



N° d'ordre : 23 / 2017

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mlle : Amal Boukili

Spécialité : Génie Industriel

Sujet de la thèse :

Les techniques du Contrôle Non Destructif de la maintenance préventive :
Etude comparative et méthodologie d'implantation

Thèse présentée et soutenue le 11 Juillet 2017 devant le jury composé de

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
ACHIBAT Taoufiq	PES	FST Fès	Président
EL FIZAZI Said	PES	EST Safi	Rapporteur
REKLAOUI Kamal	PES	FST Tanger	Rapporteur
CHAFI Anas	PH	FST Fès	Rapporteur
HAOUACHE Said	PES	FST Fès	Examineur
EL HAMMOUMI Mohammed	PES	FST Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Techniques Industrielles

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques Fès

DEDICACES

Je dédie du plus profond de mon cœur ce travail, à mes chers parents, mes sœurs Iman, Ahlam, et Ouiam et à mon frère Abdelali de m'avoir soutenu dans cette longue démarche.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma très vive reconnaissance envers mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Mohammed EL HAMMOUMI, pour m'avoir accueilli dans son équipe et m'avoir fait confiance. Merci pour les conseils et encouragements qu'il m'a accordés jusqu'à la fin de cette thèse.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements à Monsieur Taoufiq ACHIBAT vice doyen de FST-Fès, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur Said EL FEZAZI, à Monsieur le Professeur Kamal REKLAOUI et à Monsieur le Professeur Anas CHAFI pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu me porter en acceptant le rôle de rapporteur dans mon jury de thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur Said HAOUACHE Professeur à la FST de Fès pour ses conseils de recherche, de rédaction et ses remarques perspicaces, et aussi qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail. Un grand Merci pour les échanges et travaux avec Monsieur Bachir EL KIHHEL, Professeur à l'Université Mohamed Premier, Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique, Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Oujda, Maroc). Ces relations ont été particulièrement constructives et valorisantes pour moi.

Enfin, à tous ceux qui n'ont pas été mentionnés dans ces pages, mais qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de cette thèse. Je pense notamment aux nombreux enseignants qui m'ont transmis leur savoir lorsque j'étais sur les bancs de la faculté.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DE LA MAINTENANCE	4
<i>I. Introduction.....</i>	<i>4</i>
1. Définition de la maintenance	6
2. Evolution de la notion de maintenance.....	7
3. Les types de la maintenance	9
<i>II. La maintenance corrective</i>	<i>10</i>
<i>III. La maintenance préventive.....</i>	<i>11</i>
1. La maintenance systématique	12
2. La maintenance conditionnelle	12
3. La maintenance prédictive	13
3.1. Les objectifs de la maintenance prédictive.....	13
3.2. La mise en place de la maintenance prédictive	13
<i>IV. Conclusion.....</i>	<i>15</i>
CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES CND.....	16
<i>I. Introduction.....</i>	<i>16</i>
1. Historique du CND	17
2. Les objectifs du CND	18
3. Défauts et leurs origines	19
3.1. Les défauts de surface	19
3.2. Les défauts internes	20
3.3. Principe de la détection d'un défaut	20
<i>II. Les techniques du CND</i>	<i>21</i>
1. Analyse vibratoire.....	21
1.1. Généralités sur la vibration	22
1.2. Domaines d'Applications	29
1.3. Stratégies de surveillance vibratoire	29
2. La thermographie.....	40

Table des matières

2.1. Principe.....	41
2.2. Technique de mesure thermographique	41
2.3. Paramètres qui influent sur la thermographie infrarouge.....	43
2.4. Applications de la thermographie	43
2.5. Avantages et inconvénients de la thermographie	44
3. Ressuage	44
3.1. Objectif.....	44
3.2. Mode d'examen	45
3.3. Avantages et limites du ressuage	46
3.4. Domaine d'application	47
4. Magnétoscopie.....	48
4.1. Objectif &Principe	48
4.2. Mode d'examen	48
4.3. Avantages et limites de la magnétoscopie.....	49
5. Ultrasons	49
5.1. Principe.....	49
5.2. Domaines d'application.....	49
5.3. Avantages et inconvénients des ultrasons	50
6. Radiographie.....	50
6.1. Principe de la radiographie.....	50
6.2. Avantages et inconvénients de la radiographie	51
<i>III. Synthèse comparative.....</i>	<i>51</i>
<i>IV. Conclusion.....</i>	<i>52</i>
CHAPITRE III. ETUDE STATISTIQUE SUR L'UTILISATION DES TECHNIQUES DE MESURE EN MAINTENANCE PREDICTIVE SUR UN ECHANTILLON D'ENTREPRISES MAROCAINES	54
<i>I. Introduction.....</i>	<i>54</i>
<i>II. Méthodologie de l'Etude</i>	<i>55</i>
1. Le choix de l'échantillon	55
2. Le questionnaire d'enquête.....	56
3. La mesure des variables.....	57
<i>III. Résultats</i>	<i>57</i>

Table des matières

1. Présentation générale des entreprises marocaines	57
2. La maintenance dans les entreprises marocaines	59
3. Les techniques de mesure en maintenance préventive	62
3.1. Secteur chimie	62
3.2. Secteur Agroalimentaire	66
3.3. Secteur Automobile	68
3.4. Secteur Service	70
3.5. Textile	72
3.6. Synthèse	72
<i>IV. Discussion & Conclusion</i>	<i>73</i>
CHAPITRE IV. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE MISE EN PLACE D'UNE MAINTENANCE PREDICTIVE BASEE SUR LES CONTROLES NON DESTRUCTIFS	75
<i>I. Introduction</i>	<i>75</i>
<i>II. Démarche de mise en place de la MPCND</i>	<i>77</i>
4. Phase 1 : Collecte de données :	79
5. Phase 2 : définition des grandeurs physiques	79
6. Phase 3 : Etude de la faisabilité	79
7. Phase 4 : Phase de préparation	80
8. Phase 5 : Phase de mise en place	81
9. Phase 6 : Phase d'évaluation et d'amélioration	82
<i>III. Etude de Cas</i>	<i>83</i>
1. Phase 1 : Collecte de données	84
1.1. Sélection les axes de progrès	84
1.2. Classification des équipements	85
1.3. Evaluation de la performance des équipements	87
2. Phase 2 : Définition des grandeurs physiques	89
3. Phase 3 : Etude de la faisabilité	90
3.1. Faisabilité technique	90
3.2. Faisabilité organisationnelle	91
3.3. Faisabilité financière	96
4. Phase 4 : Phase de préparation	98

Table des matières

4.1. Choix du responsable du projet.....	98
4.2. Sélection des équipements à surveillance	98
4.3. Sélection des paramètres de surveillance	98
4.4. Définition de la stratégie de surveillance	98
4.5. Déterminer les points d'interventions	99
5. Phase 5 : Phase de mise en place	102
5.1. La création des dossiers machines	102
5.2. La définition d'un plan de formation continue.....	102
5.3. La mise en place des indicateurs de performance	104
5.4. La mise en place des procédures de mise en œuvre.....	105
5.5. Analyse des pannes	108
6. Phase 6 : Phase d'évaluation et d'amélioration	109
<i>IV. Conclusion.....</i>	<i>116</i>
CHAPITRE V. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	117
Références.....	119

Liste des figures

Figure 1. Répartition des coûts des défaillances, [1].....	6
Figure 2. Le contenu de la fonction maintenance.	7
Figure 3. Evolution de la maintenance depuis 1940	8
Figure 4. Les différents types de maintenance	10
Figure 5. La mise en place de la maintenance prédictive.....	14
Figure 6. Les deux grandes familles du Contrôle Non Destructif.....	17
Figure 7. Les étapes de la détection d'un défaut	20
Figure 8. Mouvement d'une masse suspendue à un ressort	22
Figure 9. Représentation du mouvement d'un système simple.....	23
Figure 10. La nature d'une vibration.....	24
Figure 11. Choix des grandeurs physiques à mesurer en fonction de la nature des défauts recherchés.....	25
Figure 12. Le comportement et les composants d'un piézo-électrique.....	27
Figure 13. Schéma illustratif des différentes directions radiales et axiales	30
Figure 14. Nomogramme déplacement-vitesse-accélération	31
Figure 15. Signal temporel d'un balourd et son spectre théorique.....	35
Figure 16. Spectre caractéristique d'un défaut d'alignement d'arbres.....	36
Figure 17. Fréquences caractéristiques d'un défaut de courroie	36
Figure 18. Spectre d'un défaut localisé de courroie	37
Figure 19. Spectre d'un engrenage sain	37
Figure 20. Spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	38
Figure 21. Caractéristiques d'un roulement	38
Figure 22. Spectre d'un défaut de type écaillage sur la bague externe	39
Figure 23. Représentation schématique du système de détection thermographique.....	42
Figure 24. La détection des défauts selon la méthode Ressuage.....	45
Figure 25. Représentation schématique des situations couramment utilisées industriellement..	46
Figure 26. Schéma de principe de la méthode de la magnétoscopie	48
Figure 27. Schéma de principe des ultrasons	49
Figure 28. Principe de la méthode radiographie	51

Liste des figures

Figure 29. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure selon les entreprises chimiques marocaines de notre échantillon	65
Figure 30. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure pour les entreprises agroalimentaires marocaines de notre échantillon	67
Figure 31. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure selon les entreprises automobiles marocaines de notre échantillon	69
Figure 32. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure selon les Entreprises de Service Marocaines	71
Figure 33. Les six phases de notre démarche de mise en place de la maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs	76
Figure 34. Démarche de mise en œuvre de la MPCND	78
Figure 35. Schéma bloc des différents ateliers d'office phosphorique	83
Figure 36. Les 5 procédés de l'atelier sulfurique d'office phosphorique.....	83
Figure 37. Résultat de la classification des équipements de l'atelier sulfurique.....	87
Figure 38. Algorithme décisionnel sur la technique ou bien les techniques de mesure à utilisée	90
Figure 39. Algorithme décisionnel sur la faisabilité technique des CND	91
Figure 40. Conséquences des arrêts de production en terme de coût.....	97
Figure 41. Etapes de l'élaboration de l'AMDE.....	99
Figure 42. Algorithme constructif du plan de formation	103
Figure 43. Structure d'un réseau de neurones non bouclé	110
Figure 44. La structure neuronale associée à l'équipement chaudière.....	111
Figure 45. La structure neuronale associée à la turbosoufflante	112

Liste des tableaux

Tableau 1. Domaines d'Applications Courantes de l'Analyse de Vibration	29
Tableau 2. Critères Vibratoires de Sécurité Suivant la Norme ISO 10816.....	32
Tableau 3. Critères Vibratoires de Sécurité Suivant la Norme ISO 2372.....	33
Tableau 4. Critères Vibratoires de Sécurité Suivant la Norme E90-300.....	34
Tableau 5. Avantages et Inconvénients de l'Analyse Globale.....	34
Tableau 6. Avantages et Inconvénients de l'Analyse Fréquentielle	40
Tableau 7. Avantages et Inconvénients de la Thermographie.....	44
Tableau 8. Avantages et Limites du Ressuage	47
Tableau 9. Avantages et inconvénients de la magnétoscopie	49
Tableau 10. Domaine d'Application des Ultrasons	50
Tableau 11. Avantages et Inconvénients des Ultrasons	50
Tableau 12. Avantages et Inconvénients de la Radiographie.....	51
Tableau 13. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure.....	52
Tableau 14. Répartition des industries qui ont renseigné le questionnaire selon leur secteur d'activités	56
Tableau 15. Le marché, la clientèle et les caractéristiques de la production de notre échantillon.....	58
Tableau 16. L'organisation générale, le suivi technique et le type de la maintenance pratiqué dans notre échantillon.....	60
Tableau 17. Les principaux avantages et inconvénients de chaque technique de mesure pour les entreprises chimiques de notre échantillon	62
Tableau 18. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure pour les Entreprises Chimiques Marocaines de notre échantillon	65
Tableau 19. Les avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure selon les entreprises agroalimentaires qui ont renseigné le questionnaire :.....	66
Tableau 20. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure pour les Entreprises Agroalimentaires Marocaines de notre échantillon.....	67
Tableau 21. Les principaux avantages et inconvénients de chaque technique de mesure pour les entreprises automobiles de notre échantillon.....	68
Tableau 22. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure pour les Entreprises d'Automobile Marocaines.....	69

Liste des tableaux

Tableau 23. Les principaux avantages et inconvénients de l'analyse vibratoire et la thermographie pour les entreprises de service de notre échantillon.....	70
Tableau 24. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure pour les Entreprises de Service Marocaines	71
Tableau 25. Les techniques de Mesure utilisé dans chaque secteur d'activité de notre échantillon	72
Tableau 26. Analyse des forces, faiblesse, menaces et opportunités de l'atelier sulfurique....	84
Tableau 27. Les Critères TDPC et barème associé.	86
Tableau 28. Classes et score de la méthode TDPC	87
Tableau 29. La grille de maturité de la maintenance	93
Tableau 30. Le résultat de l'évaluation de la grille de maturité de la maintenance au sein de l'atelier étudié.....	96
Tableau 31. Evaluation de la criticité.....	100
Tableau 32. Résultat AMDEC	101
Tableau 33. Planification de la formation d'analyse vibratoire	104
Tableau 34. tableau des contre-mesures d'équipement chaudière	105
Tableau 35. Check-list d'inspection et des contrôles d'équipement chaudière	106
Tableau 36. Check-list des travaux de l'arrêt froid	106
Tableau 37. Tableau des contre-mesures de turbosoufflante	107
Tableau 38. Check-list d'inspection et des contrôles de la Turbosoufflante.....	108
Tableau 39. Les variables associées à l'équipement chaudière.....	111
Tableau 40. Les variables associées à la Turbosoufflante	112
Tableau 41. Poids des critères et échelle des mesures	114
Tableau 42. Performances des CND	115
Tableau 43. Classement des CND	115

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AFNOR	:	Association Française de NORmalisation
AMDE	:	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets
AMDEC	:	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité
CE	:	Conformité Européenne
CND	:	Contrôle Non Destructif
GMAO	:	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
ISO	:	International Organization for Standardization
MC	:	Maintenance Corrective
MP	:	Maintenance Prédictive
MPCND	:	Maintenance Prédictive basée sur les CND
MTBF	:	Mean Time Between Faillures
MTTF	:	Mean Time To Faillures
MTTR	:	Mean Time To Repair
NF	:	Norme Française
PME	:	Petites et Moyennes Entreprises
RCM	:	Reliability Centered Maintenance
SWOT	:	Strenghts - Weaknesses - Opportunities - Threats
TPM	:	Total Productive Maintenance
TRS	:	Taux de Rendement Synthétique

INTRODUCTION GENERALE

Dans le contexte actuel d'ouverture des marchés à la concurrence, les entreprises doivent améliorer leur compétitivité voire leur productivité. Il s'agit de produire plus à moindres coûts, afin d'avoir une meilleure disponibilité des moyens de production tout en dépensant moins.

