'une pompe centrifuge et qui ont été traités par la méthode de Prony. Dans sa seconde partie, on donne les résultats relatifs à la détermination de la périodicité optimale de la réparation d'un palier d'un turbocompresseur par la modélisation probabiliste à partir de ses paramètres d'état qui définissent sa dégradation. En effet, les équipements des stations de compression du gaz naturel sont perturbés tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements ; surtout pendant la vieillesse ; ce qui affectent leurs coûts d'exploitation et leurs disponibilités. Dans ce contexte les effets de ces perturbations peuvent être limités par la mise en œuvre d'un planning des actions de maintenance à partir des résultats d'un modèle mathématique du coût basée sur la linéarisation des taux de défaillances des composants vitales du compresseur centrifuge considéré, dont l'objectif vise à limiter son indisponibilité, tout en maîtrisant les coûts. Dans les différents secteurs des hydrocarbures, là où sont mises en exploitation des stations de compressions du gaz naturel, le problème de recherche de méthodes permettant d'optimiser les coûts d'exploitation et de maintenance est d'actualité.

## IV.2. Description de la pompe centrifuge étudiée

La pompe étudiée est sous le tag- nombre 425/6205-G, elle est composée de :

- **Machine motrice:** un moteur électrique alimenté par une tension de 5.5KV, qui assure l'énergie mécanique nécessaire pour faire tourner la pompe.
- **Organes de transmission:** pour transférer l'énergie: (embrayage, courroies, engrenage)
- **Machines d'exécution:** une pompe centrifuge avec son puits.



**Figure IV.1 les composants de la machines tournante**

La commande de démarrage et d'arrêt de la pompe est géré par le DCS (distributed control system), la pompe est munie d'un ensemble d'instruments de sécurité, on cite :

- Capteur de température palier pompe
- Capteurs de température paliers moteur amont et aval.
- Capteurs de température (thermistances) des bobinages du moteur.

Ces instruments sont reliés à un automate de gestion de sécurité des installations, qui s'appelle système ESD (emergency shut-down).

La prise des mesures de vibration de la pompe se fait offline, des mesures sont prise périodiquement en utilisant un appareil spécifique VIBXpert, cet appareil est muni d'un capteur de vibration piézo-électrique. Le traitement des données se fait par une application OMNITREND. (Annexe)

### VI.2.1. Rôle de la machine dans le complexe

La machine étudiée dans cette thèse est une pompe de type centrifuge verticale, cette pompe est l'une d'une batterie de trois pompes qui s'appellent « les pompes de charge » servent à aspirer le GPL stocké dans les sphères de stockage tampon à une pression de 8bars et le refouler vers l'unité du traitement à une pression de 20bars.

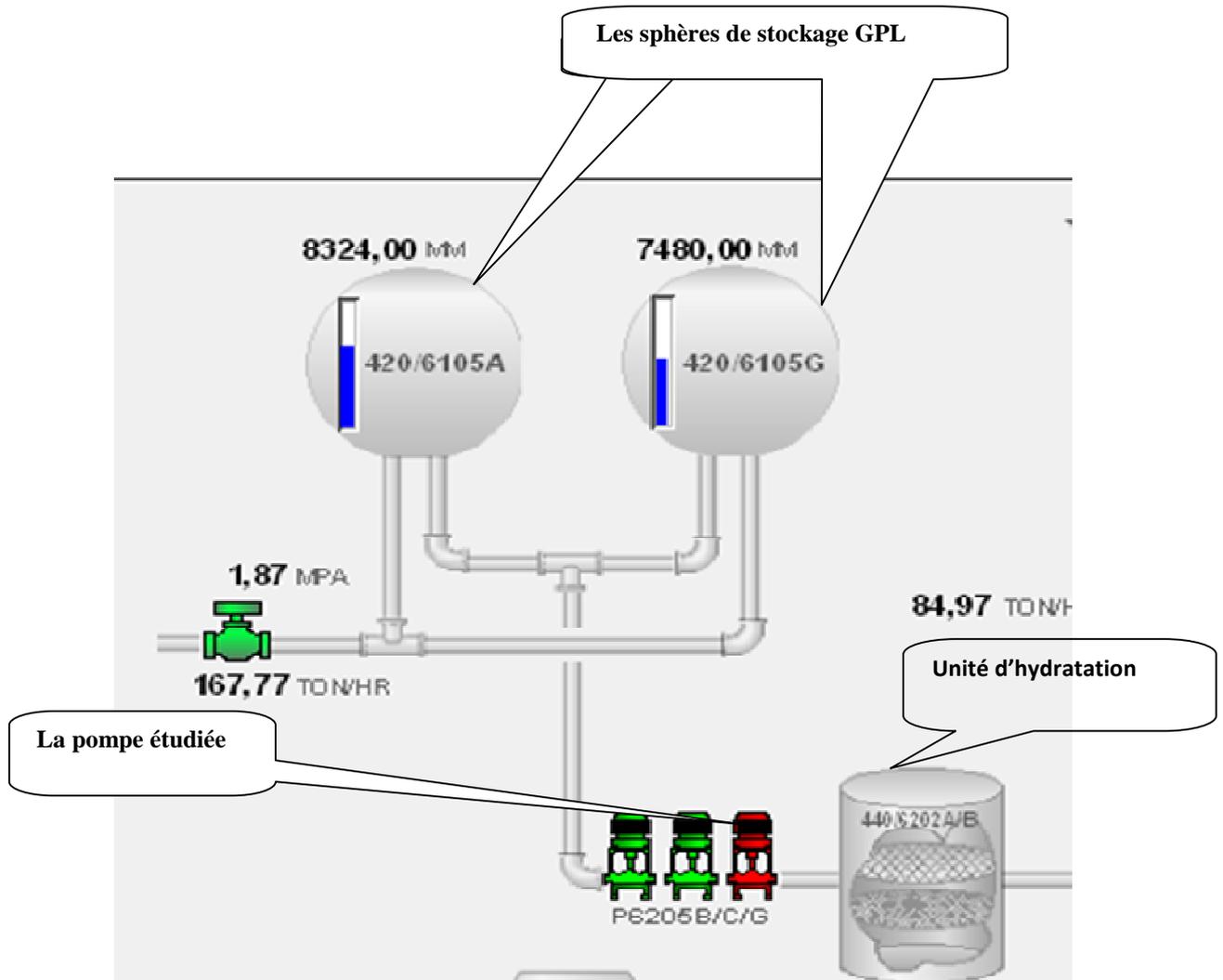
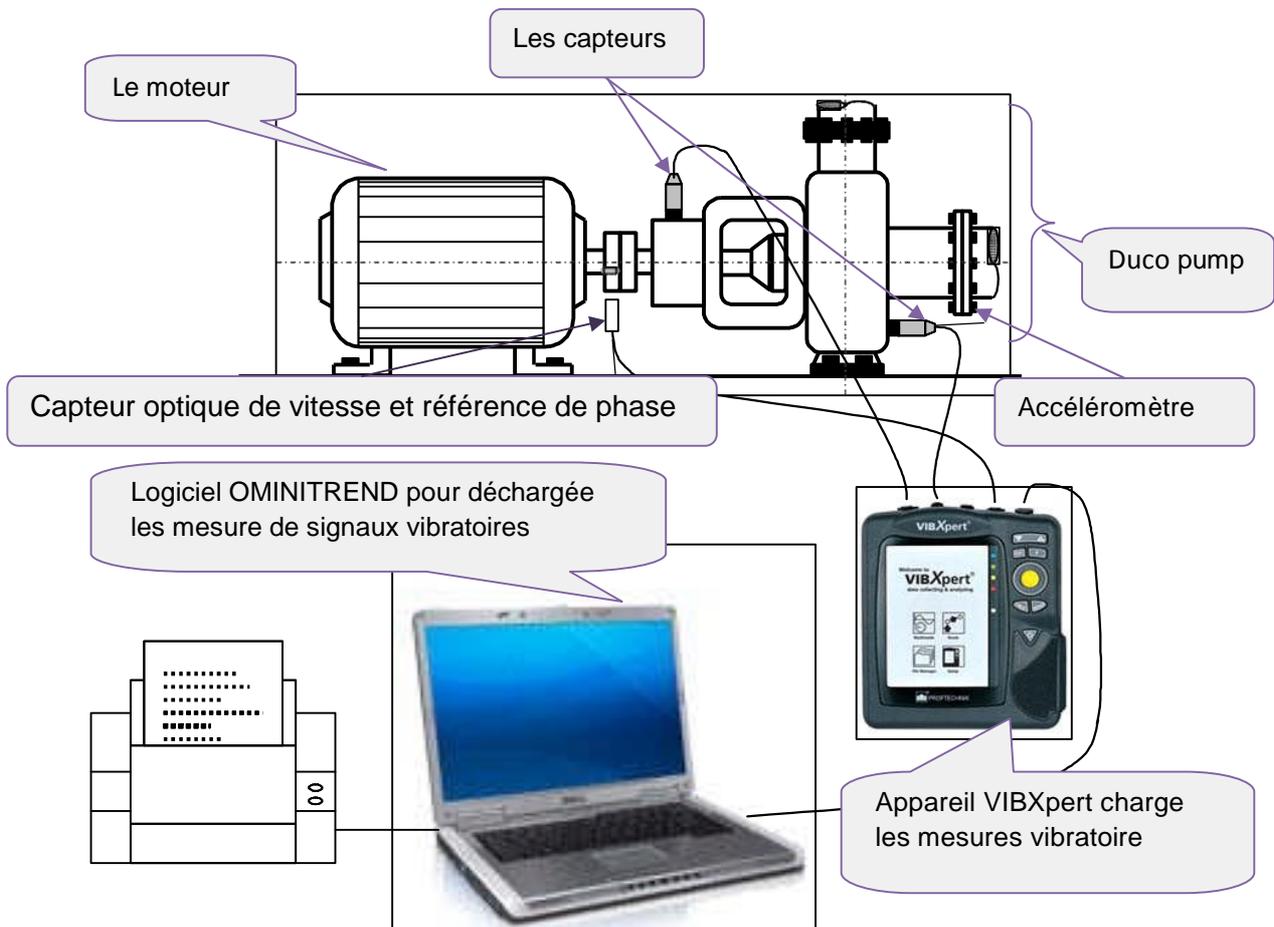


Figure IV.2 : Position de la pompe dans le procédé

### VI.2.2. Analyseur VIBXpert dans le logiciel OMNITREND de la pompe étudiée

Le signal est reçu par un capteur optique de vitesse et référence de phase qui est placé sur les paliers de la pompe. Un enregistrement des signaux vibratoires émis par ce système a été effectué tous les jours durant 12 jours dont les mesures étaient prises quotidiennement d'une façon régulière.



**Figure IV.3 : analyseur VIBXpert des vibrations avec logiciel OMNITREND appliquée sur la pompe étudiée**

Chaque enregistrement contient 4069 échantillons par jour avec une fréquence d'échantillonnage de 40Khz, et le traitement se fait pour 800 échantillons.

### VI.2.3. Analyse des signaux vibratoires de la pompe

Après l'utilisation de l'appareil VIBXpert pour charger les données de vibrations de la pompe centrifuge étudiée dans le logiciel OMNITREND, afin qu'on puisse pondre les signaux en domaine temporel sur un tableau xlsx ; ces mesures temporelles sont traitées par un programme pour illustrer quelques définitions d'analyse spectrale.

Ce programme permet d'étudier et d'analyser des signaux de vibration. Ses objectifs sont orientés vers l'analyse spectrale par la méthode paramétrique, celle de décomposition harmonique, et les méthodes autorégressives. La méthode qu'on a choisi est celle du Prony.