L'utilisation des systèmes de plus en plus complexes pour faire face aux enjeux de durabilité, de compétitivité, de sûreté et de sécurité fait apparaître des problèmes de maintenance qui est une des clés de l'optimisation des systèmes technologiques et industriels.

La fonction maintenance conditionne fortement le niveau de performance d'une installation, son optimisation est complexe car elle doit prendre en compte différents critères parfois antagonistes comme par exemple la disponibilité et les coûts [1] [2].

Par ailleurs, il y a une multitude de technique pour maintenir une installation. On peut ajuster sur le type de maintenance, sur les types de tâches, sur leur fréquence, sur le niveau d'intervention, etc....

Pour effectuer ces choix stratégiques, des méthodes permettant d'optimiser les performances des systèmes sont appliquées [3]. Les responsables de maintenance en viennent ainsi à envisager de véritables stratégies et ne se contentent plus de surveiller et de réparer, plutôt, ils cherchent à prévoir et à évaluer les défaillances en s'appuyant sur les techniques de la surveillance et le diagnostic de l'état de fonctionnement.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) de la maintenance prédictive, ces techniques sont destinées à examiner les pièces, les matériaux ou les installations. Elles permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans détruire et sans perturber les lignes de production. Ces techniques de CND sont devenues incontournables pour augmenter la fiabilité, la sûreté ou la durée de vie des installations [19].

Il existe une grande variété de techniques de mesure de CND, le choix d'une technique du CND à l'autre dépend d'un grand nombre de facteurs, tels que la nature des matériaux

constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme du défaut, ...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce, ...) et les problèmes économiques. Du fait de cette variété de techniques de mesure, il est toujours possible de trouver la technique la plus convenable pour juger l'état des machines industrielles. Il ne faut toutefois pas oublier que ces différentes techniques possèdent des avantages et aussi des inconvénients.

Dans ce contexte, notre objectif est de recenser les principales limites et les principaux avantages de chaque technique de mesure (analyse vibratoire, thermographie, radiographie, ressuage, magnétoscopie et ultrasons, selon les critères de rapidité, de coût, de reproductibilité, de fiabilité, de sensibilité et de résolution dans divers secteurs d'activité (agroalimentaire, automobile, textile, service,...) en tenant compte des caractéristiques de la production (continue, discontinue, par projet) à travers un questionnaire.

Ce questionnaire a pour but de faire aussi un état des lieux sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance préventive pour appréhender la situation dans les entreprises marocaines, c'est-à-dire, on cherche à travers notre échantillon d'entreprises marocaines, les entreprises industrielles qui utilisent les techniques de mesure de la maintenance prédictive dans leurs programmes de maintenance.

La synthèse des résultats de ce questionnaire nous a menée à proposer une méthodologie de mise en place de la maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs (MPCND), cette démarche s'articule sur six phases complémentaires : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.

Dans le but d'exploiter et de valider notre démarche proposée, une étude de cas a été faite au sein de l'atelier sulfurique qui est l'un des ateliers d'un office phosphorique.

Ainsi ce manuscrit est organisé en cinq chapitres qui peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Chapitre	Description
I	Le premier chapitre est dédié à la présentation du contexte général en maintenance, également un point sur l'évolution de la maintenance et sa mise en œuvre depuis les années 40 jusqu'à nos jours. Maintenances : corrective, préventive, prédictive seront détaillées.
II	Le second chapitre présente un aperçu global des techniques du CND les plus répandues industriellement : l'analyse vibratoire, la thermographie, la radiographie, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons. En présentant leurs intérêts et leurs défauts, les différents types de défauts qui peuvent être rencontrés dans les matériaux utilisés dans l'industrie, aussi qu'une synthèse comparative à la fine.
III	Le troisième chapitre est consacré à l'étude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines, ce chapitre dresse un état des lieux des entreprises marocaines en matière d'utilisation des techniques de mesure CND en maintenance prédictive. L'objectif étant de recenser les principaux avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure (analyse vibratoire ; thermographie ; radiographie ; ressuage ; magnétoscopie et ultrasons) en tenant compte des caractéristiques de la production (continue, discontinue, par projet) et du secteur d'activité (agroalimentaire, automobile, textile, service,...).
VI	Le quatrième chapitre est dédié à la proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les Contrôles Non Destructifs (MPCND), qui s'articule en six phases complémentaires : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et la phase d'évaluation et d'amélioration.
V	le cinquième chapitre est consacré à une discussion sur le rôle que notre approche peut apporter pour l'amélioration et la planification d'une politique de maintenance préventive. Nous apporterons une conclusion et des perspectives sur les travaux présentés.

CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL DE LA MAINTENANCE

Dans ce premier chapitre, nous présenterons le contexte général de la maintenance industrielle et les types de maintenance. Nous ferons également un point sur l'évolution et la mise en œuvre des différents types (ou catégories) de maintenance depuis les années 40.

I. Introduction

La maintenance industrielle, dont son objectif principal d'assurer le bon fonctionnement et la disponibilité des équipements industriels, est une fonction stratégique dans les entreprises. Étroitement liée à un développement continu de la technologie, l'émergence de nouvelles formes de gestion et à la nécessité de réduire les coûts de production.

Réparer les machine, n'est plus le seul but de la maintenance aujourd'hui, mais aussi prévoir et éviter les pannes et les défaillances, car le moindre aléa indésirable peut provoquer ou remettre en cause la production ou mettre en péril le système lui-même. Au cours de son adaptation perpétuelle, l'activité des personnels de maintenance a également évolué, afin de combiner les compétences technologiques, organisationnelles et aptitudes relationnelles.

Dans l'entreprise, la fonction " maintenance " mérite une attention de plus en plus grande, parce qu'elle est de moins en moins souvent à remettre en état l'outil de production mais de plus en plus fréquemment pour éviter ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le mauvais fonctionnement de celui-ci et l'incapacité à respecter les délais qui s'ensuivent, cause des coûts directs et indirects de défaillance que l'entreprise n'est plus en mesure de supporter, la répartition des divers coûts sont représentés sur la figure 1 [1]. Elle ne peut plus attendre que la défaillance se produise pour y rectifier, mais elle doit prendre des dispositions pour effectuer les diverses opérations qui permettent de l'éviter. La conception des équipements qui sont requis pour des disponibilités opérationnelles maximales ne peut se faire sans méthodes éprouvées ni sans données pertinentes en matière de maintenabilité et de fiabilité. C'est le passage de la « *maintenance curative* » à la « *maintenance préventive* ».

Dans un premier temps, les actions préventives étaient effectuées de façon périodique « maintenance préventive systématique » selon des plannings prédéfinis. Les pannes et les défaillances sont effectivement anticipées par le remplacement de certains composants en voie de dégradation, mais au prix d'une augmentation importante des coûts de maintenance. Grace

à cette « *maintenance systématique* », les risques de pannes ont connu une diminution par rapport à la « *maintenance curative* », mais la probabilité de casse entre deux visites est toujours présente, ainsi que le risque de mauvaises conditions de redémarrage lors de l'arrêt de la machine, et parfois les coûts de visites sont parfois inutiles. Afin d'éviter ces inconvénients, on est passé à une « *nouvelle maintenance* ».

Cette "*nouvelle maintenance*" est basée sur des techniques de contrôle et de diagnostic. Ce type de la maintenance est baptisée "*maintenance prédictive*", il permet de remplacer les composants juste avant leur défaillance en s'appuyant sur les techniques de prévision des défauts.

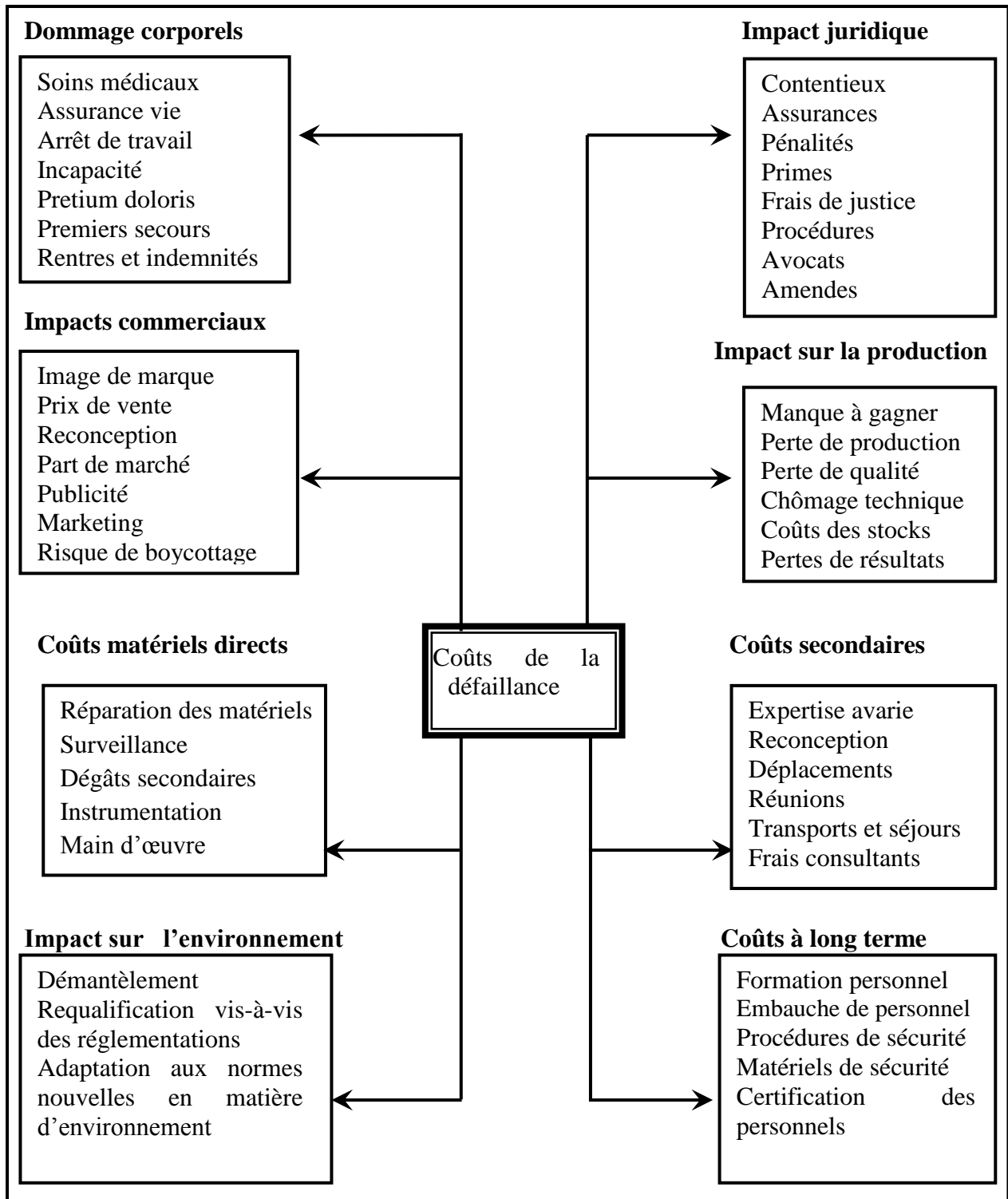


Figure 1. Répartition des coûts des défaillances, [1]

1. Définition de la maintenance

La Norme AFNOR X 60-010 [2] définit la maintenance comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

Richet [3] définit la maintenance comme étant « *l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management* ».

Maintenir c'est donc effectuer des opérations de réparation qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimum.

Retour & al [4] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion comme le montre la figure 2.



Figure 2. Le contenu de la fonction maintenance.

La norme européenne NF EN 13303X 60-319[5] définit en totalité la fonction maintenance. De manière plus pragmatique, un système de production n'est performant que si sa finalité, les objectifs qui lui sont attribués, les résultats qu'il fournit et les moyens (financiers, stratégiques, technologiques et humains) qu'il met en œuvre, sont en parfaite cohérence [6]. D'autres définitions de ce concept peuvent être trouvées dans [7] et [8].