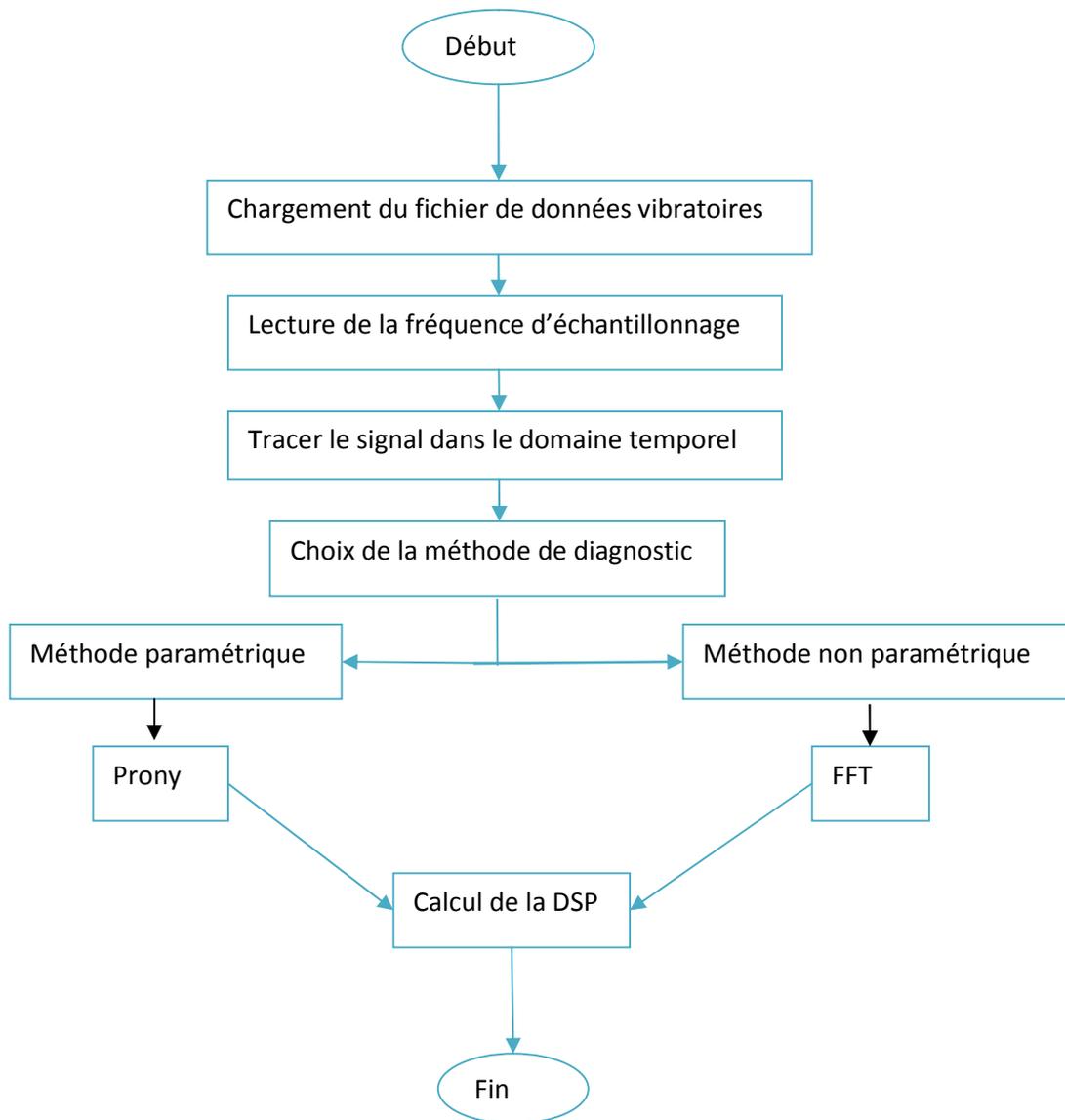


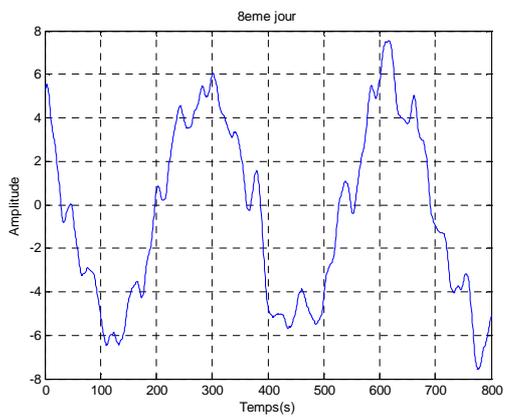
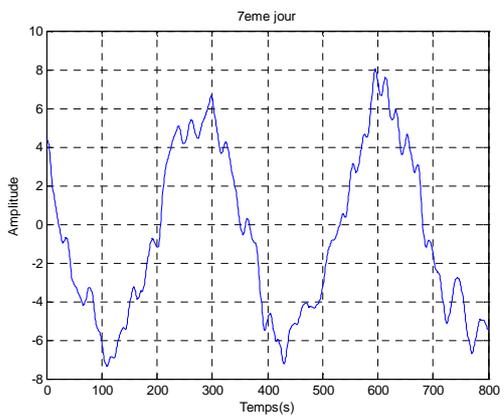
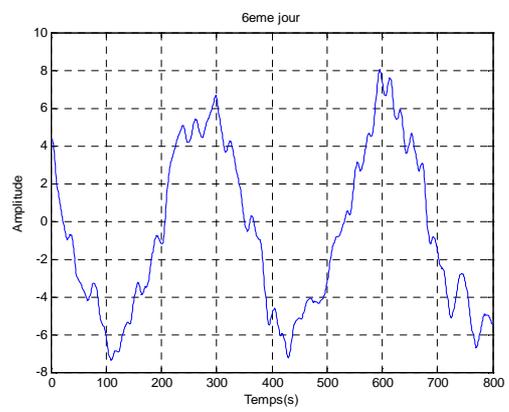
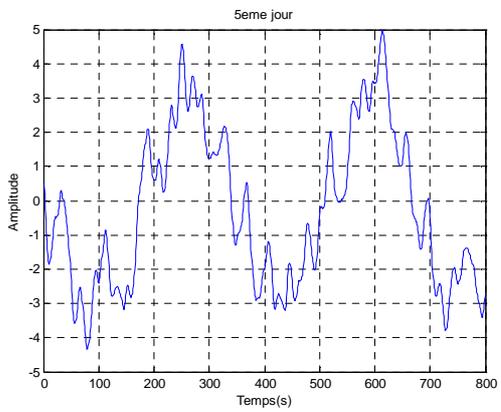
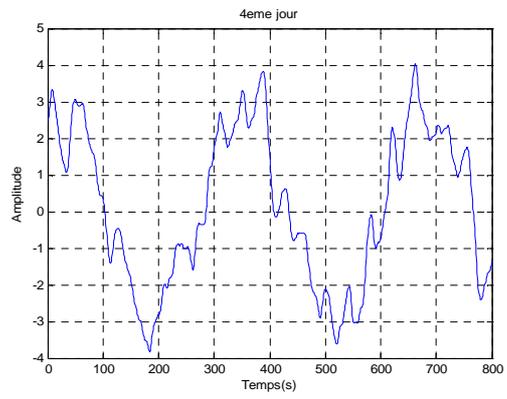
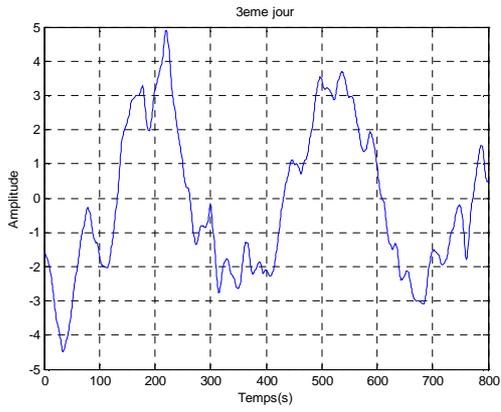
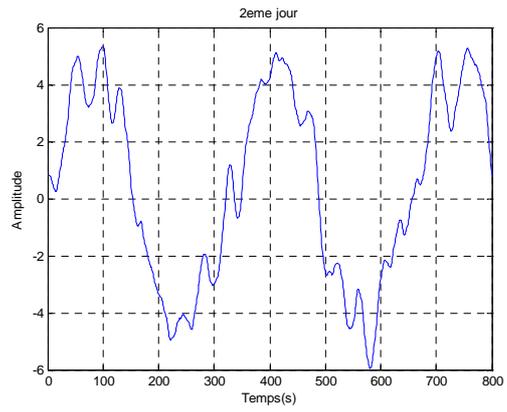
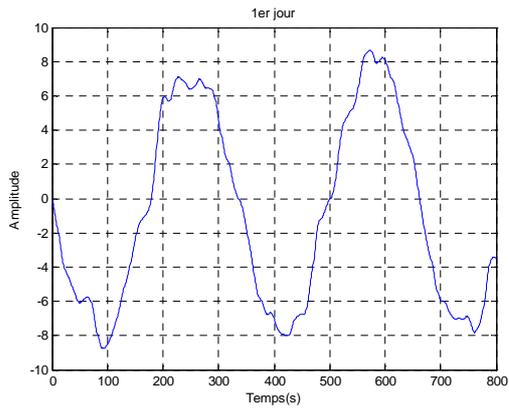
Figure IV.4 : Organigramme de simulation

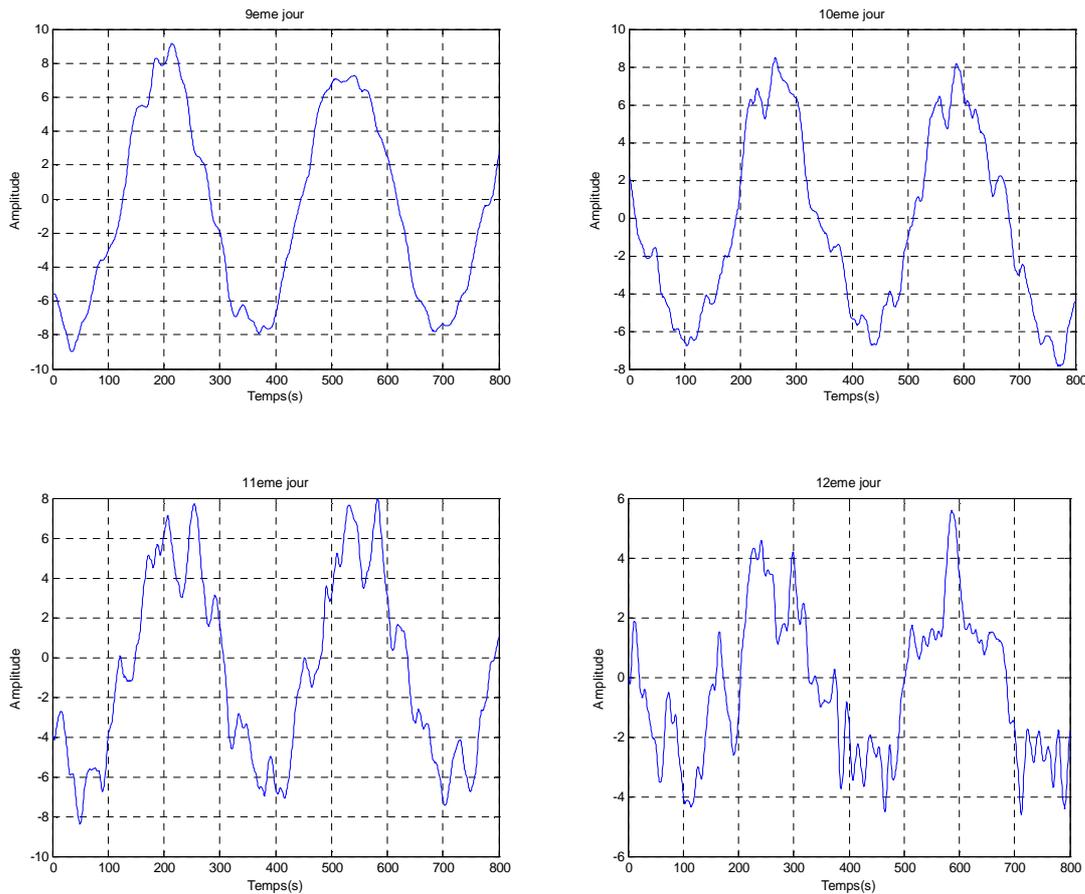
### IV.3. Résultats et interprétations

Dans cette étape, nous allons présenter les résultats des travaux effectués en commençant par le volet conditionnel.

#### IV.3.1. Résultats des tests temporels des signaux émis par le système considéré

Les résultats du phénomène physique émis par la pompe étudiée, enregistrés régulièrement pendant 12 jours sont présentés sur la (figure IV.5).





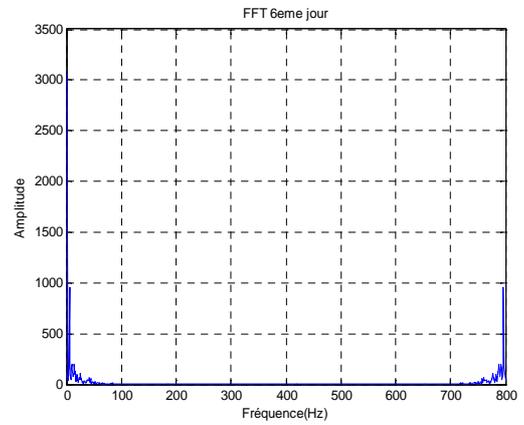
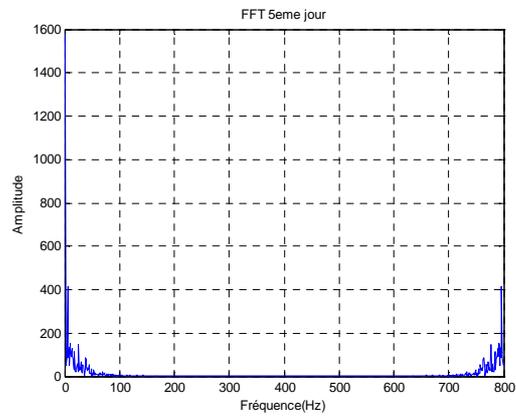
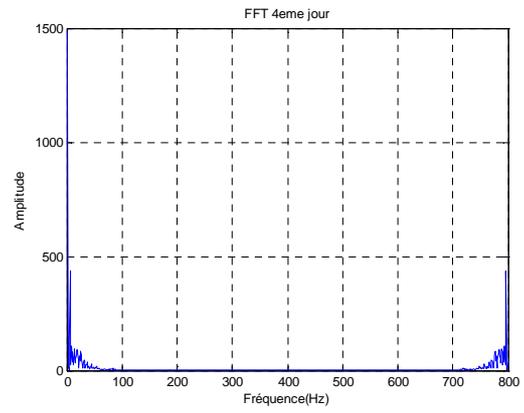
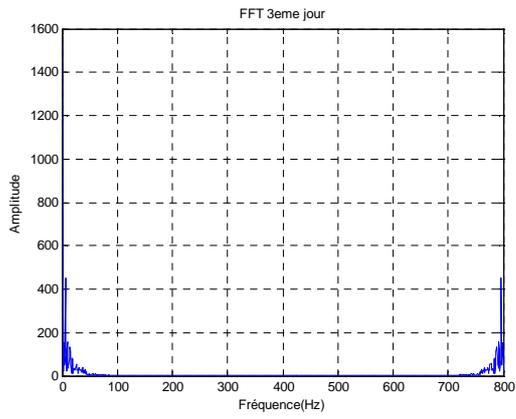
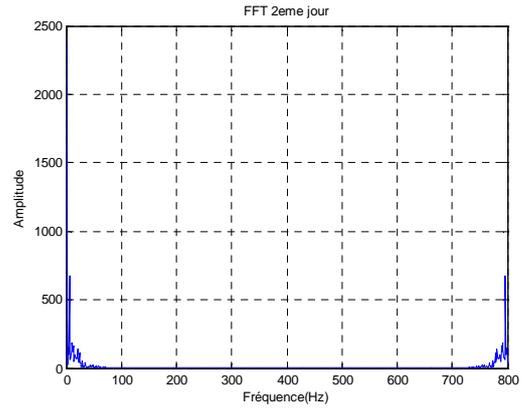
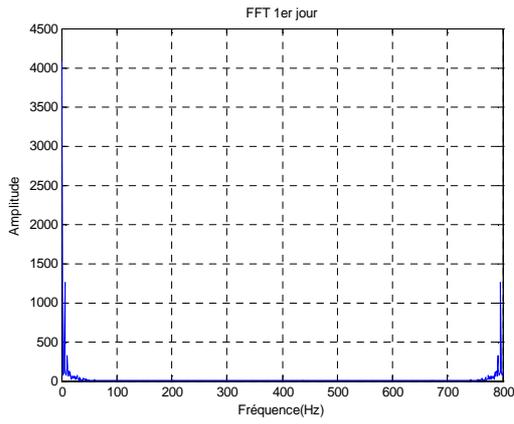
**Figure IV.5 : signal émis par le système étudié**

Nous remarquons que les graphes conservent une étape normale jusqu'au deuxième jour. Ces présentations ne peuvent pas s'accompagner avec des interprétations surtout avec la non disponibilité des spectres de seuils limites dans l'unité où, on a pré des mesures.