2. Evolution de la notion de maintenance

Les premières approches scientifiques de la gestion de maintenance datent des années quarante [9]. Depuis cette époque, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure 3) :

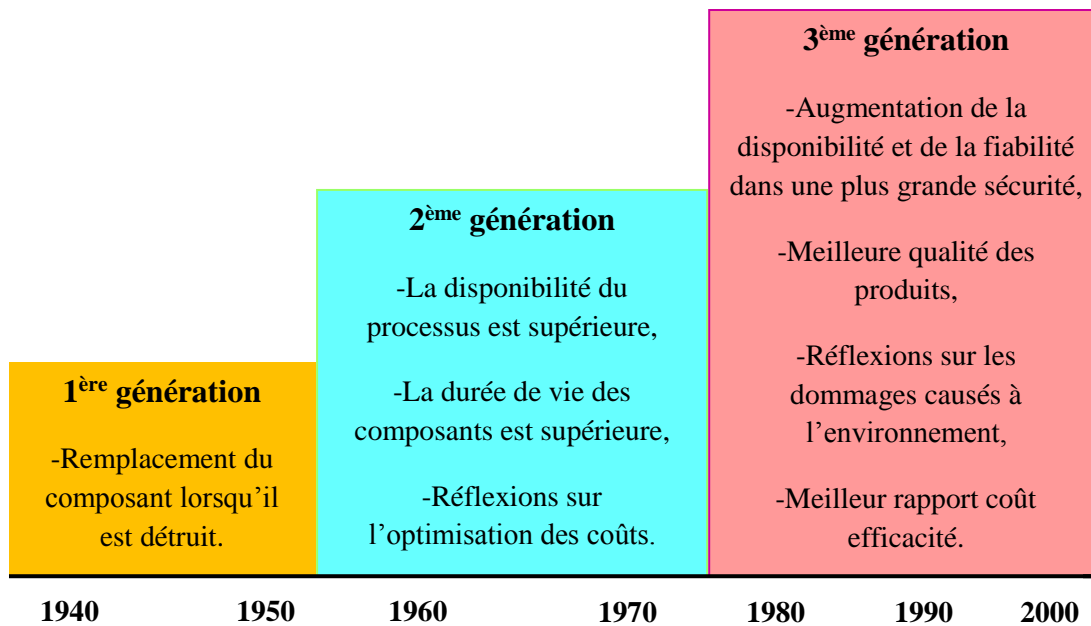


Figure 3. Evolution de la maintenance depuis 1940

La première génération couvre la période jusqu'à la deuxième guerre mondiale. Au cours de cette période, les équipements étaient techniquement plus simples qu'aujourd'hui et, par conséquent, facile à réparer, les activités d'entretien se résumaient au nettoyage et lubrification.

La deuxième génération, a connu des changements considérables. Avec l'arrivée des années 50, la demande des marchandises a augmenté de façon significative, mais à l'issue de la guerre, le volume de la main-d'œuvre industrielle a connu une grave diminution [10]. Durant les années 50, un grand nombre des machines apparaissent de plus en plus complexes. Pour maintenir ou accroître ses performances, l'industrie a commencé à en dépendre. La gestion des temps d'arrêt a commencé à prendre en considération dans l'orientation générale de l'organisation. Cela conduit à l'idée que les défauts des équipements pourraient et devraient être évités, cette idée mène à son tour à la notion de maintenance préventive. Dans les années 60, cette maintenance préventive consiste principalement à effectuer des révisions à intervalles fixes sur les composants. Le coût de la maintenance commence à augmenter fortement par rapport à d'autres coûts d'exploitation. Cela provoque la croissance de la planification des systèmes de contrôle et de la maintenance.

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

- nouvelles attentes,
- nouvelles recherches,
- nouvelles techniques [9].

La complexité de l'outil de production est confronté à un double défi au « *développement durable / souplesse et réactivité* ». Cela exige que chacun des sous-processus de production apporte sa propre contribution à la réalisation de la performance globale. En ce sens, le processus de maintien en conditions opérationnelles met en œuvre un ensemble d'activités et de logistique afin de garantir, tout au long de la phase d'exploitation, l'objectif attendu du système.

3. Les types de la maintenance

Le premier type se réfère à l'aspect correctif, ce dernier permet de réagir, par des dépannages ou des réparations, juste après l'apparition d'une panne. Le second se réfère à une action préventive, son but est d'effectuer des tâches, selon un programme établi, permettant d'anticiper et donc d'éviter une défaillance (fig.4). On peut conclure donc qu'il y a deux catégories de la maintenance [11] [12] : la maintenance corrective (MC) et maintenance préventive (MP).

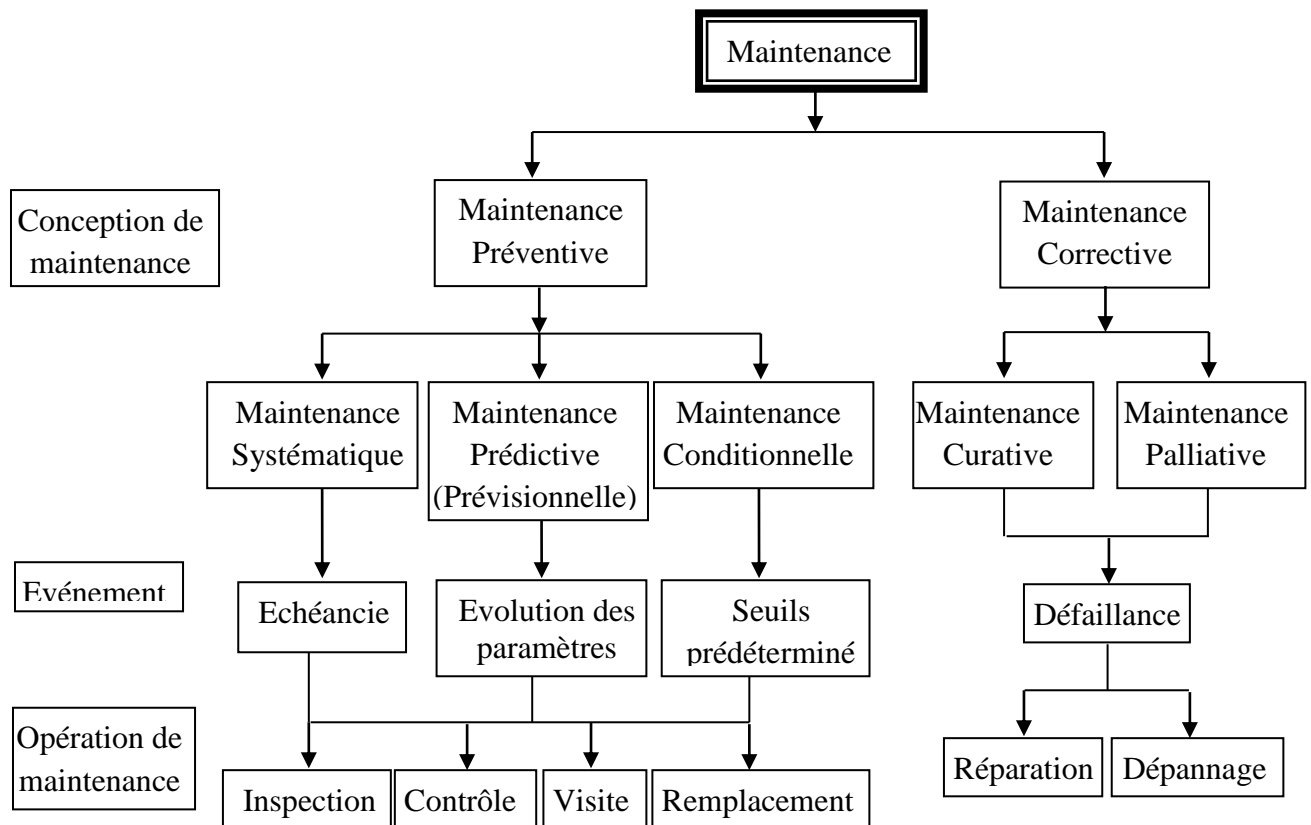


Figure 4. Les différents types de maintenance

II. La maintenance corrective

La norme AFNOR X 60010 définit la maintenance corrective (MC) comme étant «l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. Ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance partielle ou complète et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, et enfin le contrôle du bon fonctionnement» [13].

Elle correspond à des activités entreprises pour détecter, isoler et rectifier un défaut de sorte que le matériel en panne, machine ou système peut être restauré à son état fonctionnel normal. Elle s'applique automatiquement aux défaillances soudaines.

La maintenance corrective peut être :

- **palliative** : Elle comprend les travaux de maintenance corrective destinées à permettre à un équipement d'accomplir provisoirement une fonction requise. Connue sous le nom de dépannage, cette maintenance palliative se compose

principalement de mesures temporaires qui doivent être suivis par des actions curatives ;

- **curative** : Elle comprend les actions de la maintenance corrective destinées à rétablir l'équipement à un état donné ou à lui permettre d'exécuter une fonction exigée. Le résultat des activités menées devraient être de caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou d'améliorations conçues pour éliminer la défaillance ;

Ce type de maintenance est réservé au matériel peu coûteux, non stratégique pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité, et lorsque l'indisponibilité du système n'a pas de conséquences majeures ou lorsque les exigences de sécurité sont faibles.

III. La maintenance préventive

Selon la norme AFNOR, La Maintenance Préventive (MP) « *est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu* » les interventions sont prévues, préparées et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Elle est caractérisée par les actions suivantes :

- **L'inspection** qui consiste en une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie et qui n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Cette activité peut s'exercer au moyen de rondes ;
- **La vérification de conformité** avec des données préétablies, suivie d'un jugement. Elle peut comporter une activité d'information, inclure une décision (acceptation, rejet, ajournement) et déboucher sur les actions correctives ;
- **La visite** (de maintenance) consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou d'une partie (visite limitée) des différents éléments de la machine et pouvant impliquer des opérations de maintenance de premier niveau. Certaines opérations de maintenance corrective peuvent être effectuées suite à des anomalies constatées lors de cette visite ;

On distingue trois types de maintenance préventive : La maintenance systématique ; La maintenance conditionnelle et la maintenance prédictive.

1. La maintenance systématique

« *La maintenance préventive systématique comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant* » [13]. Les interventions sont effectuées à intervalles fixes. Ces intervalles sont déterminés d'abord sur la base des préconisations du constructeur, puis en se basant sur les résultats recueillis lors des visites préventives périodiques.

Cette méthode nécessite de connaître : le comportement des équipements, les usures et les modes de dégradation. Elle intervient à intervalles fixés sur la base du minimum de vie des composants donnés par l'expérience ou par le constructeur. C'est pourquoi ce type de maintenance est aussi appelé maintenance préventive basée sur la durée de fonctionnement [14].

La maintenance préventive systématique se traduit donc par deux types d'actions :

- Des interventions planifiées qui consistent à nettoyer, réparer ou remplacer certains matériels tels que des composants ou sous-ensembles d'équipements ;
- des inspections périodiques qui consistent à contrôler ces mêmes composants et sous-ensembles, d'effectuer des révisions, mineures ou majeures, d'équipements, voire d'ateliers entiers lors d'arrêts généraux.

2. La maintenance conditionnelle

C'est « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information donnée par un capteur, mesure d'une usure,...) révélateur de l'état de dégradation d'un bien » [13]. Cette forme de maintenance permet d'assurer le suivi du matériel pendant son fonctionnement dans le but de prévenir les défaillances attendues. Elle n'applique pas la connaissance de la loi de dégradation et le démontage du matériel. L'intervention n'a lieu que si certains paramètres mesurables atteignent un seuil critique prédéterminé et révélateur d'une défaillance imminente.

C'est donc une maintenance qui dépendant de l'expérience et fait intervenir des informations recueillies en temps réel [15]. La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause, à brève échéance, ses performances.

3. La maintenance prédictive

C'est une « *maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien* » [5]. Elle consiste à surveiller et à analyser en temps réel l'état d'une pièce et à avertir un responsable de la maintenance si une dégradation apparaît, afin qu'il prenne la décision la plus appropriée. Cette dernière, fiable mais coûteuse, est essentiellement utilisée sur les grands systèmes.

3.1. Les objectifs de la maintenance prédictive

Les objectifs de la maintenance prédictive peuvent se résumer à [16] :

- *La diminution du nombre de pannes.*
- *La meilleure connaissance de l'état réel du parc machines.*
- *L'augmentation de la longévité du matériel.*
- *La meilleure planification des interventions de remise en état.*
- *La réduction de la non-qualité et des pertes de matières et d'énergie.*
- *L'amélioration de la sécurité du personnel.*

3.2. La mise en place de la maintenance prédictive

Pour mettre en place une maintenance prédictive il est nécessaire de suivre le logigramme suivant [17] :

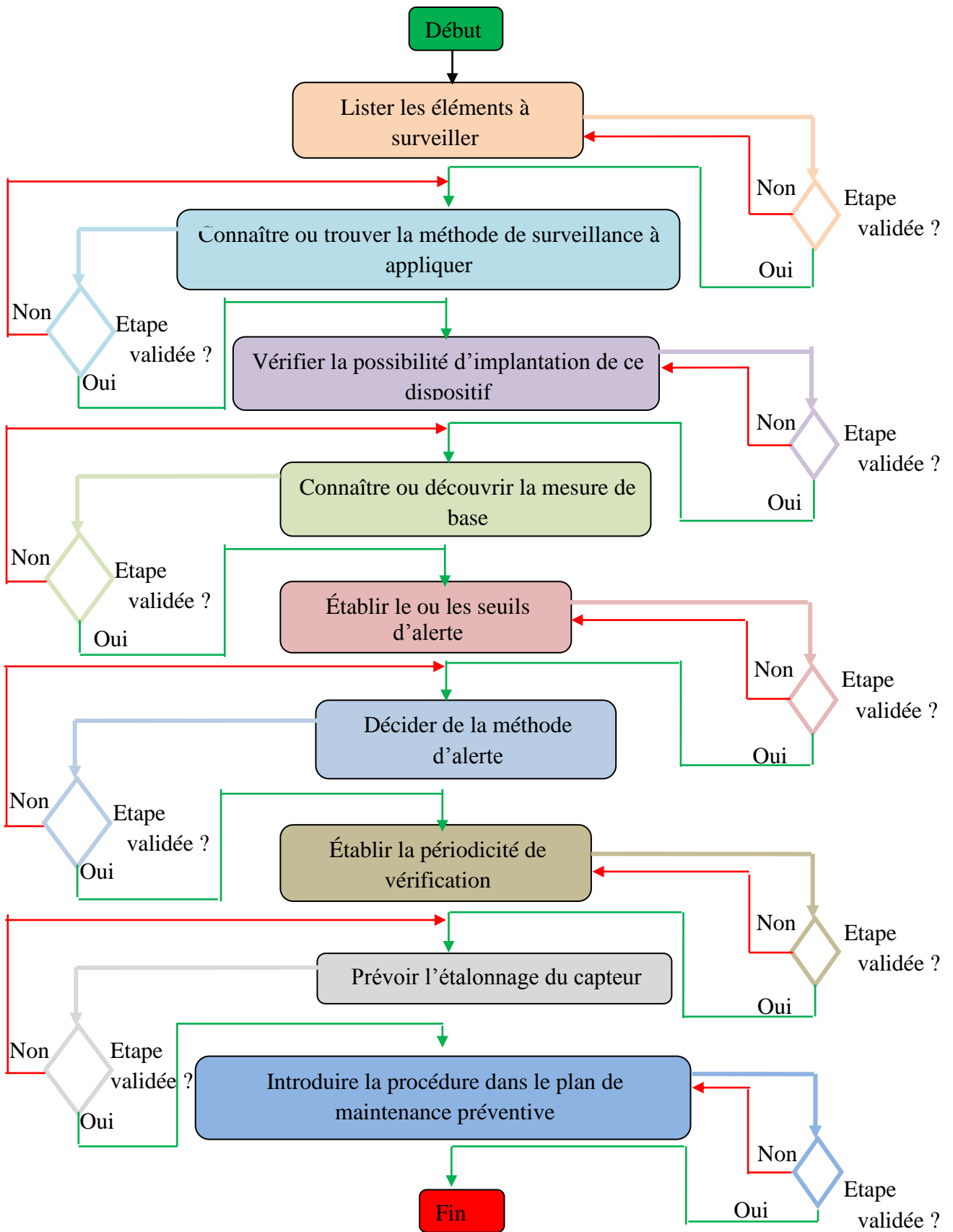


Figure 5. La mise en place de la maintenance prédictive

IV. Conclusion

Les activités d'entretien, au sens de dépannage de l'équipement, ont toujours existé. Mais ces activités ont été initialement peu ou pas formalisées : elles n'étaient pas nécessairement assurées par du personnel spécialisé ou encadré par des méthodes spécifiques. En outre, elles consistaient essentiellement à réparer un équipement une fois que celui-ci était défaillant, mais n'intégraient que peu la notion de "préventif", c'est-à-dire des interventions visant à prévenir la panne.

La fonction de maintenance ne peut se réduire à la seule activité d'entretenir un parc de machine mais a vocation à intervenir dans tout le cycle de l'exploitation du système (choix et conception du matériel, mise en service, détermination des plans de maintenance, organisation et logistique des activités de maintenance, suivi de l'évolution du système, etc.).

Dans le but de réduire les coûts de maintenance et de maximiser la durée de fonctionnement, et d'éviter les défaillances qui risqueraient de ralentir et même d'arrêter la production, le programme de maintenance doit se diriger vers une maintenance prédictive, qui utilise de nombreuses techniques du Contrôle Non Destructif (analyse vibratoire, thermographie, radiographie, ressuage, magnétoscopie).

Vu que les systèmes mécaniques et les machines constituant la majorité des équipements industriels, le contrôle de vibration constitue généralement l'élément-clé des programmes de maintenance prédictive. Néanmoins, cette technique ne peut fournir toute l'information requise. En effet, elle permet seulement de contrôler les conditions mécaniques, et ne mesure pas les autres paramètres nécessaires au maintien de la fiabilité et du rendement.

Pour cette raison, une démarche de maintenance prédictive complète doit également faire appel à d'autres techniques de contrôle et de diagnostic telles que : la thermographie, la radiographie, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons.

Dans le chapitre suivant nous allons nous focaliser sur les techniques de mesure de maintenance (CND) qui ont pour objectif de prévenir, d'éviter les dysfonctionnements de systèmes très divers et souvent complexes, ce chapitre fournira une description précise et les avantages ainsi que les inconvénients de chacune de ces techniques de CND, et une synthèse comparative in fine.

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES CONTROLES NON DESTRUCTIFS

Ce chapitre, donne un aperçu global des techniques du Contrôle Non Destructif CND les plus répandues industriellement en présentant leurs intérêts et leurs défauts, les différents types de défauts qui peuvent être rencontrés dans les matériaux utilisés dans l'industrie, aussi qu'une synthèse comparative in fine.

I. Introduction

La majorité des composants des machines industrielles doit satisfaire à des exigences de la qualité élevées et sans cesse croissantes, le maintien des machines en bon état lors de la production est donc devenu un point fondamental pour le succès d'un produit ou d'une entreprise. Grâce aux techniques de mesure de maintenance prédictive (CND), il est possible de satisfaire ces exigences complexes avec succès et de réduire les coûts de la maintenance [18].

Le Contrôle Non Destructif (CND) est destiné à examiner les pièces, les matériaux ou les installations. Les techniques de Contrôle Non Destructif s'attaquent à des pièces complexes (par leur structure ou leur composition), aux matériaux nouveaux (comme les céramiques ou les composites organiques) et aux mesures extrêmes (comme la chasse au micron). C'est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances [19].

Les Contrôles Non Destructifs, sont aujourd'hui essentiels pour la plupart des sociétés de production industrielle, qui, pour produire, ont besoin de contrôler, sans détruire et sans perturber leurs lignes de production. Dans le domaine de la maintenance également, les CND sont devenus incontournables pour augmenter la fiabilité, la sûreté ou la durée de vie des installations [20].

Nombreuses sont les techniques qui doivent être utilisées dans un programme de maintenance [18]. Le choix d'une méthode de contrôle est guidé par la nécessité de reconnaître les défauts réputés que l'objet peut contenir.

On peut classer les méthodes de Contrôle Non Destructif en deux grandes familles “Figure.6” : les techniques d’inspection de surface (elles détectent essentiellement, ou seulement, les discontinuités débouchant en surface ou sous-cutanées) et celles de contrôle en profondeur, dans le volume du matériau [21].

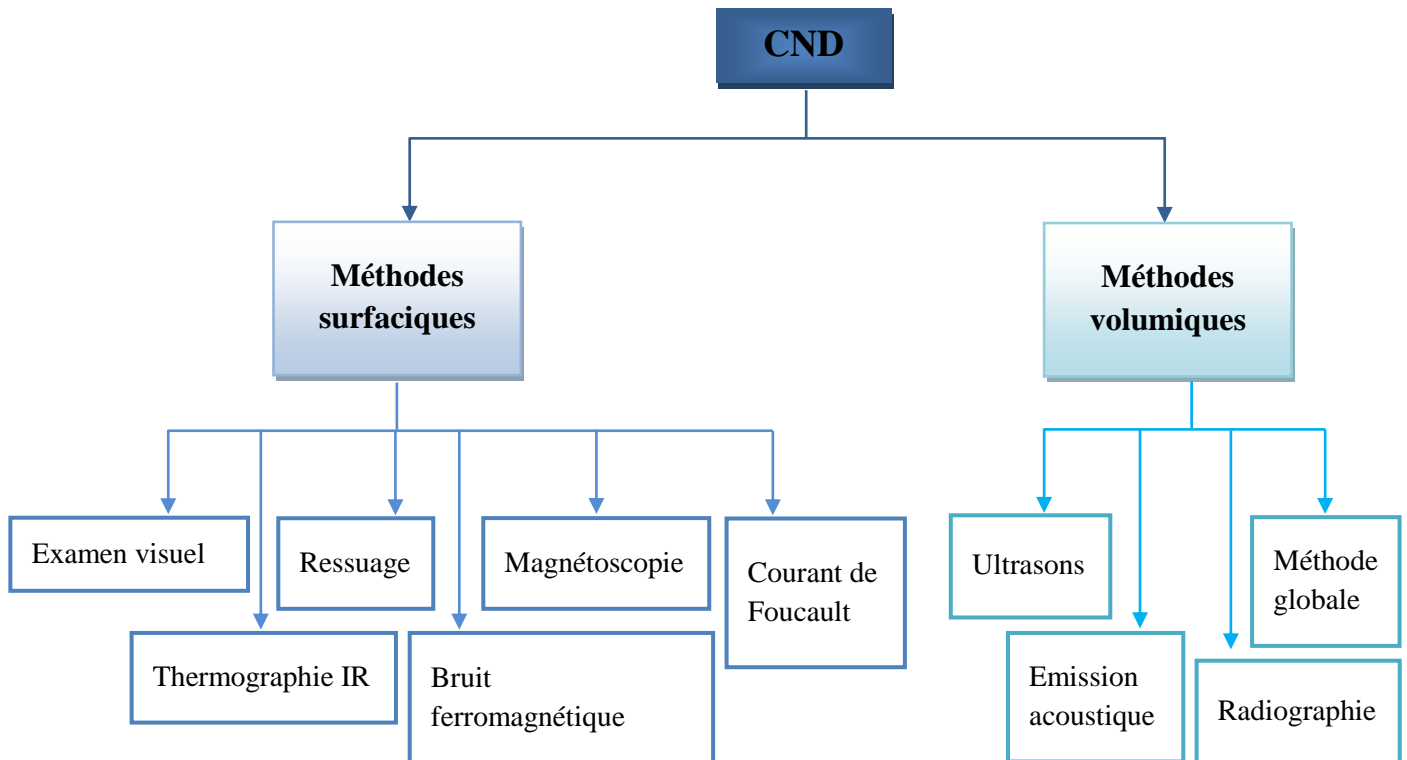


Figure 6. Les deux grandes familles du Contrôle Non Destructif

1. Historique du CND

Afin de parler de l’histoire du CND et notamment l’augmentation de son degré d’acceptation, il nous est indispensable de passer par la documentation de Bentz qui l’illustre vivement dans son livre "Principles of Magnetic Particle Testing" dans le chapitre "Tree of Growth' of Non-destructive Testing" en 1967. À partir de l'année 1970, son illustration particulière n'est plus prise en considération, les deux décennies suivantes étaient une période de poursuite d'extension d'acceptation et de croissance. Dans le même contexte, il est particulièrement intéressant de prendre en considération les forces motrices qui ont alimenté cette extension. Dans un premier temps, le développement pourrait être lié à l’industrie de la construction navale. En 1950 l’industrie nucléaire, la recherche de nouvelles technologies de contrôle pour soutenir les développements parallèles dans les matériaux et les applications pour la production d’énergie parrainait la majeure partie du développement et de l’extension. Cependant en 1970, les technologies de l’énergie en général ont été la création de nouvelles

demandes pour de nouvelles applications, de nouveaux matériaux et de nouveaux problèmes, en 1980, c'était la maturation de l'industrie. Bien qu'il reste encore un fort intérêt pour les nouveaux matériaux et les applications et les exigences ci font sur la technologie d'inspection, la force motrice plus grande est peut-être un effort commun pour la qualité des produits. En 1990, l'assurance de la qualité continuera à être importante, mais nous pouvons nous attendre à voir une tendance de l'utilisation plus large de la CND pour aider à l'évaluation de l'état des installations existantes, et à la poursuite de la confiance nécessaire pour prolonger la vie de la conception des installations d'exploitation de toute nature.

2. Les objectifs du CND

Le contrôle non destructif a pour objectif, de contrôler l'état des pièces industrielles sans la détérioration de celles-ci. Il peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation de partie constituante comme l'épaisseur de la paroi [22], la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques des constitutives des matériaux et la recherche d'une rupture de ces paramètres [23]. Dans le second cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple, des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou à la fatigue mécanique.

L'utilisation du CND se produit souvent à plusieurs reprises au cours de la vie d'une pièce et devrait mieux répondre aux critères suivants [24] :

- **La rapidité d'exécution** : Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts qui se composent du temps de travail de la main-d'œuvre ou des frais de fonctionnement de l'usine.
- **Le coût** : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- **La reproductibilité** : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- **La fiabilité** : Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

- **La sensibilité** : La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- **La résolution** : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini par le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

3. Défauts et leurs origines

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela peut être des porosités, des fissures, défauts liés à des soudures, ...etc.

En effet, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes.

3.1. Les défauts de surface

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

Les défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons.

Les défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

3.2. Les défauts internes

Les défauts internes sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme la thermographie infrarouge.

3.3. Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

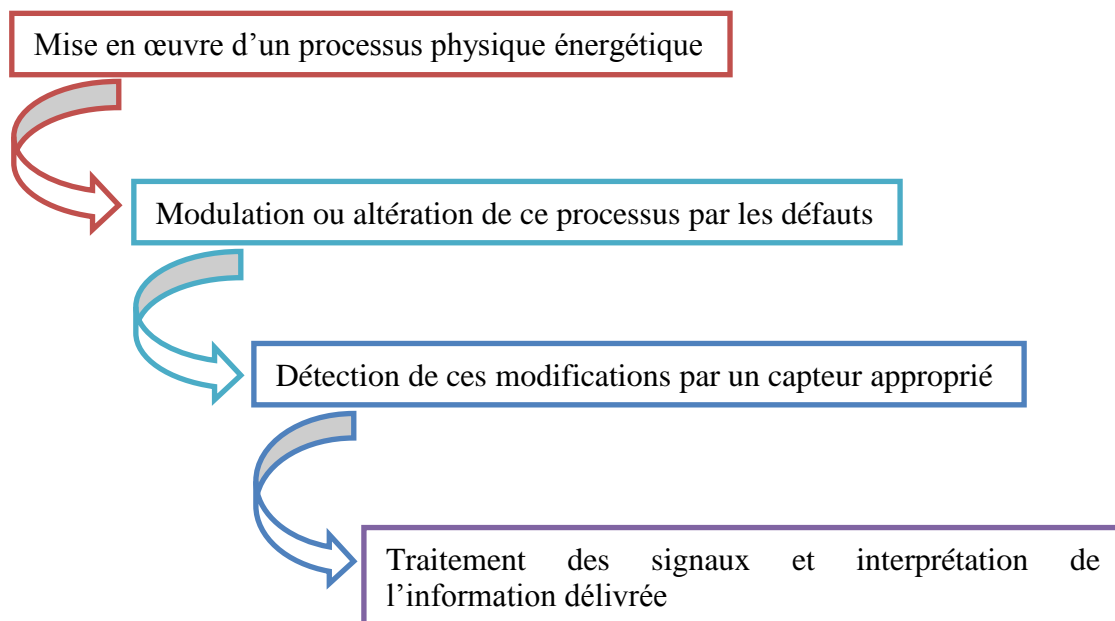


Figure 7. Les étapes de la détection d'un défaut

Les techniques CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...) ou thermique (thermographie infrarouge). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

- Les méthodes de flux, avec une excitation et une détection de même nature et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (magnétoscopie); la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes ;
- Les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont de natures différentes, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique.