#### **IV.3.1.2. Présentation du spectre de puissance des signaux émis par le système étudié par la méthode de FFT**

Les spectres du phénomène physique émis par la pompe étudiée, enregistrés régulièrement pendant 12 jours ; développés par la méthode FFT sont présentés sur la (figure IV.6).

On remarque d'après la (figure IV.6), la présence d'un changement relativement faible du spectre du premier au cinquième jour ; une présence de fluctuation autour du pic principal situé à la fréquence de segmentation de son amplitude relative. A partir de ce jour on remarque que le graphe se stabilise jusqu'au dixième jour, la présence de fluctuation autour du pic principale situé à la fréquence de segmentation de son amplitude relative.



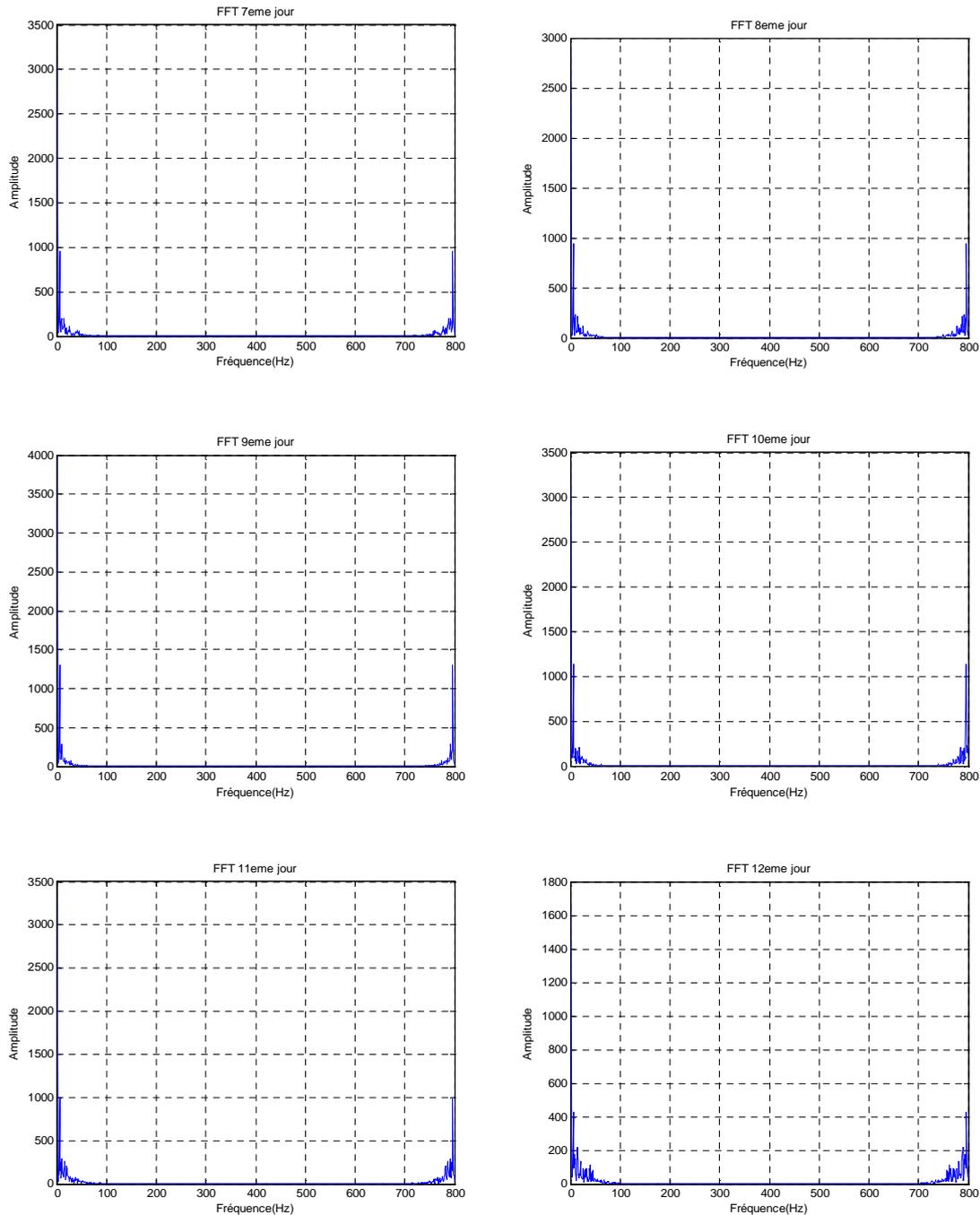
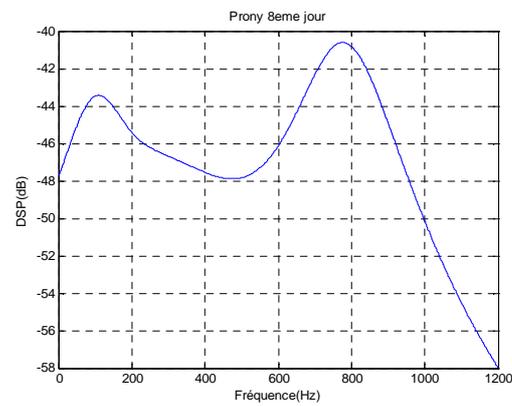
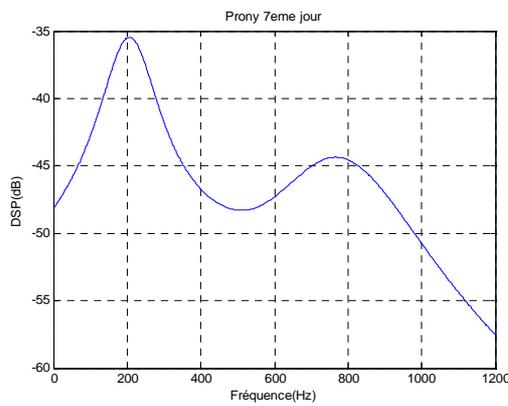
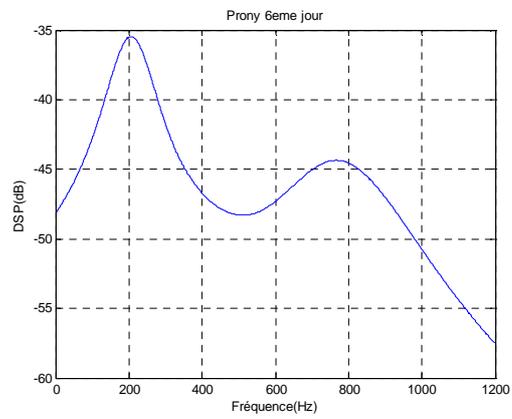
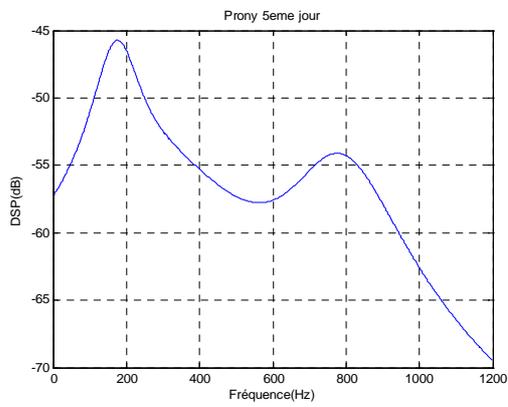
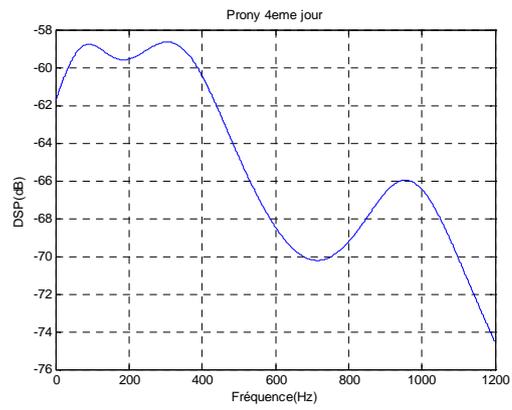
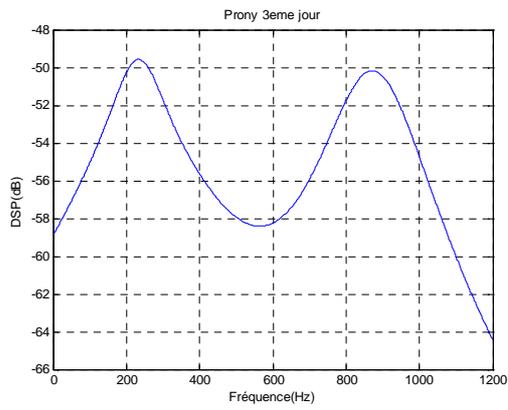
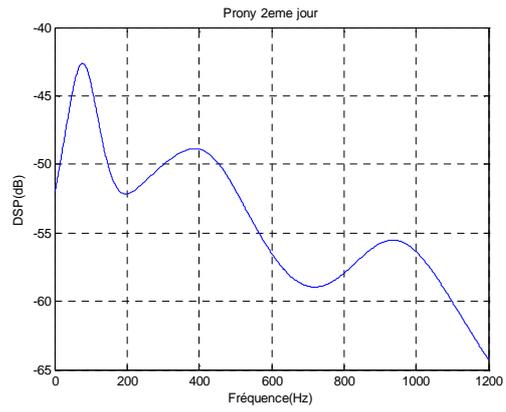
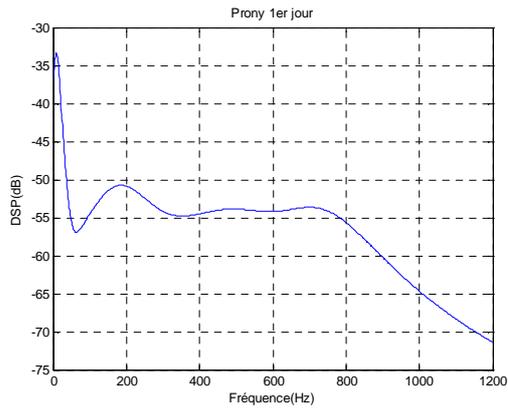
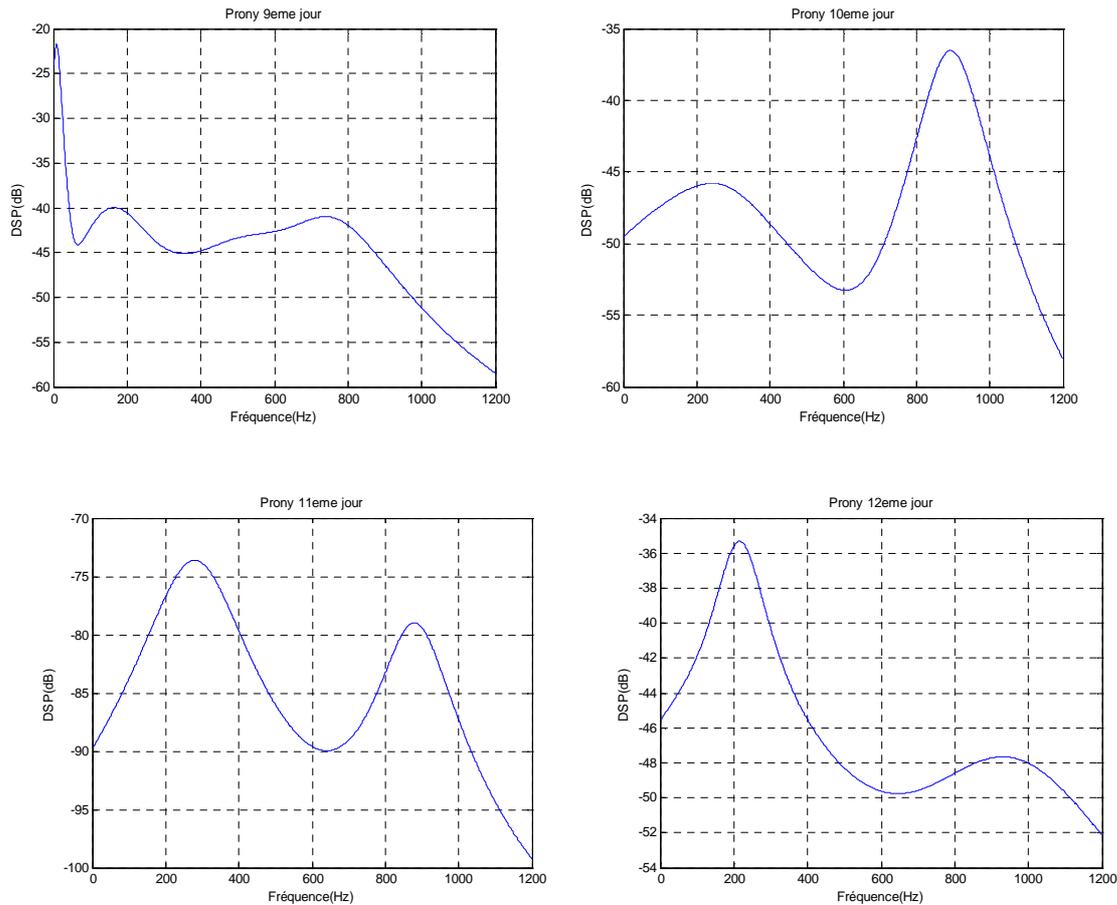


Figure IV.6 : spectres obtenu par la méthode de FFT

#### IV.3.1.3. Présentation du spectre de puissance des signaux émis par le système étudié par la méthode de Prony

Les spectres du phénomène physique émis par la pompe étudiée, enregistrés régulièrement pendant 12 jours ; développés par la méthode de Prony sont présentés sur la (figure IV.7).