II. Les techniques du CND

Dans cette partie nous allons fournir une description précise des différentes techniques de mesure en maintenance prédictive (CND) les plus utilisés dans les industries : l'analyse vibratoire ; la thermographie ; la radiographie ; le ressuage ; la magnétoscopie et les ultrasons.

1. Analyse vibratoire

La plupart des machines en fonctionnement produisent des vibrations. La détérioration du fonctionnement se traduit par une modification de répartitions de l'énergie vibratoire conduisant le plus souvent à un accroissement du niveau de vibrations [24]. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine [25] [26].

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise [27] [28].

1.1. Généralités sur la vibration

1.1.1. Définition d'une vibration :

Selon la norme NFE 90-001 : *une vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence* [29].

Un système mécanique est en vibration, s'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort (Figure 8), on constate qu'il se traduit par :

- *Un déplacement* : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- *Une vitesse de déplacement* : variation du déplacement par rapport au temps ;
- *Une accélération* : variation de la vitesse par rapport au temps.

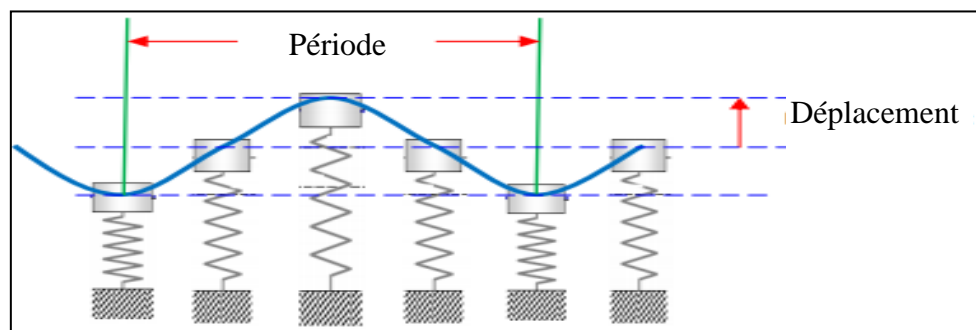


Figure 8. Mouvement d'une masse suspendue à un ressort

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération (Figure 9). La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps.

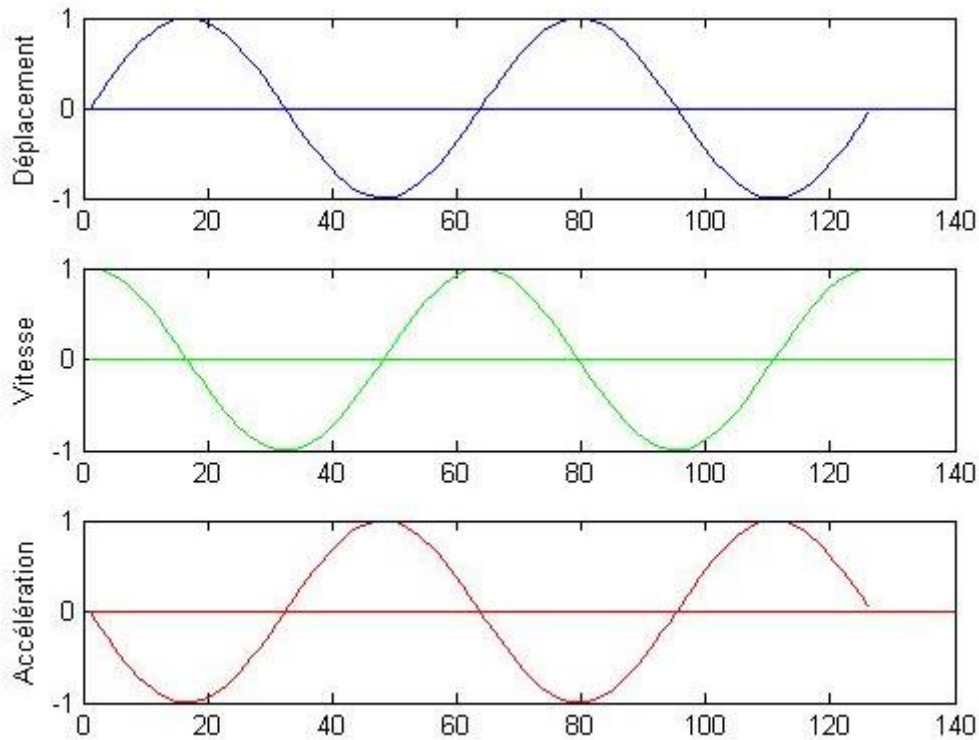


Figure 9. Représentation du mouvement d'un système simple

Les phénomènes vibratoires sont des phénomènes périodiques ou apériodiques plus ou moins complexes, qui dépendent directement des forces générées par les différents éléments internes en mouvement :

- Forces impulsionnelles (choc) ;
- Forces transitoires (variation de charge) ;
- Forces périodiques (balourd) ;
- Forces aléatoires (frottements).

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

1.1.2. Nature d'une vibration :

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante [32] [33] :

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (Figure 10.a) ou sinusoïdal complexe (Figure 10.b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre,
-

désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

- Les vibrations périodiques de type impulsif (Figure 10.c) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons...) ou par des événements anormaux (écaillage de roulements, défaut sur des engrenages...)
- Les vibrations aléatoires de type impulsif (Figure 10.d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...

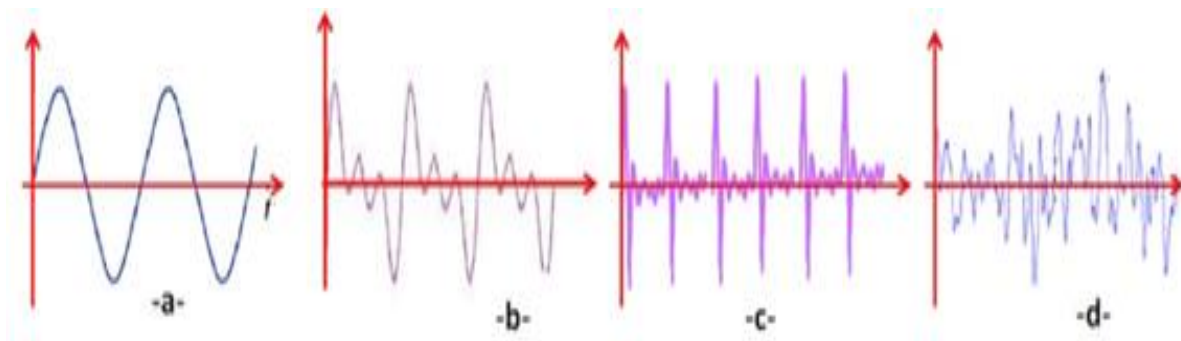


Figure 10. La nature d'une vibration

1.1.3. Choix des grandeurs physiques à mesurer :

Pour surveiller une machine, on doit choisir la grandeur physique à mesurer. Cette grandeur est appelée paramètre ou indicateur de surveillance.

1.1.3.1. Domaine de surveillance :

- Puisque le déplacement est inversement proportionnel au carré de la fréquence, la mesure en mode déplacement aura pour effet d'atténuer toutes les composantes moyennes et hautes fréquences et d'amplifier les composantes basses fréquences. Son utilisation est réservée donc aux très basses fréquences : $F \leq 100$ Hz.
- La vitesse est inversement proportionnelle à la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus la vitesse diminue. Son utilisation est réservée aux basses fréquences : $F \leq 1000$ Hz.
- L'accélération, représentative des forces dynamiques, ne dépend pas de la fréquence. C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire sur un large domaine de fréquences. $0 \leq F \leq 20000$ Hz [30] (Figure 11).

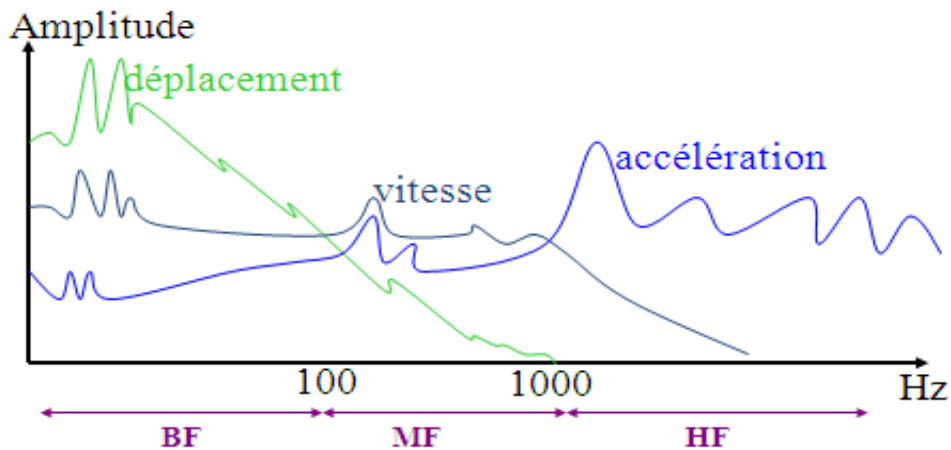


Figure 11. Choix des grandeurs physiques à mesurer en fonction de la nature des défauts recherchés

Pour rechercher un défaut, on mesure l'amplitude vibratoire en mode déplacement, vitesse ou accélération, selon que la fréquence de la composante vibratoire prépondérante induite se situe en basses, moyennes ou hautes fréquences [33].

Ces trois modes représentent un bon indicateur de l'origine du phénomène qui permet d'orienter les recherches, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

1.1.4. Capteurs de vibrations :

L'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen de capteurs de vibrations. Ceux-ci représentent l'élément capital de la chaîne de mesure. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés : le proximètre pour mesurer le déplacement, le vélocimètre pour mesurer la vitesse et l'accéléromètre afin de mesurer l'accélération [34] [35] [36].

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- **Sa bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur.
- **Sa gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.

- **Sa sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance. Elle est donnée par le constructeur du capteur.

Les capteurs les plus utilisés en analyse vibratoire sont les accéléromètres. Le principe de fonctionnement de l'accéléromètre repose sur la propriété que possèdent les matériaux piézo-électriques à se polariser électriquement sous l'action d'une force : des charges apparaissent sur les faces du cristal.

Un accéléromètre est constitué d'un disque en matériau piézo-électrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse. Celle-ci se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézo-électrique des efforts induisant une charge électrique proportionnelle à cette accélération.

Les accéléromètres sont très appréciés car ils possèdent de nombreuses propriétés :

- Utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles ;
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB) ;
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse ;
- Les mesures de vibration peuvent être faites sous un large éventail de conditions environnementales tout en conservant une excellente précision (typiquement 250°C ; 400°C à 700°C pour des modèles spéciaux) ;
- Etant lui-même générateur de charges, il est donc indépendant de toute alimentation externe ;
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable ;
- Extrêmement compact et d'un bon rapport qualité/prix.

La figure 12.a illustre le comportement d'une pastille piézo-électrique : La force appliquée crée un signal électrique, alors que la figure 12.b montre un exemple d'un accéléromètre piézo-électrique Haute température et la figure 12.c indique les différents composants de l'accéléromètre piézo-électrique.

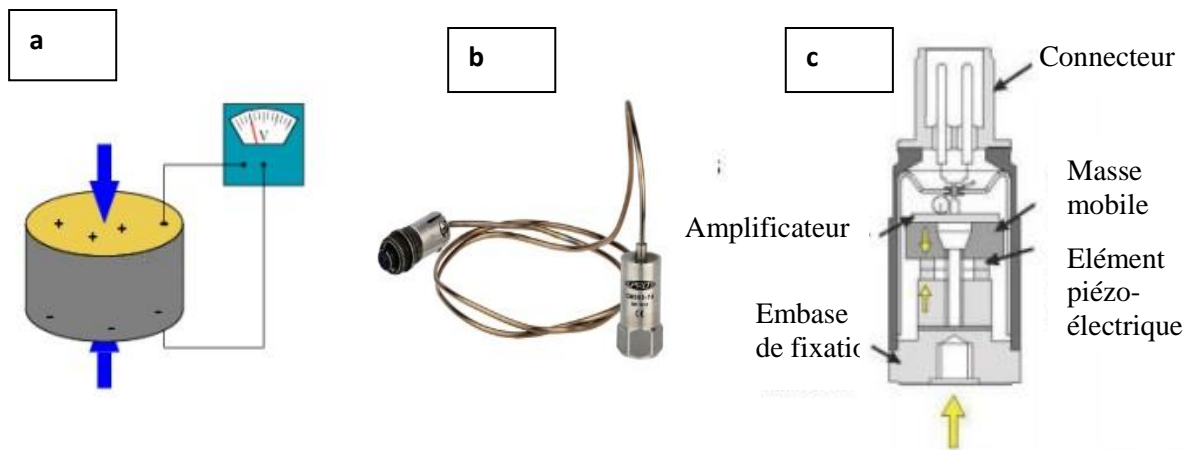


Figure 12. Le comportement et les composants d'un piézo-électrique

1.1.5. Indicateurs vibratoires :

1.1.5.1. Définition

Un indicateur de surveillance est une grandeur vibratoire dérivant des trois grandeurs cinématiques de base caractérisant un mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement), qui est sensible à l'apparition ou à l'évolution d'un défaut ou d'un ensemble de défauts. Pour un suivi correct, l'indicateur doit présenter deux qualités essentielles : la simplicité de la prise de mesure et la signification importante de leur contenu.