**Figure IV.7 : spectres obtenu par la méthode de Prony**

La (figure IV.7) représente les spectres des vibrations de la pompe par la méthode de Prony, les spectres de puissance représentent deux pics qui correspondent aux fréquences multipliées de la fréquence d'excitation. A partir du troisième jour nous constatons un déplacement du pic1 et du pic2, et une augmentation de l'amplitude relative du pic 1 au quatrième jour. Dans cette partie de ce dernier chapitre de thèse, nous avons ainsi montré que cette méthode permet une estimation non biaisée des fréquences d'un signal en présence de bruit dans un environnement stationnaire ou non stationnaire et que les algorithmes sont suffisamment rapides pour traquer avec précision l'évolution de ceux-ci dans le temps.

#### **IV. 3.2. Détermination de la périodicité d'intervention systématique optimale selon l'état du matériel**

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on considère la ligne d'arbre d'un turbocompresseur dont les surfaces de frottement au niveau du couple arbre palier, sont séparées par une couche continue de lubrifiant [43].

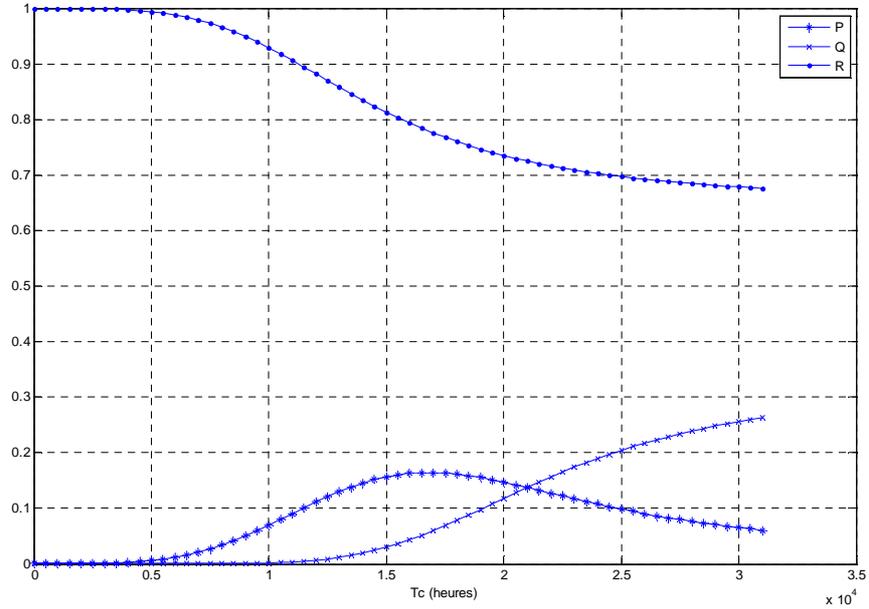
| Jour                    | 01  | 02  | 03  | 04  | 05  | 06  | 07  | 08  | 09  | 10  | 11  | 12  |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Amplitude maximale pic1 | -33 | -43 | -49 | -59 | -47 | -37 | -36 | -43 | -23 | -47 | -73 | -35 |
| Fréquence du pic1       | 10  | 80  | 220 | 300 | 190 | 200 | 200 | 100 | 10  | 210 | 275 | 220 |
| Amplitude maximale pic2 | -51 | -48 | -50 | -59 | -54 | -44 | -44 | -41 | -40 | -38 | -78 | -47 |
| Fréquence du pic2       | 190 | 400 | 850 | 900 | 790 | 800 | 790 | 795 | 190 | 900 | 900 | 950 |

**Tableau IV.1 : évolution du pic principal**

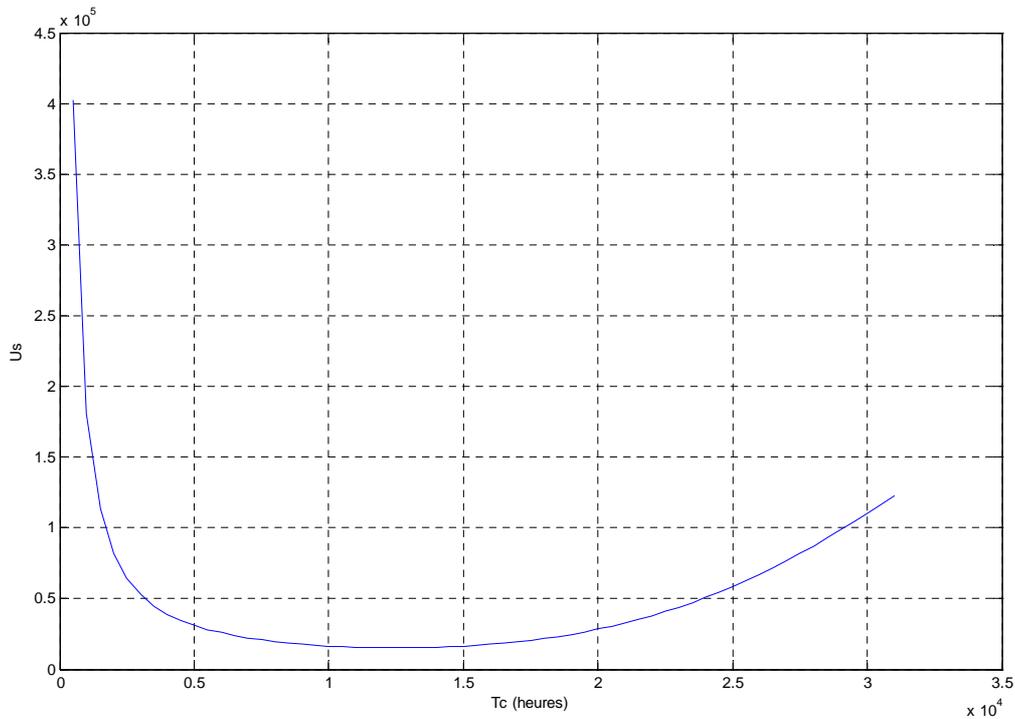
Lorsque les conditions de montage, de fonctionnement et de lubrification sont satisfaisantes, la durée de vie d'un palier dépend principalement de la résistance à la fatigue, et de l'action des surfaces en contact [39]. Juste après la réparation le contact entre l'arbre et le palier n'est pas intégral et après un certain temps de fonctionnement les rugosités des surfaces ajustées s'émoussent et la surface de frottement se modifie. En même temps les côtes des pièces varient de manière aléatoire dans le temps [21].

En comparant à leurs valeurs nominales les résultats de mesure des cotes des paliers portants usées (mises hors services après 12000 heures de travail) et neuves obtenus à l'aide d'un micromètre, réalisés sur un échantillon de pièces, on obtient les distributions empiriques d'une certaine variable aléatoire  $X$  qu'on considère comme paramètre d'état de la pièce considérée. Pour les paliers portant des turbocompresseurs, le traitement des résultats de mesures des usures obtenues au moment initial ( $t = 0$ ) forment un échantillon de valeurs de la variable  $X$ , on montre que la variable d'état  $X$  suit une loi normale de paramètre  $E_{x,0} = 0.18$  mm ,  $S_{x,0} = 0.025$  mm. En se basant sur les résultats de mesure des usures correspondants à 12000 heures de fonctionnement de 20 turbocompresseurs exploités dans des conditions identiques on a déterminé les valeurs  $\alpha_E = 0.00000028$  mm/h et

$\alpha_s = 0.00000035$  mm/h qui sont utilisées dans les expressions (III.1) et (III.2) ; d'autre part les valeurs des seuils de réparation et d'exploitation sont :  $x_r = 0.3$  mm ,  $x_e = 0.38$  mm et  $\lambda_c = 0.38$ . Les résultats de calcul sont présentés sur la (figure IV.8).



**Figure IV.8 : Dépendance des probabilités Q, p et R en fonction de la périodicité du cycle de réparation des paliers portants du turbocompresseur considéré**



**Figure IV.9 : Coût spécifique  $U_s$  ( $T_c$ )**

On voit à l'instant  $t=0$  (Figure IV.8) que la distribution du paramètre  $X$  est un peu itérée, ce qui signifie que les paliers porteurs sont tous prêts à accomplir leurs missions.

A l'instant  $t=12000$  heures, la courbe de distribution du paramètre  $X$  commence à s'écarter très lentement ; cela est dû à la lente variation de de l'écart type dans le temps ; ce qui justifie l'absence des interventions curatives avant  $t=12000$  heures.

En prenant par hypothèse la linéarité de la variation l'espérance mathématique  $E(t)$  et  $S(t)$ ; cela nous informe que le risque de tomber dans la zone de la perte de la fonction requise sera égale a 0,0313 si l'intervention systématique se réalise a  $t=16000$  h.

Les résultats de calcul présentés sur la (figureIV.9) montrent que la valeur de la périodicité optimale de réparation des paliers portants des turbocompresseurs obtenue est de 16000heures. La comparaison des résultats obtenus avec la valeur de la périodicité du cycle de réparation mis en œuvre, a montré que le recourt à une approche probabiliste permet d'allonger la durée de service des paliers portants des turbocompresseurs considérés de 33%, soit une augmentation de 4000 heures de fonctionnement.

### **IV.3.3. résultat d'élaboration d'un planning de réparation appliqué aux compresseurs centrifuges**

D'après les arrêts enregistrés dans les fichiers historiques (annexe3 ;4 ;5) d'un parc de compresseurs centrifuges travaillant dans les mêmes conditions et traités par la méthode de PARETO, on a recueilli les données suivantes :

D'après le graphe de Pareto, on voit que 40% de composants sont responsables de 80% des indisponibilités de compresseurs centrifuges.

Les éléments responsables de 80% des indisponibilités de compresseurs centrifuges sont :

**M1 Garniture Oring**

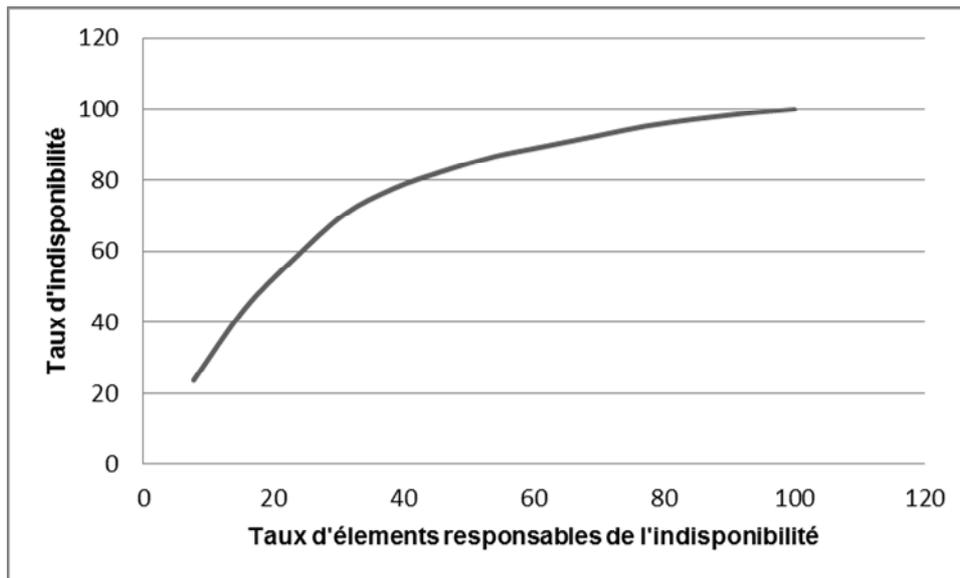
**M2- Bague d étanchéité**

**M3- palier portant**

**M4- porte labyrinthe**

| <b>Rang</b> | <b>code</b> | <b>Designation</b>           | <b>% elements</b> | <b>jours d'arret</b> | <b>cumul d'arret</b> | <b>% d'arret</b> |
|-------------|-------------|------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 1           | C460        | bague d'étanchéité           | 7,692307692       | 58                   | 58                   | 23,5772358       |
| 2           | C285        | garniture oring              | 15,38461538       | 49                   | 107                  | 43,495935        |
| 3           | C780        | porte labyrinthe HP          | 23,07692308       | 35                   | 142                  | 57,7235772       |
| 4           | C419        | palier porteur               | 30,76923077       | 31                   | 173                  | 70,3252033       |
| 5           | C 419       | palier de butée              | 38,46153846       | 18                   | 191                  | 77,6422764       |
| 6           | C785        | série diaphragme             | 46,15384615       | 12                   | 203                  | 82,5203252       |
| 7           | C208        | joint d'accouplement         | 53,84615385       | 10                   | 213                  | 86,5853659       |
| 8           | C781        | porte labyrinthe BP          | 61,53846154       | 7                    | 220                  | 89,4308943       |
| 9           | C782        | P labyrinthe<br>accouplement | 69,23076923       | 7                    | 227                  | 92,2764228       |
| 10          | C765        | garniture fleximetal         | 76,92307692       | 7                    | 234                  | 95,1219512       |
| 11          | C480        | obturateur HP                | 84,61538462       | 5                    | 239                  | 97,1544715       |
| 12          | C760        | garniture Gaco               | 92,30769231       | 4                    | 243                  | 98,7804878       |
| 13          | C638        | anneau d'étanchéité          | 100               | 3                    | 246                  | 100              |