La description du comportement vibratoire d'une machine, la surveillance de son évolution, la formulation d'un diagnostic nécessitent de faire appel à de très nombreux indicateurs et critères. Il en existe quatre types [37] : indicateurs scalaires, indicateurs spectraux, indicateurs vectoriels et indicateurs temporels.

En fonction de leurs paramètres, ces indicateurs peuvent être regroupés en deux grandes familles : les indicateurs scalaires énergétiques qui quantifient l'énergie vibratoire sans relation directe avec les forces dynamiques qui l'induisent, et les indicateurs typologiques ou comportementaux qui quantifient essentiellement les manifestations vibratoires de chaque force et défaut dont la machine est le siège en tenant compte des spécificités dynamiques de chaque machine, de son transfert vibratoire qui est lui aussi spécifique à des interactions avec le procédé [38].

1.1.5.2. Les indicateurs scalaires

Un indicateur scalaire associe à un signal brut ou ayant fait l'objet d'un traitement préalable, une grandeur caractéristique de son amplitude, de sa distribution d'amplitude ou de sa composition spectrale [39].

Leur utilisation très répandue s'explique aisément par leur facilité d'utilisation : ils se réduisent à un nombre, se prêtent facilement à l'automatisation de leur gestion [37] [38].

1.1.5.3. Les indicateurs spectraux

Un indicateur spectral associe à un signal une représentation spectrale de ce dernier (spectre, zoom, cepstre,...).

Ces indicateurs présentent le grand intérêt d'être sensibles aussi bien aux évolutions de la forme d'un signal qu'à celles de son énergie, et de ce fait, sont insensibles aux effets de masque, à condition que les résolutions d'analyse choisies pour les élaborer soient en adéquation avec les fréquences de répétition des phénomènes recherchés. Ils offrent donc des perspectives extrêmement intéressantes dans le cadre de la surveillance des machines. Ils constituent par ailleurs un progrès considérable dans l'adéquation entre indicateur et défaut et la facilité de leur comparaison graphique par rapport à un état de référence favorise grandement l'interprétation de leurs évolutions [38] [39].

1.1.5.4. Les indicateurs vectoriels

Un indicateur vectoriel associe à des signaux issus de plusieurs capteurs de vibration une présentation dans l'espace du mouvement vibratoire. Ces indicateurs sont peu familiers, l'orbite en le plus connu. Mais l'utilisation de déformées partielle ou globale, encore anecdotique, est certainement riche d'avenir en tant qu'indicateur typologique de comportement. Cette notion est d'ailleurs souvent abordée indirectement, lorsque certains spécialistes utilisent les déphasages entre points et directions de mesure pour essayer de se représenter à une fréquence donnée le mouvement dans l'espace d'une ligne d'arbres ou de ses paliers [38].

1.1.5.5. Les indicateurs temporels

Un indicateur temporel associe à un signal une forme particulière de sa présentation temporelle obtenue après filtrage ou démodulation. Ils offrent l'avantage être directement accessibles à l'interprétation humaine. Ils permettent d'obtenir des informations difficilement accessibles, dans le domaine spectral telles que le nombre de dents écaillées, la durée d'un

phénomène impulsionnel périodique ou la forme d'un phénomène de modulation [38] [40] [41].

1.2. Domaines d'Applications

Des nombreux types d'équipements industriels et de machines peuvent être contrôlés par des méthodes d'analyse vibratoire. Leur liste est fournie ci-dessous (Tableau 1) [26] :

TABLEAU 1. DOMAINES D'APPLICATIONS COURANTES DE L'ANALYSE DE VIBRATION

Machines centrifuges	Processus continu	Mouvement alternatif
Pompe	Coulée continue	Pompes
Compresseurs	Trains à bande, à chaud ou à froid	Compresseurs
Soufflantes		Moteurs diesel
Ventilateurs		Moteurs à essence
Moteurs-générateurs	Lignes de circuit	Machines-outils
Broyeur à boulets	Lignes de placage	Rectifieuses
Réfrigérateurs	Machines à papier	Outils à aléser
Malaxeurs	Lignes de fabrication de boites de conserve	Fraises
Boites de vitesses		Centres d'usinage
Centrifugeuses	Lignes de décapage	Trempeurs
Transmissions	Impression	Machines de transformation du métal
Turbines	Teinture et finition	
Séchoirs tournants	Usines chimiques	
Moteurs électriques	Raffineries	Laminoirs

1.3. Stratégies de surveillance vibratoire

1.3.1. Mesure vibratoire en niveau global

Analyse globale a pour objectif de contrôler l'état de santé de la machine (contrôle sans diagnostic), en se basant sur la mesure des signaux vibratoires dans les directions radiales et axiale (Figure 13) [42] [43].

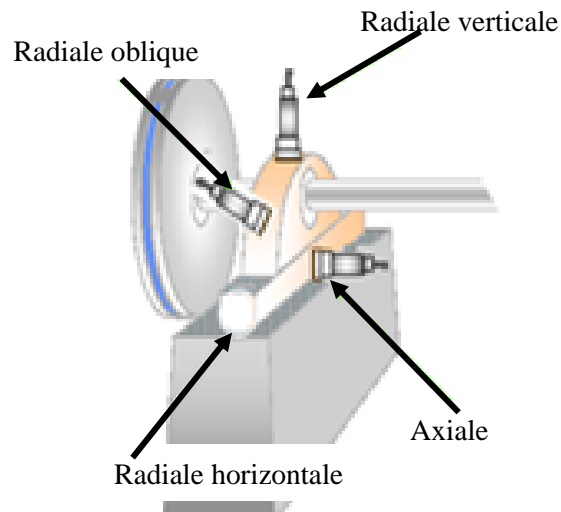


Figure 13. Schéma illustratif des différentes directions radiales et axiales

Ce type de mesure est facile à utiliser et efficace pour la détection du niveau de défaut. La valeur généralement utilisée est l'amplitude vibratoire qui permet de situer le défaut par rapport à un niveau d'alerte, mais ne renseigne pas sur l'origine du problème.

On calcule les valeurs efficaces de la vitesse radiale et axiale afin de déduire la plus grande valeur efficace des signaux mesurés (radiale et axiale), on fait le passage de déplacement $d(t)$ ou d'accélération $g(t)$ à vitesse $v(t)$ à l'aide du nomogramme (Figure14) pour la comparer à des seuils prédéfinis afin de juger l'état de la machine.

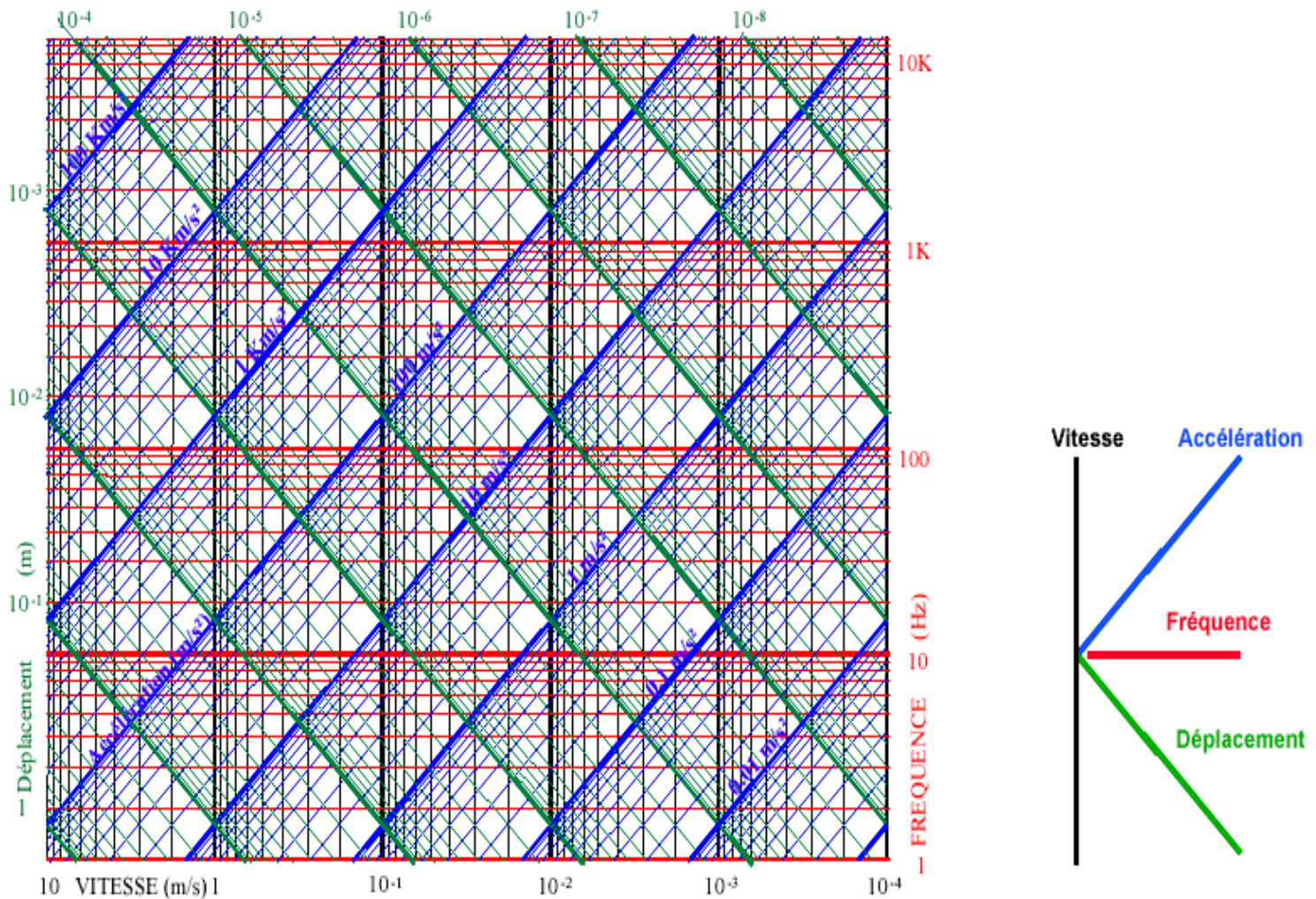


Figure 14. Nomogramme déplacement-vitesse-accélération

Par conséquent, l'analyse globale consiste à mesurer la valeur efficace du signal vibratoire et de la comparer à des seuils définis par les normes qui dépendent de la puissance de la machine et le secteur industriel.

1.3.1.1. Les normes vibratoires

Les normes sont des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques, afin d'assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à leur emploi [44]. Dans le domaine d'analyse vibratoire, ils visent la facilitation de la surveillance vibratoire afin de classifier les machines tournantes et de choisir les méthodes de prise et traitement de mesures, il existe une variété de normes qui sont largement acceptées et appliquées dans le domaine de la maintenance et de la recherche scientifique [45], parmi ces normes, on trouve :

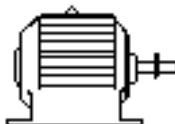
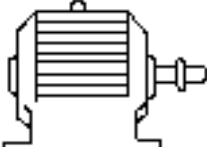
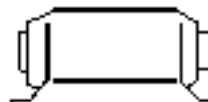

➤ La norme ISO 10816 [46] :

Cette norme (tableau 2) permet de classer les machines en 4 groupes :

- groupe K pour les petites machines dont leurs puissances sont inférieures à 15KW ;
- groupe M pour les machines moyennes dont leurs puissances sont entre 15KW et 300KW ;
- groupe G pour les machines lourdes sur fondation rigides avec des vitesses de rotation supérieures à la fréquence naturelle ;
- groupe T pour les machines lourdes sur fondation rigides avec des vitesses de rotation supérieures à la fréquence naturelle de leurs fondations.

Cette norme donne le niveau de vibration acceptable pour chaque groupe de machine.

TABLEAU 2. CRITERES VIBRATOIRES DE SECURITE SUIVANT LA NORME ISO 10816

VALEUR EFFICACE DE LA VITESSE (mm/s)	45	NON TOLERE	NON TOLERE	NON TOLERE	NON TOLERE
	28				NON TOLERE
	18	NON TOLERE	NON TOLERE	NON TOLERE	JUSTE TOLERABLE
	11.2				JUSTE TOLERABLE
	7.1	JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE
	4.5				JUSTE TOLERABLE
2.8	JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE	PERMIS	
1.8				JUSTE TOLERABLE	JUSTE TOLERABLE
1.12	PERMIS	PERMIS	PERMIS	PERMIS	
0.71				PERMIS	PERMIS
0.18	BON	BON	BON	BON	BON
	PUISSANCE < 15kW 	PUISSANCE 15-300kW 	MACHINES LOURDES SUR FONDATIONS RIGIDES AVEC DES VITESSES DE ROTATION SUPERIEURES A LA FREQUENCE NATURELLE 	MACHINES LOURDES SUR FONDATIONS RIGIDES AVEC DES VITESSES DE ROTATION SUPERIEURES A LA FREQUENCE NATURELLE DE LEURS FONDATIONS 	
	GROUPE K	GROUPE M	GROUPE G	GROUPE T	

- La norme ISO 2372 [47] (tableau 3) :

Cette norme (tableau 3) permet de classer les machines en 3 groupes : groupe K pour les petites machines dont leurs puissances sont inférieures à 15KW, groupe M pour les machines moyennes dont leurs puissances sont entre 15KW et 300KW, groupe G pour les machines avec fondations rigides et lourdes. Cette norme donne le niveau de vibration acceptable pour chaque groupe de machine.