**Tableau IV.2 : Historique des éléments responsables de l'indisponibilité des compresseurs centrifuges**



**Figure IV.10 Taux d'arrêt en fonction du taux d'éléments**

Après ajustement des données par le modèle de Weibull et validation par le test de Kolmogorov Smirnov, on a les résultats suivants présentés dans le (tableau IV.3) :

| code | Désignation         | $\beta$ | (jours) | $\alpha$ | MTBF(jours) |
|------|---------------------|---------|---------|----------|-------------|
| C285 | Garniture Oring     | 1,88    | 507     | 0        | 475         |
| C460 | Bague d étanchéité  | 2,14    | 905     | 0        | 844         |
| C419 | Palier portant      | 3,55    | 736     | 0        | 636         |
| C780 | Porte labyrinthe HP | 2,09    | 1388    | 0        | 1047        |

**Tableau IV.3. Ajustement des données par le modèle de Weibull**

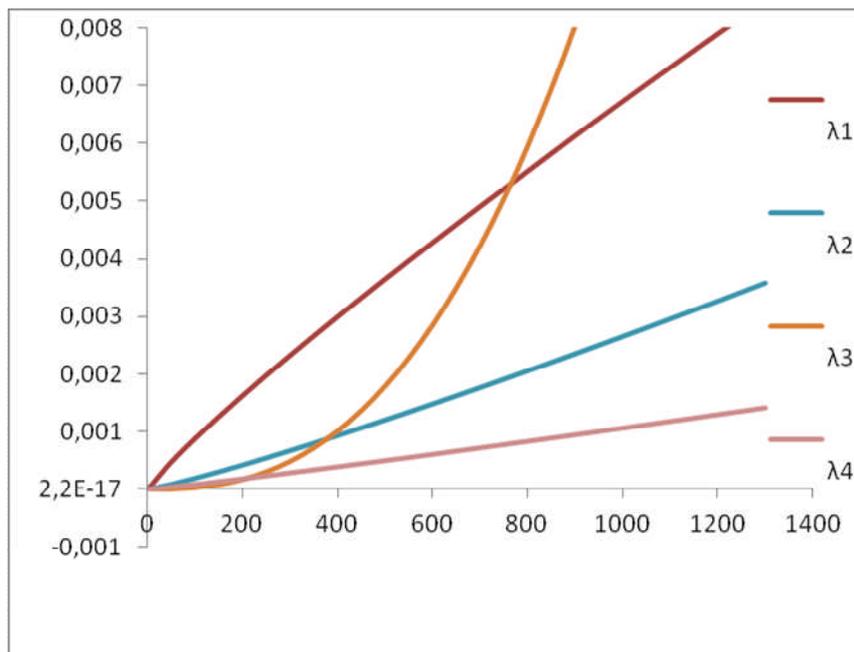
On déduit que ces éléments sont à l'âge d'obsolescence. Les coûts de maintenance préventive et corrective des éléments considérés sont donnés dans le (tableau IV.4).

| code | Désignation         | cout de maintenance corrective (\$) | Cout de maintenance préventive (\$) |
|------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| C285 | Garniture Oring     | 50,75                               | 7,07                                |
| C460 | Bague d étanchéité  | 96,02                               | 17,62                               |
| C419 | Palier portant      | 60,78                               | 18,37                               |
| C780 | Porte labyrinthe HP | 96,51                               | 31,65                               |

**Tableau IV.4. Coûts de maintenance corrective et préventive**

#### IV.3.3.1 Représentation graphique et linéarisation des taux de défaillances

Les taux de défaillances des composants sus cités sont présentés sur la (figure IV.11) à partir du modèle de Weibull ; ainsi que les (figures IV. 12 ; 13 ; 14 ; 15) présentent leurs linéarisations respectives.



**Figure IV.11 : variation des taux de défaillances en fonction du temps**

$\lambda_1$  : Taux de défaillance des garnitures Oring ;  $\lambda_2$  : Taux de défaillance des bagues d'étanchéités ;  $\lambda_3$  : Taux de défaillance des paliers portants ;  $\lambda_4$  : Taux de défaillance des portes labyrinthes.

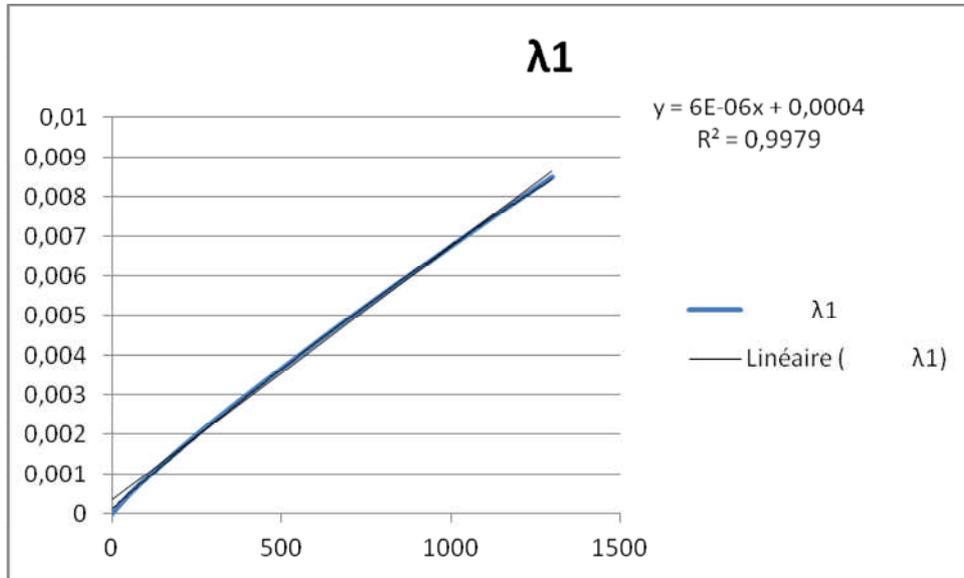


Figure IV.12 : linéarisation du taux de défaillances des garnitures Oring

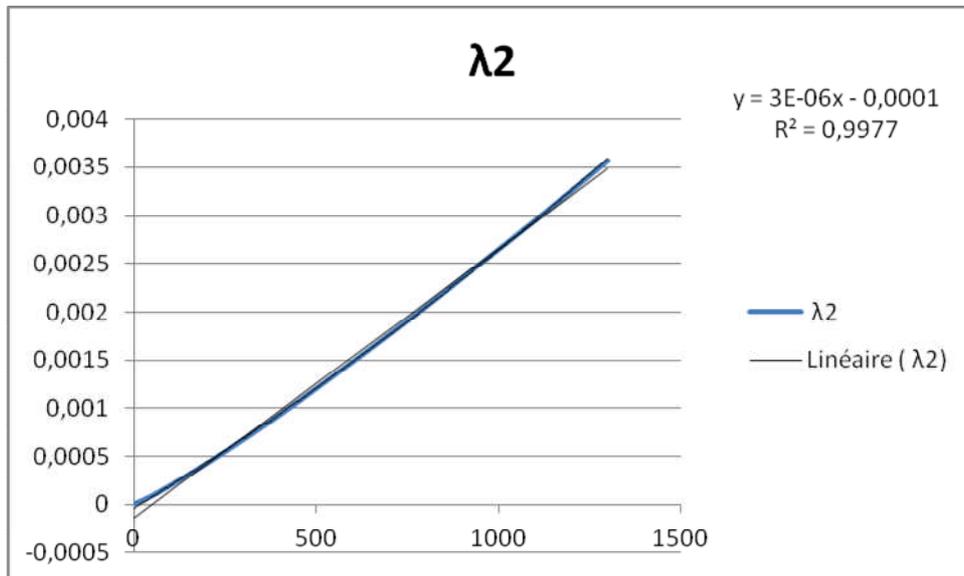
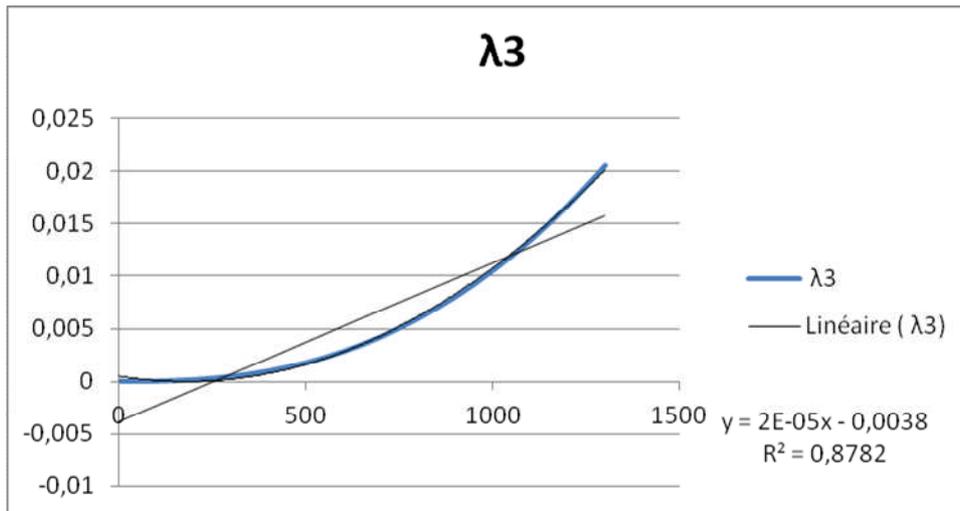
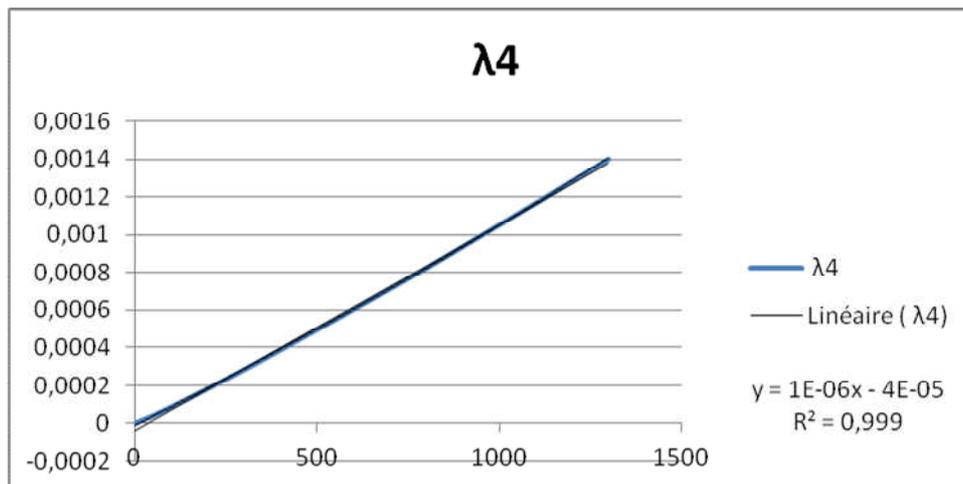


Figure IV.13 : linéarisation du taux de défaillances des bagues d'étanchéité



**Figure IV.14 : linéarisation du taux de défaillances des paliers portants**



**Figure IV.15 : linéarisation du taux de défaillances des portes labyrinthes**

Les courbes présentées sur la (figure IV.11) nous montrent clairement l'évolution des taux de défaillances des composants considérés. Pour le composant 1, on voit bien qu'il vieillit rapidement par rapport aux sous ensemble 2 et 4 ; et que ces trois éléments possèdent des paramètres de formes  $\beta$  comprises entre (1,5 et 2,5) ; ce qui correspond à un mode de défaillance par fatigue [17] ; cela justifie leurs progressions presque linéaires. Concernant l'élément 4 et au début il vieillit très lentement, et au-delà du (200 jours), il commence à vieillir plus rapidement que les autres composants ce qui justifie son mode de défaillance qui est l'usure [47].

On voit bien que les taux de défaillances des éléments 1, 2 et 4 possèdent une linéarité formidable et surtout pendant leurs durées de vies actives.

Concernant le taux de défaillance de l'élément 3 qui possède une évolution un peu lointaine de la linéarité proposée ; mais les erreurs pendant la durée de vie active se compensent et avec ( $R^2=0,887$ ), on peut dire que la linéarité peut assurer des résultats pratiques satisfaisantes.

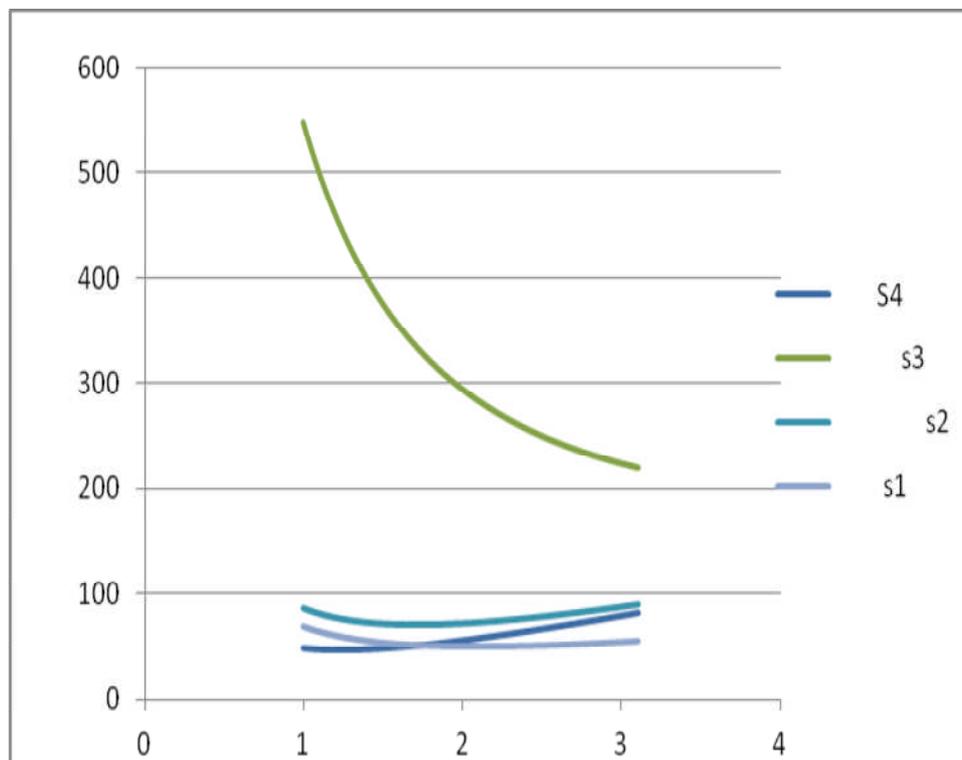
Les résultats obtenus ci-dessus nous permettent de déterminer la structure et les périodicités des interventions préventives, qui reviennent dans notre cas à optimiser l'expression (III.30) que l'on écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{Min } S = & -179,31 + \{(152,256 / n1 . n2 . n3 . n4) + [7,0694 . (n1 - 1) . n2 . n3 . n4]\} \\ & + \{(144,0247 / n2 . n3 . n4) + [17,67 . (n2 - 1) . n3 . n4]\} + \{(607,76 / n3 . n4) \\ & + [18,364 . (n3 - 1) . n4]\} + \{(48,31 / n4) + [31,652 . (n4 - 1)]\}. \end{aligned}$$

$$\text{Min } S = -179,31 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

En résolvant la fonction précédente, on pourra déterminer la combinaison optimale ( $n1, n2, n3, n4$ ) qui correspond aux fréquences optimales de réparation planifiées de quatre niveaux respectivement.

Les variations des composants  $S_1, S_2, S_3, S_4$  de la fonction objectif en fonction de ( $n1, n2, n3, n4$ ) sont présentées sur la (figure IV.16). Les structures des plannings proposés sont présentées sur les figures (IV17, IV18, IV19).



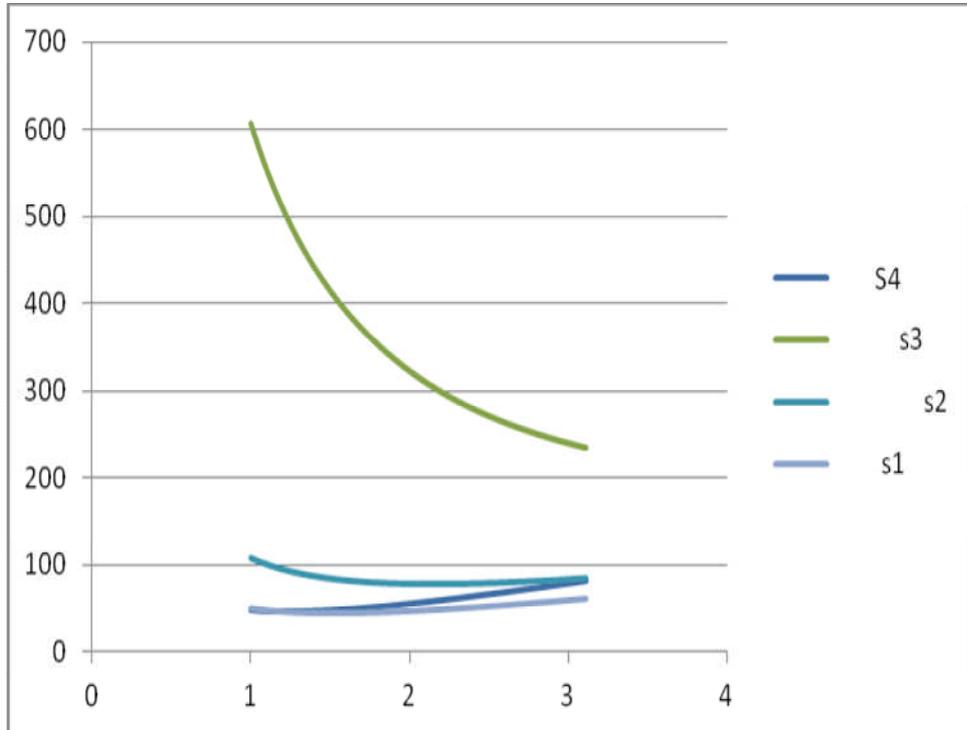
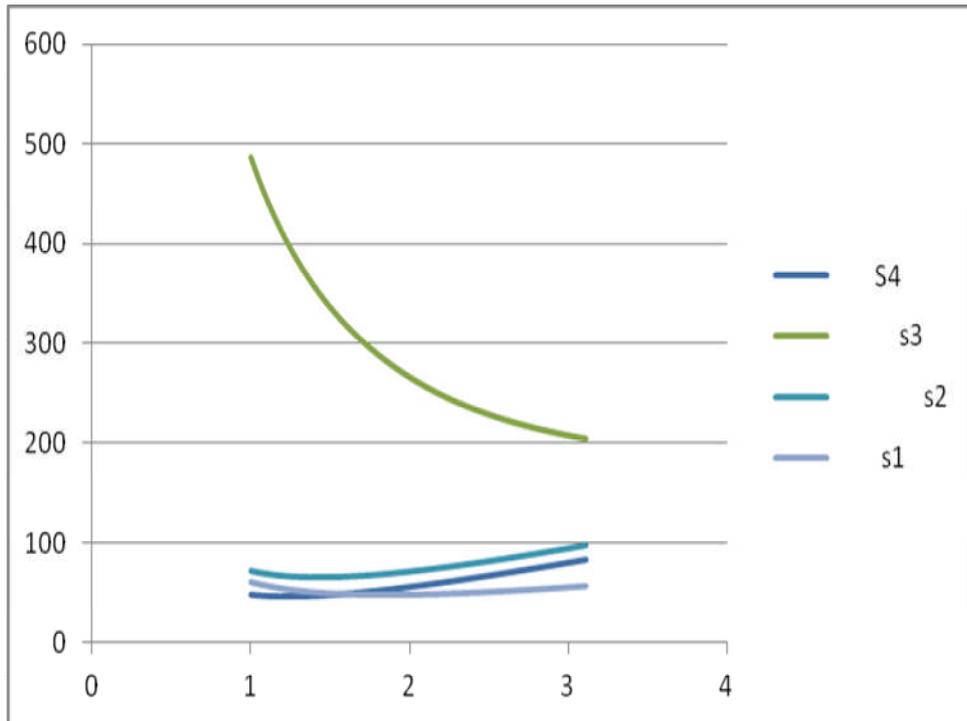


Figure IV.16 variation des composants de la fonction objectif  $S_i$  en fonction de  $n_i$

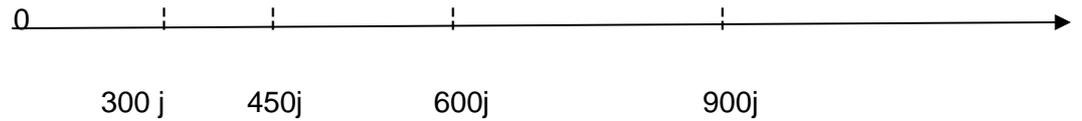
**IV.3.3.2 Plannings proposés**

$n_4 = 1,11$   $T_4 = 900$  JOURS

$n_3 = 1,5$   $T_3 = 600$  j

$n_2 = 1,33$   $T_2 = 450$  j

$n_1 = 1,5$   $T_1 = 300$  j      M1      M2      (M1+M3)      (M1+M2+M4)



**Figure IV.17. Structure du planning des interventions correspondant à**

**(1,5 ; 1,33 ; 1,5 ; 1,11)**

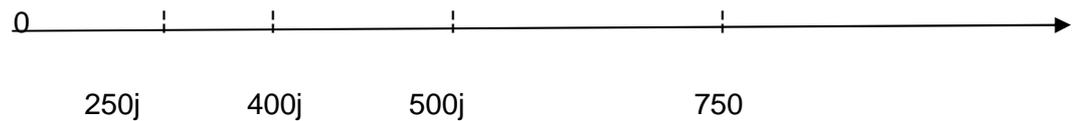
$N_4 = 1,25$   $T_4 = 800$  JOURS

$N_3 = 1,6$   $T_3 = 500$  j

$N_2 = 1,25$   $T_2 = 400$  j

$N_1 = 1,6$   $T_1 = 250$  j

M1      M2      (M1+M3)      (M1+M2+M4)



**Figure IV.18. Structure du planning des interventions correspondant à**

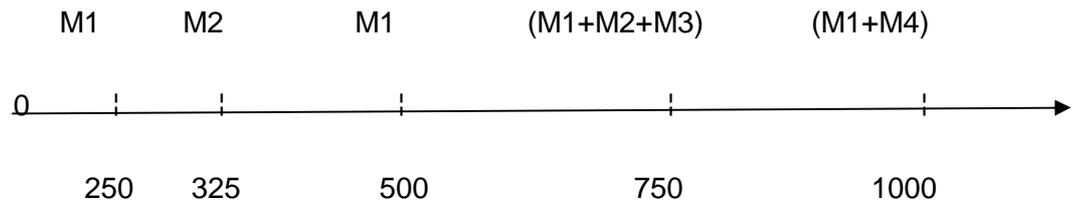
**(1,6 ; 1,25 ; 1,6 ; 1,25)**

$N_4 = 1$   $T_4 = 1000$  JOURS

$N_3 = 1,33$   $T_3 = 750$  j

$N_2 = 2,3$   $T_2 = 325$  j

$N_1 = 1,3$   $T_1 = 250$  j



**Figure IV.19. Structure du planning des interventions correspondant à  
(1,3 ; 2,3 ; 1,33 ; 1)**

Après avoir résolu la fonction du coût sommaire basée sur la linéarité des taux de défaillances des composants considérés ; on peut conclure que les résultats obtenus sont très satisfaisants vis-à-vis l'application du planning de la maintenance systématique ; ainsi que l'approvisionnement en pièces de rechange.

Après une analyse fiabiliste préétablie, suivie par une étude sélective on a mis en évidence les composants les plus pénalisants des compresseurs centrifuges afin de maîtriser leur fiabilité.

Le travail illustré montre que les composants dont le mode de défaillance est par usure, et à partir d'une certaine durée de fonctionnement normal ; le vieillissement augmente son accélération ce qui se traduit par une chute des qualités physico-mécaniques des matériaux de ces composants et cela est la conséquence de l'usure.

Par contre les sous-ensembles qui se dégradent par fatigue possèdent un vieillissement doté par une accélération constante ce qui se traduit par une linéarité des taux de défaillances.

#### **VI.4.Conclusion**

Vus les conséquences indésirables, accompagnées par des mauvaises décisions en maintenance ; les résultats des travaux effectués dévoilent l'importance de l'amélioration continuellement dans le temps, de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures.

Sur le plan systématique de l'art, la méthode probabiliste basée sur l'évolution de l'état de bien nous permet de réaliser des interventions préventives ; au moment où le matériel atteint pleinement la zone de dégradation, ce qui se traduit par une augmentation de la périodicité d'intervention systématique. Concernant les matériels dont les plannings systématiques

préétablis par le constructeur n'arrivent pas à subvenir correctement aux exigences de maintenance ; une modélisation mathématique basée sur la linéarisation des taux de défaillances peut corriger et même d'une façon optimale la planification des travaux de maintenance.

Sur le volet conditionnel de l'art, la présentation spectrale de puissance par la méthode de prony du signal vibratoire reçu par un capteur de vibrations placé sur une pompe centrifuge détecte clairement les défauts potentiels.

Ces approches proposées peuvent être une contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures.

## Conclusion Générale

---

Dans les études présentées dans cette thèse, on a montré que les programmes de maintenance appliqués aux machines dynamiques nécessitent une planification optimisée en raison de l'exigence d'une fiabilité de fonctionnement élevée de ces équipements. Les objectifs poursuivis par les tâches de maintenance préventives doivent être établis en fonction de la catégorie de l'équipement considéré ; dans ce contexte, on distingue quatre catégories: hautement critique, critique, non critique et en usage jusqu'à la défaillance.

On a considéré dans cette étude les équipements de la deuxième catégorie, pour lesquels plusieurs ressources et tâches de maintenance significatives leur sont attribuées. On a envisagé pour ce type d'équipements ce que peut apporter par la maintenance préventive pour éviter les défaillances et que les équipements rencontrent leurs objectifs de fiabilité. Dans ce contexte, on a déterminé la périodicité des tâches de maintenance en se basant sur les données de retour d'expérience, concernant les événements ou les défaillances. On a identifié les mécanismes de dégradation pertinents observés et repéré les composants préférentiellement sujets aux défaillances.

Avant de proposer que la périodicité de la tâche de maintenance nécessite un ajustement ou que la structure du cycle de maintenance mise en place nécessite des modifications, on s'est assuré que la portée de chaque tâche est appropriée et que les compétences requises et les procédures sont utilisées lors de la réalisation de la tâche de maintenance. Une attention particulière a été accordée aux critères indiquant que des changements sont requis aux périodicités actuelles.

D'après nos propres investigations, on a conclu qu'un changement au niveau de la structure du cycle de maintenance des équipements considérés est nécessaire. Le retour d'expérience indique qu'il faut d'autres stratégies de maintenance plus efficaces, vu que les installations se dégradent plus rapidement que prévu. Dans ce contexte on a associé à la maintenance préventive basée sur la fiabilité, la maintenance conditionnelle. Les résultats obtenus sont une contribution, visant à répondre aux objectifs de fiabilité recherchés pour les équipements des installations pétrolières et gazières.