TABLEAU 3. CRITERES VIBRATOIRES DE SECURITE SUIVANT LA NORME ISO 2372

ISO2372 (BS 4675, VDI 2056)			mm/s	dB
Non Permis	Non Permis	Non Permis	45	153
	Non Permis	Non Permis	28	149
Juste Tolérable	Juste Tolérable	Juste Tolérable	18	145
	Juste Tolérable	Juste Tolérable	11.2	141
Permis	Permis	Permis	7.1	137
	Permis	Permis	4.5	133
Bon	Permis	Permis	2.8	129
	Bon	Bon	1.8	125
Bon	Bon	Bon	1.12	121
	Bon	Bon	0.71	119
Bon	Bon	Bon	0.45	117
	Bon	Bon	0.28	109
Bon	Bon	Bon	0.18	105
	Bon	Bon	0.18	105

Groupe K	Groupe M	Groupe G	2,5 fois = 8dB 10 fois = 20dB	Valeur efficace de la vitesse (RMS)
----------	-----------------	----------	----------------------------------	-------------------------------------

- La norme E90-300 [48] (tableau 4) :

Cette norme (tableau 4) permet de classer les machines en 4 groupes : groupe I pour les petites machines ; groupe II pour les machines moyennes ; groupe III pour les grosses machines et groupe VI pour les turbomachines. Cette norme permet aussi de donner le niveau de vibration admissible pour chaque groupe de machine.

[mm/s eff]	Groupe I Petites machines	Groupe II Machines Moyennes	Groupe III Grosses machines	Groupe IV Turbo-machines
28		Inadmissible		
18				
11				
7				
4,5		Encore admissible		
2,8			Admissible	
1,8				
1,1				Bon
0,71				
0,46				
0,28				

TABLEAU 4. CRITERES VIBRATOIRES DE SECURITE SUIVANT LA NORME E90-300

1.3.1.2. Les avantages et les inconvénients de l'analyse globale

Une étude littérature et retour d'expérience des industriels a permet de tracer le tableau suivant qui représente les différents avantages et inconvénients de l'analyse globale :

TABLEAU 5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ANALYSE GLOBALE

Avantage	Inconvénients
-Matériel très peu coûteux ; -matériel simple d'utilisation ; -mise en œuvre de la technique très simple.	-La méthode ne peut déterminer l'organe défectueux ; -les défauts de faibles énergies sont indécélabes ; -problème de la somme de plusieurs défauts.

1.3.2. Analyse spectrale

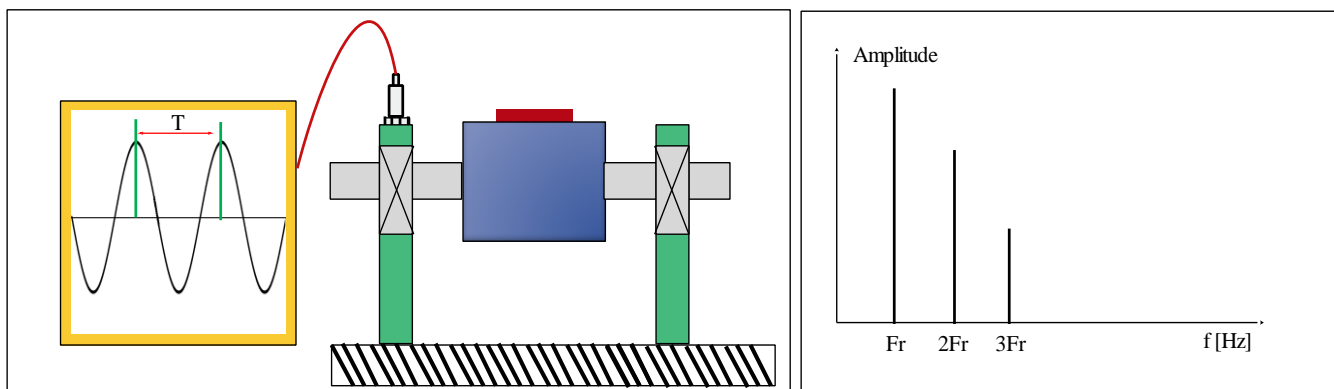
Les signaux temporels sont souvent des signaux aléatoires et donc difficile à analyser ; par contre, leurs spectres sont très simples et faciles à exploiter. L'analyse spectrale est une étude des variations d'amplitudes du signal vibratoire en représentation fréquentielle [49]

[50]. Cette technique permet de reconnaître les anomalies pouvant exister dans la machine. En effet, à partir des fréquences auxquelles apparaissent les anomalies, il est possible, de détecter l'origine d'un défaut et d'en suivre l'évolution grâce aux signatures spectrales de chaque défaut [20] :

1.3.2.1. Défaut du déséquilibre

Lorsque l'axe de rotation de l'arbre ne coïncide pas avec son axe d'inertie, il y aurait apparition d'une force centrifuge qui déforme le rotor : on dit que le rotor présente un balourd.

Si on mesure l'amplitude du signal vibratoire à l'aide d'un capteur placé sur le palier supportant un rotor déséquilibré, le spectre du signal mesuré présente d'un pic à la fréquence de rotation de l'arbre et ses harmoniques. Le signal vibratoire généré par un balourd ainsi que sa signature spectrale sont montrés dans la Figure 15.



1.3.2.2. Défaut d'alignement

On parle de défaut d'alignement lorsque les axes des deux arbres ne sont pas confondus au niveau d'un accouplement ou lorsque les deux paliers supportant un arbre ne sont pas bien alignés [51].

On distingue le défaut d'alignement radial pour lequel les deux axes sont parallèles mais désaxés, du défaut d'alignement angulaire pour lequel les deux axes font un certain angle entre eux [52]. Sur le spectre, on voit la présence des composantes 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1 (Figure 15).

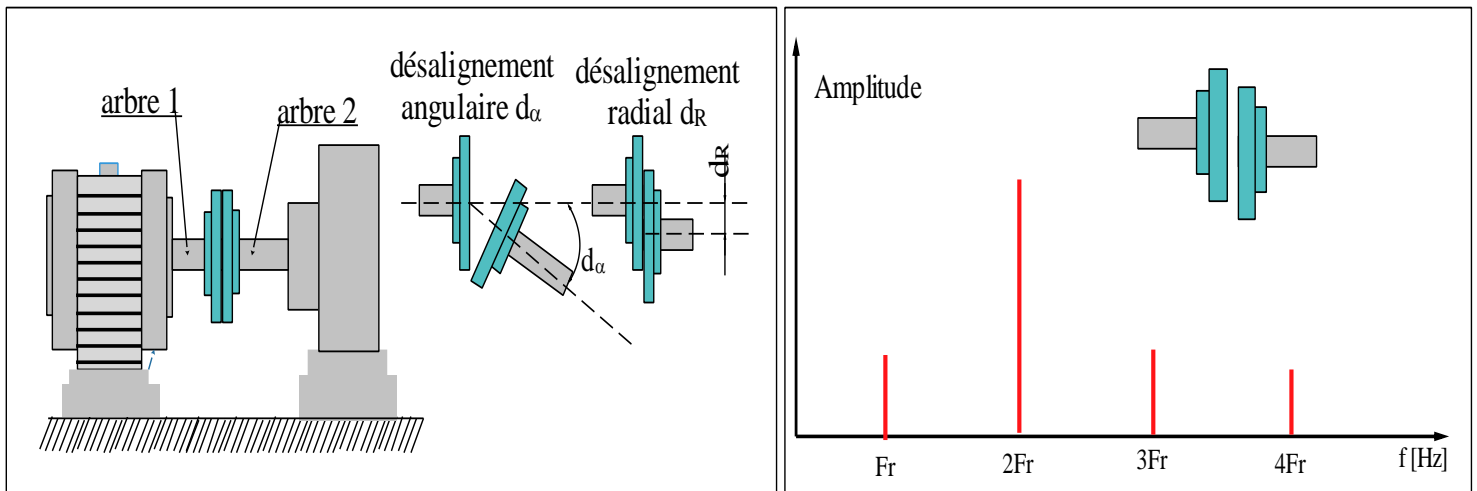


Figure 16. Spectre caractéristique d'un défaut d'alignement d'arbres

1.3.2.3. Défaut des courroies

Le principal défaut rencontré sur les courroies est lié à une détérioration localisée : partie arrachée ou défaut de jointure. Ce défaut est directionnel. Sa direction privilégiée est celle de la tension des courroies. Ainsi, le signal correspondant au défaut de courroies, s'il existe, sera plus fort dans la direction horizontale que dans la direction verticale [53] [54] (Figure 17).

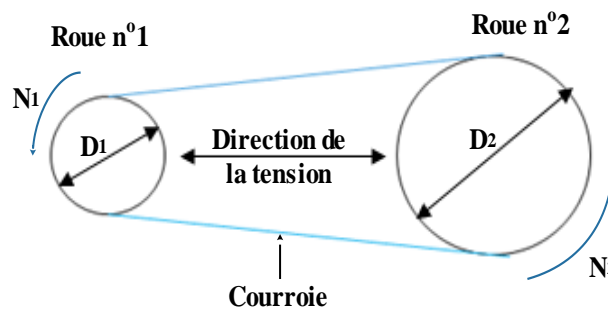


Figure 17. Fréquences caractéristiques d'un défaut de courroie

Où :

N_1 et N_2 représentent respectivement les vitesses de rotation des roues n°1 et n°2 ;

Les fréquences du défaut de courroie :

➤ Pour la roue n°1 : $F_{c1} = fr \times \frac{\pi \times D_1}{l}$ (1)

➤ Pour la roue n°2 : $F_{c2} = fr \times \frac{\pi \times D_2}{l}$ (2)

L'image vibratoire donne un pic d'amplitude importante à la fréquence de passage des courroies F_c et ses harmoniques.

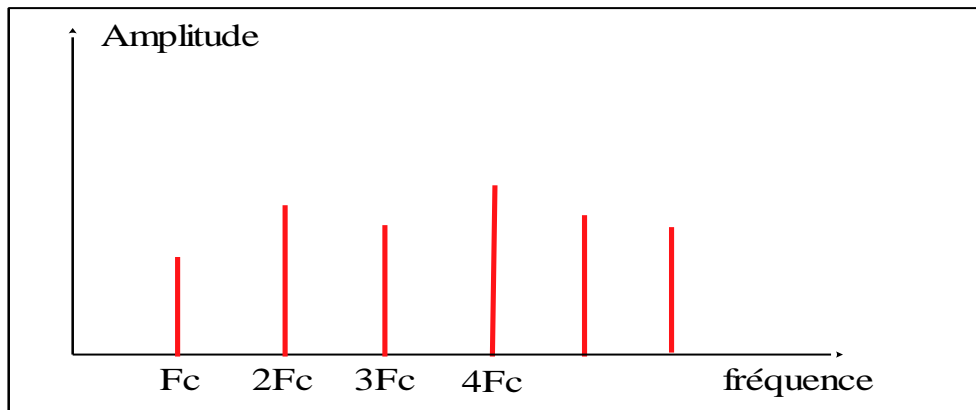


Figure 18. Spectre d'un défaut localisé de courroie

1.3.2.4. Défaut d'engrènement

Un engrenage composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant z_1 et z_2 dents respectivement, et tournant aux fréquences F_1 et F_2 . Même si l'engrenage est sain, chaque fois qu'une dent de la roue 1 s'engage dans la roue 2, il se produit une prise de charge [55] [56]. Le spectre contient donc un pic à la fréquence d'engrènement F_e et ses harmoniques (Figure 19).

Rappelons que :

$$F_e = F_1 \cdot z_1 = F_2 \cdot z_2 \quad (3)$$

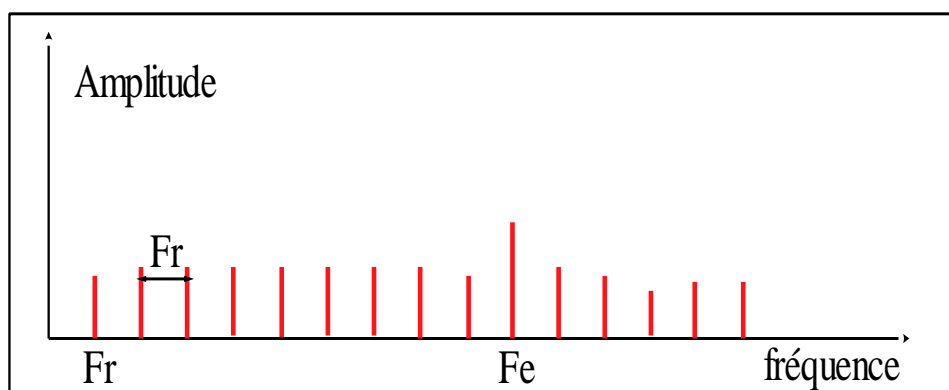


Figure 19. Spectre d'un engrenage sain

Si l'une de roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour de la roue. Le spectre correspondant (Figure 20) montre un peigne dont le pas correspond à la fréquence de rotation de la roue détériorée et s'étant jusqu'aux hautes fréquences [57].

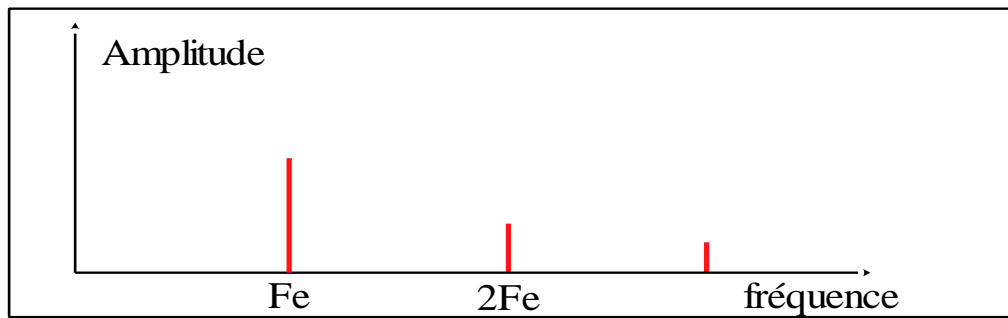


Figure 20. Spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée

1.3.2.5. Défaut de roulement

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de pannes fréquentes. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont de type écaillage, grippage, corrosion, etc...[58]

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant [59], produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce de roulement [60]. Il est donc possible de localiser le défaut et donc de savoir s'il se trouve sur la bague interne, sur la bague externe, sur la cage ou sur les éléments roulants. Les caractéristiques d'un roulement sont montrées dans la figure 21.