- [1]. Association française des ingénieurs de maintenance, Production et maintenance, Edition 2007
- [2]. AFNOR, Maintenance industrielle – Fonction maintenance, FD X60-000, Mai, 2002.
- [3]. Aghezzaf E.H., Jamali, M.A. Ait-Kadi D., An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research* 2007; 18(1, 2): 679-685.
- [4]. Anthony Kelly, Maintenance and the industrial organization. *Plant Maintenance Management Set* 2006 ; 3(1) : 3-8.
- [5]. Athavale M., Li H. Jiang Y. and Singhal A. K, Application of the full cavitation model to pumps and inducers. *International Journal of Rotating Machinery*, 2002, vol. 08, no. 01, pp. 45-56.
- [6]. Azadeh A., Ebrahimipour V. and Bavar P., A fuzzy inference system for pump failure diagnosis to improve maintenance process: The case of a petrochemical industry. *Expert Systems with Applications*, January 2010, vol. 37, no. 01, pp. 627-639.
- [7]. B.Gnedenko, Y.belaiev, A.soloviev, *methodes mathématiques en théorie de fiabilité*, Edition MIR, Moscou 1972.
- [8]. C.G. Vassiliadis, J. Arvela, E.N. Pistikopoulos, L.G. Papageorgiou, Planning and maintenance optimization for multipurpose plants. *Computer Aided Chemical Engineering*, Volume 8, 2000, Pages 1105-1110.
- [9]. Carnero M.C., Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. *Decision Support Systems* 2005; 38(4): 539-555.
- [10]. Chunming Xia, John Howell, Nina F. Thornhill, "Detecting and isolating multiple plant-wide oscillations via spectral independent component analysis". *Automatica*, Vol. 41, No. 12, 2005, pp. 2067-2075.
- [11]. Coutier-Delgosha O., Fortes-Patella and Reboud J. L., "Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation". *Journal of Fluids Engineering*, ASME, Vol. 125, No. 01, 2003, pp. 38-45.
- [12]. Deloux E., Castanier B., and Bérenguer C., Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé, 7ème Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement, 20, 21 et 22 mars 2007, volume 1, pages 142–149, Tanger (Maroc), 2007.

- [13]. Devarun Ghosh, Sandip Roy, Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2009; 22(4): 403-407.
- [14]. Djamel Halimi, Ahmed Hafaifa, Elahmoune Bouali and Mouloud Guemana, Vibrations detection and isolation in centrifugal pump used in petroleum industry using spectral analysis approach. *Archive of Sciences Journal* 2012; 65(11): 234-245.
- [15]. Dj Halimi, E Bouali, N Abdelbaki et M Guemana, Recherche des périodicités optimales de réparation des équipements des gazoducs, Premier Colloque International IMPACT 2010 22-24 Mars 2010, Djerba, Tunisie
- [16]. E Garcia, H Guyennet, J.C Lapayre, N Zerhouni, A new industrial cooperative tele-maintenance platform. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 46, Issue 4, July 2004, Pages 851-864.
- [17]. Eisinger S., Rakowsky U.K., Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance — a probabilistic approach. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 71, no. 2, February 2001, pp. 159-164.
- [18]. Elhaj M., Gu F., Bal A.D.I, Albarbar A., Al-Qattan M., A. Naid, Numerical simulation and experimental study of a two-stage reciprocating compressor for condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2008; 22(2): 374-389.
- [19]. Enrique Castillo, Roberto Mínguez, Carmen Castillo, Sensitivity analysis in optimization and reliability problems. *Reliability Engineering & System Safety* 2008; 93(12): 1788-1800.
- [20]. Ewald, F., 2002, La détermination des responsabilités, Les risques industriels et technologiques, Documentation française, n°882, Novembre 2002, p.45.
- [21]. Fazzini P.G., Márquez A.A., Otegui J.L., Barcia P., Cause and effect assessment after a complex failure of a large ethylene compressor. *Engineering Failure Analysis* 2006; 13(8): 1358-1369.
- [22]. Farrahi G.H., Tirehdast M., Masoumi Khalil Abad E., Parsa S., M. Motakefpoor, Failure analysis of a gas turbine compressor. *Engineering Failure Analysis* 2011; 18(1): 474-484.
- [23]. Fischhoff B., Managing risk perception, *Issues in Science and Technology*, 2, pp.83-96, 1985.

- [24]. Fleurquin G, Riane F, Roland B, Dehombreux P, Hou G,. Optimain :Plate forme d'évaluation de strategie de maintenance des systems complexes. MOSIM'06, 2006
- [25]. G. Heyen, K. Murphy, D. Marchio, P. Kalata, B. Kalitventzeff, Dynamic simulation and control of gas turbines and compressor systems. Computers & Chemical Engineering, Volume 17, Supplement 1, 1993, Pages S299-S304
- [26]. G.L. Forbes and R.B. Randall, Simulated gas turbine casing response to rotor blade pressure excitation. Proceeding of the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007, 10-12 December 2007, Brisbane, Australia.
- [27]. Gwo-Chung Tsai, Rotating vibration behavior of the turbine blades with different groups of blades. Journal of Sound and Vibration, April 2004, vol. 271, no. 3-5, 6, pp. 547-575.
- [28]. Gherardi S., Nicolini D., The Organizational Learning of Safety in Communities of Practice, Journal of Management Inquiry, 2000 ,9(1): 7-18.
- [29]. Goguelin, P, La prévention des risques professionnels, Que sais-je ?; PUF, Paris, 1996.
- [30]. Guemana M., Aissani S. and Hafaifa A., "Use a new calibration method for gas pipelines: An advanced method improves calibrating orifice flowmeters while reducing maintenance costs". Hydrocarbon Processing Journal, Vol. 90, No. 8, 2011, pp. 63-68.
- [31]. Gülich, Johann Friedrich, Centrifugal Pumps. Hardcover, 2010, ISBN 978-3-642-12823-3.
- [32]. Hafaifa Ahmed, Attia Daoudi and Kouider Laroussi, Application of fuzzy diagnosis in fault detection and isolation to the compression system protection. Control and Intelligent Systems ACTA Press, July 2011, vol. 39, no. 3, pp. 151-158.
- [33]. Hafaifa Ahmed, Ferhat Laaouad, and Kouider Laroussi, A Numerical structural approach to surge detection and isolation in compression systems using fuzzy logic controller. International Journal of Control, Automation, and Systems, IJCAS, February 2011, vol. 9, no. 1, pp.69-79.
- [34]. Hafaifa Ahmed, Ferhat Laaouad and Kouider Laroussi, Fuzzy logic approach applied to the surge detection and isolation in centrifugal compressor. Automatic Control and Computer Sciences, Springer 2010, vol. 44, no. 01, pp. 53–59.

- [35]. Halimi Djamel, Hafaifa Ahmed, and Bouali Elahmoune Maintenance actions planning in industrial centrifugala compressor based on failure analysis. *Eksploatacjai Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): pp 17–21
- [36]. Harish D. Goel, J. Grievink, M.P.C. Weijnen, Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants. *Computers & Chemical Engineering* 2003; 27(11): 1543-1555.
- [37]. Hendrickson T. A., Leonard J. S. and Weise D. A., Application of magnetic bearing technology for vibration free rotating machinery. *Naval Engineers Journal*, Mars 2009, Vol. 99, no. 3, pp. 107–111.
- [38]. Hermand, D., Munoz Sastre, M.T. (Eds.), *Psychologie du risque - Identifier, évaluer, prévenir*. Ouvertures psychologiques, De Boeck Universite, Bruxelles.
- [39]. J.L. Otegui, P.G. Fazzini, A.A. Marquez, P.L. Barcia, Failure analysis of packing plate in a hyper compressor at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis*, Volume 15, Issue 5, July 2008, Pages 531-542.
- [40]. Jiandong Zhang, Gang Rong, Weifeng Hou, Chenbo Huang, Simulation based approach for optimal scheduling of fuel gas system in refinery. *Chemical Engineering Research and Design* 2010; 88(1): 87-99.
- [41]. Jiangping Wang and Hongtao Hu, Vibration-based fault diagnosis of pump using fuzzy technique. *Measurement*, February 2006, vol. 39, no. 02, pp. 176-185.
- [42]. John Moubray. *Moubrays Reliability-Centered Maintenance Troisieme Edition* 2012.
- [43]. John Vance, Fouad Zeidan, Brian Murphy, Bearings and their effect on rotordynamics. *Machinery vibration and rotordynamics*, May 2010, Vol. 1, no.1, pp. 171–269.
- [44]. Kaufmann, A, Gronchko, D et Cruon, R, *Mathematical models for the study of the reliability of systems*, N, Y. : Academic Press (1977).
- [45]. Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D., Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness. *Applied Energy* 2008; 85(6): 494-505.
- [46]. Lei You, Jun Hu, Fang Fang and Lintao Duan, Fault Diagnosis System of Rotating Machinery Vibration Signal. *Procedia Engineering* 2011; 15(1): 671-675.
- [47]. Levitin Gregory, *Computational intelligence in reliability engineering: Evolutionary techniques in reliability analysis and optimization*. Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 39. Edition 2007, ISBN 978-3-642-07218-5.

- [48]. Lewis, P.A, Implications of failure model for use and maintenance of computers. *J. Appl. Prob.* 1, 2, 347-368 (1964) .
- [49]. Lung B, Morel G, Leger J.B, Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement, *Robotica*, vol 21, 2003, pp 313-324.
- [50]. Lyons, M., Adams, S., Woloshynowych, M., Vincent, C., 2004, Human reliability analysis in healthcare: A review of techniques, *International Journal of Risk & Safety in Medicine*, Vol.16, pp. 223–237.
- [51]. Martin W. Trethewey, Joshua C. Friell, M. Jeya Chandra and Mitchell S. Lebold, A spectral simulation approach to evaluate probabilistic measurement precision of a reactor coolant pump torsional vibration shaft crack monitoring system. *Journal of Sound and Vibration*, March 2008, vol. 310, no. 4–5, pp. 1036-1056.
- [52]. Maggi, B.; Lagrange, V., 2002, *Le travail collectif dans l'industrie à risque*, Octares Editions, Toulouse.
- [53]. Meher Kishor K. and Rama Rao A., Optimal foundation design of a vertical pump assembly. *Journal of Sound and Vibration*, April 2006, vol. 291, no. 3–5, pp. 1269-1277.
- [54]. Mejri I., Bakir F., Kouidri S. and Rey R., Influence of peripheral blade angle on the performance and the stability of axial inducers. *IMECH E Journal of Power and Energy*, 2005, vol. 219, no. 01, pp. 289-301.
- [55]. Ming Chen H., Principles of bearing design. *Hanlon - Compressor Handbook*, Chapter 19, Mohawk Innovative Technology, Inc.
- [56]. Ming, T. and Su, Y., LS-SVC based recognition method of the centrifugal pump cavitation intensity. *Proceeding of the International Conference on Electric Information and Control Engineering, ICEICE 2011*, paper no. 5777826, pp. 3335-3338.
- [57]. Mirko Čudina and Jurij Prezelj, Detection of cavitation in operation of kinetic pumps. Use of discrete frequency tone in audible spectra. *Applied Acoustics*, April 2009, vol. 70, no. 04, pp. 540-546.
- [58]. Moore W.J., Starr A.G., An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities. *Computers in Industry* 2006; 57(6): 595-606.
- [59]. Moubray J *Reliability Centered Maintenance, RCM*, edition 2000

- [60]. Mucchi, E., Dalpiaz, G., Rivola, A., Dynamic behavior of gear pumps: Effect of variations in operational and design parameters., *Meccanica*, 2011, vol. 46, no. 06, pp. 1191-1212.
- [61]. N. Vardar, A. Ekerim, Failure analysis of gas turbine blades in a thermal power plant. *Engineering Failure Analysis*, June 2007, vol. 14, no. 4, pp. 743-749.
- [62]. Otegui J.L., Fazzini P.G., Marquez A.A., Barcia P.L., Failure analysis of packing plate in a hyper compressor at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis* 2008; 15(5): 531-542.
- [63]. Panida Jirutitijaroen, Chanan Singh, The effect of transformer maintenance parameters on reliability and cost: a probabilistic model. *Electric Power Systems Research*, Vol. 72, no. 3, December 2004, pp. 213-224.
- [64]. Radouane Laggoune, Alaa Chateaneuf, Djamil Aissani, Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering* 2009; 33(9): 1499-1510.
- [65]. Retour D., Bouche M., Plauchu V., Où va la maintenance industrielle, problèmes économiques, no 2.159, 1990, pp 7-13.
- [66]. Sakthivel N.R., Sugumaran V. and Babudevasenapati S., Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree. *Expert Systems with Applications*, June 2010, vol. 37, no. 06, pp. 4040-4049.
- [67]. Scheibner D., Mehner J., Reuter D., Gessner T. and Dötzel W., A spectral vibration detection system based on tunable micromechanical resonators. *Sensors and Actuators A: Physical*, September 2005, vol. 123–124, no. 23, pp. 63-72.
- [68]. Sergei P. Yushanov, Alexander E. Bogdanovich, Analytical probabilistic modeling of initial failure and reliability of laminated composite structures. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, no. 7–8, March 1998, pp. 665-685.
- [69]. Shu-yuan Zhao, Bo-ming Zhang, Shan-yi Du, Probabilistic modeling of transient heat transfer and assessment of thermal reliability of fibrous insulation under aerodynamic heating conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, no. 7, July 2009, pp. 1302-1310.
- [70]. Slovic, P., Perceived risk, trust, and democracy, *Risk Analysis*, 1993, 13, 6, 675-682.
- [71]. Slovic, P., Fischhoff, B., Lichtenstein, S., 1980, Facts and fears: Understanding perceived risks. In. Schwing, R.C., Albers, W.A. Jr. (eds.), *Societal Risk Assessment : How Safe is Safe Enough?*, Plenum Press, New York.

- [72]. Specht, M., Chevreau, F.R., Denis-Rémis, C., 2006, Dedicating Management to Cultural Processes: Toward a Human Risk Management System, *Journal of Risk Research*, Vol. 9, No. 5, 525– 542, July 2006.
- [73]. Tan K.M and Ooi K.T., Journal bearings design for a novel revolving vane compressor. *International Journal of Refrigeration*, January 2011, Vol. 34, no. 1, pp. 94-104.
- [74]. Turner, B. A., Pidgeon, N. F, Blockey, D. I., Toft, B., 1989, Safety culture: Its position in future risk management, Second World Bank Workshop on Safety Control and Risk Management. Karlstad, Sweden
- [75]. Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., “Watanabe, S. and Hashimoto, T., Observations of oscillating cavitation of an inducer”. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, Vol. 119, No. 01, 1997, pp. 775-781.
- [76]. Tsukiji, T., Nakayama, K., Saito, K., Yakabe, S., Study on the cavitating flow in an oil hydraulic pump. *Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, FPM 2011*, paper no. 6045768, pp. 253-258.
- [77]. V.A. Kopnov, Optimal degradation processes control by two policies. *Reliability Engineering and Design*, 196(2) pp 219-231 mars 2000.
- [78]. Vassiliadis C.G, Arvela J., Pistikopoulos E.N., Papageorgiou L.G., Planning and maintenance optimization for multipurpose plants. *Computer Aided Chemical Engineering* 2000; 8(1): 1105-1110.
- [79]. Vérot, Y., 1998, Maîtrise du risque dans l'industrie chimique et pétrochimique : retour d'expérience. In. Bourdeaux, I. Gilbert, C. (eds.), *Retours d'expérience, apprentissages et vigilances organisationnels - Approches croisées*, Programme Risques Collectifs et Situations de Crise, CNRS.
- [80]. Vérot, Y., 1999, Maîtrise du risque - Le retour d'expérience, Ecole d'été : gestion scientifique du risque, Editions de la Thiele, Réseau Analyse du Risque Industriel, Albi. Vidal, B., 1998, *Histoire de la chimie, Que sais-je ?*, PUF
- [81]. Walker B.K. and Gai E., Fault detection threshold determination techniques using Markov theory. *International Journal Guidance, Control and Dynamics*, 1979, vol. 02, no. 04, pp. 313-319.
- [82]. Wang Hongzhou and Pham Hoang, *Reliability and optimal maintenance: Series: Springer Series in Reliability Engineering*. 2006, ISBN 978-1-84628-324-6.

- [83]. Weber P., Gentil S., Ripoll P. and Foulloy L., Multiple fault detection and isolation. Proceeding of the 14th IFAC World Congress, 1999, vol. P, no. 7e-092, pp. 223-228.
- [84]. Weiss J.L., Threshold computations for detection of failures in SISO systems with transfer function errors. Proceedings of the American Control Conference, 1988, pp. 2213-2218.
- [85]. Willsky A.S., A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. Automatica Journal, 1976, vol. 12, pp. 601-611.
- [86]. Wybo, J.L., Ducloy, J., Roche, J.P., 2005, Vers une culture de maîtrise des risques au sein d'ADP. Une méthode fondée sur l'appropriation, Préventive, n°80, mars - avril 2005, p.36.
- [87]. Xuan Hai-jun, Song Jian, Failure analysis and optimization design of a centrifuge rotor. Engineering Failure Analysis 2007; 14(1): 101-109.
- [88]. Y.L. Lau, R.C.K. Leung, R.M.C. So, Vortex-induced vibration effect on fatigue life estimate of turbine blades. Journal of Sound and Vibration, November 2007, vol. 307, no. 3-5, 6, pp. 698-719.
- [89]. Yibing Xiang, Yongming Liu, Application of inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 26, no. 2, April 2011, pp. 148-156.
- [90]. Yuan Mao Huang, Sheng-An Yang, A measurement method for air pressures in compressor vane segments. Measurement 2008; 41(8): 835-841.
- [91]. Zhou Y. L., Sun B. and Zhao P., Method for diagnosing the fault of a centrifugal pump based on a lifting wavelet package. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, vol. 26, no. 06, pp. 738-742.
- [92]. Zouakia Rochdi, Bouami Driss, Tkiouat Mohamed, Industrial systems maintenance modelling using Petri nets. Reliability Engineering & System Safety 1999; 65(2): 119-124.
- [93]. Zohar, D., 1980, Safety Climate in Industrial Organizations: Theoretical and Applied Implications, Journal of Applied Psychology, 65(1), 96-102.

## ANNEXE 1

### Types de vibrations

La figure suivante donne l'ensemble des types de vibrations naturelles ou provoquées.

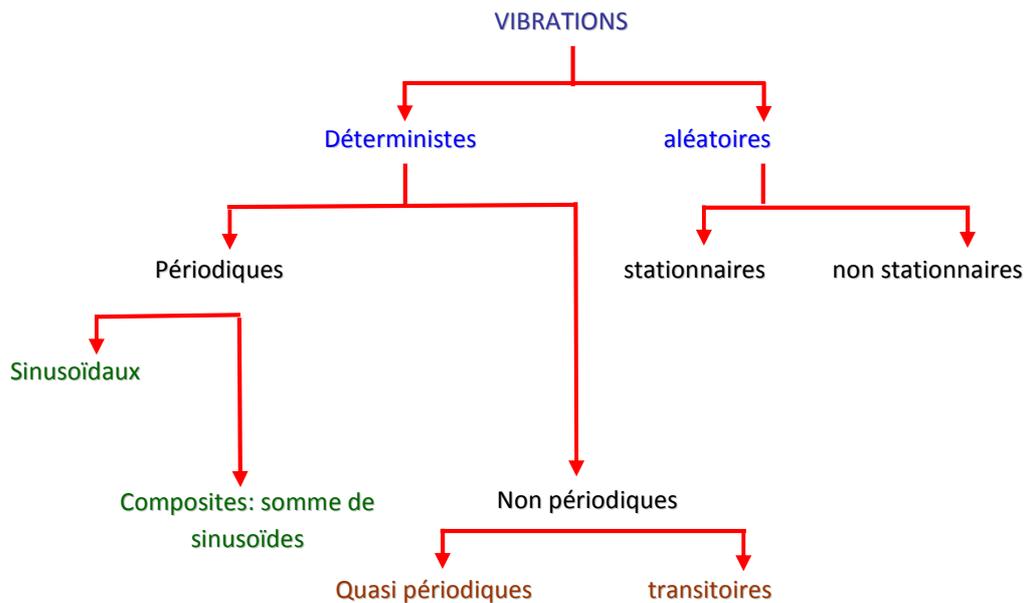


Figure 1 : Les principales vibrations

Une machine en rotation peut générer des vibrations de nature :

➤ **Périodique sinusoïdal ou quelconque**

Ces vibrations sont la signature d'un fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation des lignes d'arbre, engrenages,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déformation, déséquilibre, désalignement,...).

➤ **Périodique de type impulsionnel**

Elles sont la conséquence de chocs dus à des événements anormaux (jeux excessifs, défauts d'engrenage,...).

➤ **Aléatoires de type impulsionnel ou non**

## ANNEXE 2

### Classification générale des pompes

Toutes les pompes se divisent en deux classes principales selon le mode de fonctionnement suivant :

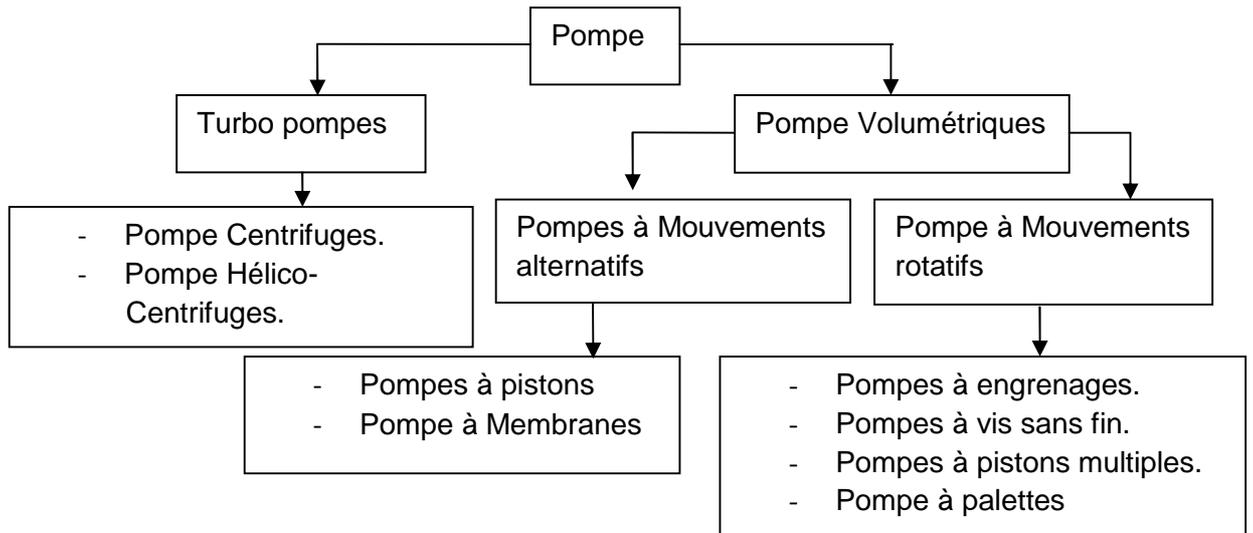


Tableau 2 : classification générale des pompes

### ANNEXE 3

Les éléments responsables de 80% des indisponibilités de compresseurs centrifuges sont :

M1 Garniture Oring

M2- Bague d'étanchéité

M3- palier portant

M4- porte labyrinthe

#### \* Garniture Oring

| rang | TBF (j) | Survie      |
|------|---------|-------------|
| 1    | 49      | 0,956521739 |
| 2    | 85      | 0,913043478 |
| 3    | 128     | 0,869565217 |
| 4    | 128     | 0,826086957 |
| 5    | 158     | 0,782608696 |
| 6    | 215     | 0,739130435 |
| 7    | 233     | 0,695652174 |
| 8    | 263     | 0,652173913 |
| 9    | 279     | 0,608695652 |
| 10   | 300     | 0,565217391 |
| 11   | 309     | 0,52173913  |
| 12   | 312     | 0,47826087  |
| 13   | 340     | 0,434782609 |
| 14   | 398     | 0,391304348 |
| 15   | 398     | 0,347826087 |
| 16   | 410     | 0,304347826 |
| 17   | 448     | 0,260869565 |
| 18   | 454     | 0,217391304 |
| 19   | 610     | 0,173913043 |
| 20   | 689     | 0,130434783 |
| 21   | 843     | 0,086956522 |
| 22   | 846     | 0,043478261 |

## ANNEXE 4

\* Bague d'étanchéité

| rang | TBF (j) | survie      |
|------|---------|-------------|
| 1    | 41      | 0,971428571 |
| 2    | 41      | 0,942857143 |
| 3    | 41      | 0,914285714 |
| 4    | 157     | 0,885714286 |
| 5    | 157     | 0,857142857 |
| 6    | 157     | 0,828571429 |
| 7    | 220     | 0,8         |
| 8    | 220     | 0,771428571 |
| 9    | 220     | 0,742857143 |
| 10   | 273     | 0,714285714 |
| 11   | 273     | 0,685714286 |
| 12   | 273     | 0,657142857 |
| 13   | 277     | 0,628571429 |
| 14   | 277     | 0,6         |
| 15   | 277     | 0,571428571 |
| 16   | 312     | 0,542857143 |
| 17   | 312     | 0,514285714 |
| 18   | 345     | 0,485714286 |
| 19   | 345     | 0,457142857 |
| 20   | 345     | 0,428571429 |
| 21   | 611     | 0,4         |
| 22   | 611     | 0,371428571 |
| 23   | 611     | 0,342857143 |
| 24   | 615     | 0,314285714 |
| 25   | 615     | 0,285714286 |
| 26   | 615     | 0,257142857 |
| 27   | 727     | 0,228571429 |
| 28   | 747     | 0,2         |
| 29   | 7773    | 0,171428571 |
| 30   | 845     | 0,142857143 |
| 31   | 894     | 0,114285714 |
| 32   | 1200    | 0,085714286 |
| 33   | 1282    | 0,057142857 |
| 34   | 1331    | 0,028571429 |

## ANNEXE 5

### Palier portant

| rang | TBF (j) | survie      |
|------|---------|-------------|
| 1    | 268     | 0,954545455 |
| 2    | 269     | 0,88961039  |
| 3    | 312     | 0,824675325 |
| 4    | 319     | 0,75974026  |
| 5    | 322     | 0,694805195 |
| 6    | 340     | 0,62987013  |
| 7    | 414     | 0,564935065 |
| 8    | 570     | 0,5         |
| 9    | 610     | 0,435064935 |
| 10   | 616     | 0,37012987  |
| 11   | 626     | 0,305194805 |
| 12   | 647     | 0,24025974  |
| 13   | 812     | 0,175324675 |
| 14   | 853     | 0,11038961  |
| 15   | 875     | 0,045454545 |

### Porte labyrinthe

| rang | TBF (j) | survie      |
|------|---------|-------------|
| 1    | 239     | 0,951388889 |
| 2    | 254     | 0,881944444 |
| 3    | 273     | 0,8125      |
| 4    | 438     | 0,743055556 |
| 5    | 570     | 0,673611111 |
| 6    | 600     | 0,604166667 |
| 7    | 617     | 0,534722222 |
| 8    | 720     | 0,465277778 |
| 9    | 804     | 0,395833333 |
| 10   | 840     | 0,326388889 |
| 11   | 1207    | 0,256944444 |
| 12   | 1331    | 0,1875      |
| 13   | 1800    | 0,118055556 |
| 14   | 1944    | 0,048611111 |