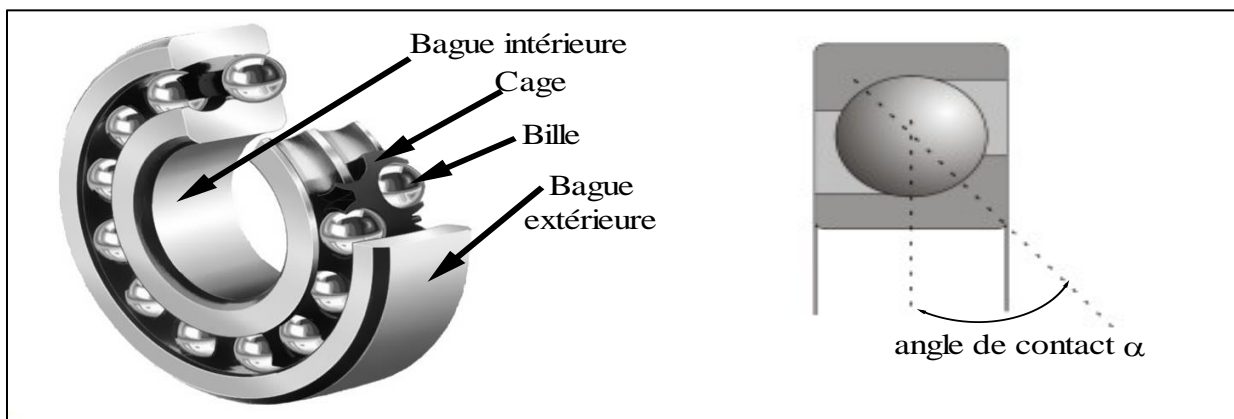


Figure 21. Caractéristiques d'un roulement

En effet, chaque organe du roulement, présente une fréquence caractéristique [61] :

- la fréquence de la bague externe est donnée par :

$$F_{\text{bext}} = 0.5 Fr n \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos(\alpha) \right) \right) \quad (4)$$

- la fréquence de la bague interne est donnée par :

$$F_{bint} = 0.5 Frn \left(1 + \left(\frac{d}{D} \cos(\alpha) \right) \right) \quad (5)$$

- la fréquence des éléments roulants est donnée par :

$$F_{bille} = 0.5 Fr \frac{d}{D \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right)} \quad (6)$$

- la fréquence de la cage est donnée par :

$$F_{cage} = 0.5 Fr \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos(\alpha) \right) \right) \quad (7)$$

Avec :

- n : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- D : le diamètre primitif.
- d : le diamètre des éléments roulants.
- α : angle de contact.
- Fr : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe).

Ainsi, par exemple, un défaut de type écaillage affectant la bague d'un roulement externe a pour image vibratoire un peigne de raies, dont le pas correspond à la fréquence de F_{ext} . A chaque composante de ce peigne, est associé une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (figure 22).

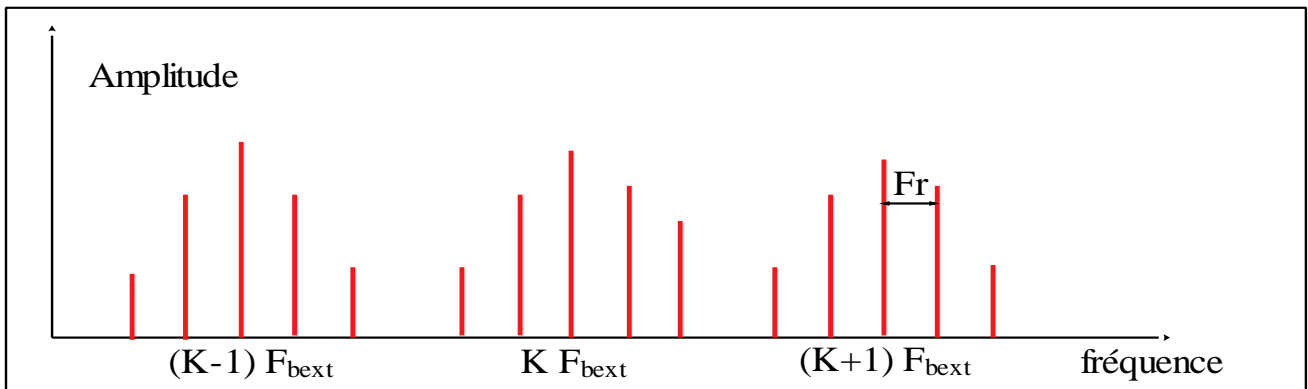


Figure 22. Spectre d'un défaut de type écaillage sur la bague externe

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne a pour image vibratoire un peigne de raies centrées sur F_{int} . A chaque composante de ce peigne sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation.

1.3.2.6. Défaut de moteurs électriques

Parmi les défauts d'origine électrique on trouve :

- les défauts sur le rotor [62] [63] :
 - barre de rotor cassée ;
 - circuit électrique ouvert ;
 - rotor excentrique ou courbé.

- les défauts sur le stator [64] :
 - ovalisation du stator.
 - court-circuit ouvert dans le bobinage.

1.3.2.7. Les avantages et les inconvénients de l'analyse fréquentielle

Le tableau suivant représente les différents avantages et inconvénients de l'analyse fréquentielle en se basant sur une étude littérature et retour d'expérience des industriels :

TABLEAU 6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ANALYSE FREQUENTIELLE

Avantages	Inconvénients
-Détection des défauts à un âge précoce ; -Identification des anomalies.	-Appareillage coûteux ; -Formation du personnel ; -Préparation très longue (cinématique, points de mesure, détermination des seuils...) ; -Les réponses spectrales de certains défauts sont analogues ; -Les signaux type chocs ne sont pas détectés.

2. La thermographie

La thermographie est une des techniques de maintenance prédictive utilisées pour contrôler l'état d'une machine-outil, des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges (c'est-à-dire de chaleur) afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement. Grâce à la détection des anomalies thermiques, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leurs naissances [65] [66] [67].

2.1. Principe

Chaque matériau émet naturellement un rayonnement électromagnétique de spectre normalement continu dont le niveau est fonction de sa longueur d'onde et de sa température. L'essentiel de ce rayonnement est émis dans la gamme des infrarouges. Les caméras thermographiques ont été conçues pour fournir une image, appelée thermogramme, de phénomènes statiques ou dynamiques dans le domaine spectral de l'infrarouge.

La Thermographie Infrarouge est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un refroidissement anormal. Seule la Thermographie Infrarouge permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'œil nu, la thermographie permet de localiser les points chauds bien avant leur évolution vers une situation grave pour l'entreprise et de réduire les taux de pannes sur les installations industrielles. Eviter les arrêts de production, par des programmes de maintenance et de contrôles de qualité, est un objectif que la thermographie permet d'atteindre très vite.

2.2. Technique de mesure thermographique

La thermographie infrarouge consiste, à partir de la mesure du rayonnement émis par un objet dans une bande spectrale de l'infrarouge, à visualiser sous forme de thermogrammes la répartition spatiale et l'évolution temporelle des températures de surface d'un objet. La caméra infrarouge mesure et transcrit, par l'image, les rayonnements infrarouges émis par un objet. Le fait que le rayonnement soit une fonction de température de surface du sujet permet à la caméra de calculer et d'afficher cette température en un point de la surface de l'objet étudié. La figure 25 représente les principaux éléments constituant la caméra thermique [68] [69] [70].

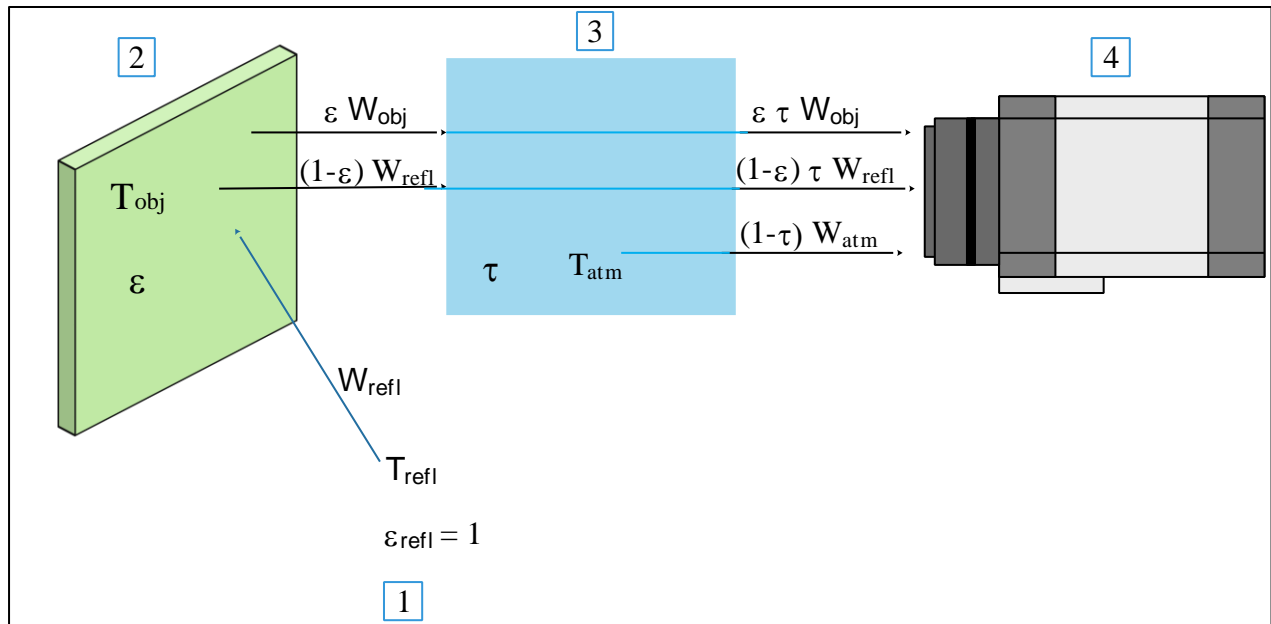


Figure 23. Représentation schématique du système de détection thermographique

Avec 1 représente l'environnement ; 2 c'est l'objet ; 3 c'est l'atmosphère et le 4 représente la caméra de détection.

Ce type de dispositif permet de mesurer les trois rayonnements suivants [71] :

- Émission provenant de l'objet ;
- Émission réfléchie provenant de sources ambiantes ;
- Émission provenant de l'atmosphère.

Avec :

ϵ : l'émissivité de l'objet ;

τ : le facteur de transmission de l'atmosphère

T_{atm} : la température de l'atmosphère.

T_{obj} : la température de l'objet.

T_{refl} : la température des sources ambiantes.

Le total de la puissance de rayonnement reçu peut alors être énoncé comme suit :

$$E_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} + \dots \quad (8)$$

$$E_{tot} = \epsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot W_{obj} + (1 - \epsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot W_{refl} + (1 - \tau_{atm}) \cdot W_{atm} + \dots \quad (9)$$

Tel que E_{tot} représente l'énergie totale qui atteint le détecteur lorsque l'objet à analyser est focalisé, le seul terme d'intérêt pour une analyse quantitative est ($W_{obj} = \sigma \cdot (T_{obj})^4$), avec σ représente la constante de Stephan ($\sigma = 5,66897 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); l'énergie rayonnée par l'objet, c'est une fonction de sa température.

Les deux autres additifs sont liées aux contributions provenant de différentes sources debout autour du champ de mesure ($W_{refl} = \sigma \cdot (T_{refl})^4$) et l'absorption de l'atmosphère $W_{atm} = \sigma \cdot (T_{atm})^4$. Une fois que les deux dernières expressions sont identifiées, l'incertitude restant découle de la définition de l'émissivité propriétés de l'objet visé par l'enquête.

Par la suite, l'équation (9) devient :

$$E_{tot} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 + \dots \quad (10)$$

2.3. Paramètres qui influent sur la thermographie infrarouge

Le rayonnement mesuré par la caméra dépend non seulement de la température de l'objet, mais également de l'émissivité [72].

Pour mesurer la température avec précision, il est donc nécessaire de compenser les effets des différentes sources de rayonnement. Cela est effectué automatiquement en ligne par la caméra. Les paramètres suivants relatifs à l'objet doivent cependant être fournis à la caméra :

- Emissivité de l'objet ;
- Température réfléchie ;
- Distance entre l'objet et la caméra ;
- Humidité relative.

2.4. Applications de la thermographie

La thermographie est un examen pratiqué à distance. Il trouve donc des applications intéressantes lorsque l'accès est délicat ou dangereux. Il a aussi l'avantage de ne pas imposer d'arrêt de production et nécessite rarement un démontage.

La thermographie trouve son utilisation dans les nombreux cas où une différence de température est le signe d'une anomalie de fonctionnement.

Ce phénomène se retrouve pour des éléments comme :

- Des pièces tournantes ou de frottement.
- Des installations électriques sous tension.
- Des circuits imprimés complexes, composants électroniques.
- Des éléments réfractaires de fours, isolation d'enceintes thermiques.
- Des installations de chauffage par le sol.
- Des canalisations enterrées.

2.5. Avantages et inconvénients de la thermographie

Une étude littérature et retour d'expérience des industriels a permis de tracer le tableau suivant qui représente les avantages et les inconvénients de la technique thermographique [73] :

TABLEAU 7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA THERMOGRAPHIE

Avantages	Inconvénients
-Rapidité de mise en œuvre des mesures; -Localisation des points chauds ; -Mesures sans contact sur des objets : *en mouvement, *sous tension, *inaccessibles, *polluants ; -L'accès à des environnements sévères.	-Détection de défauts à un stade souvent moins précoce que l'analyse vibratoire ; -Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) ; -Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi.

3. Ressuage

3.1. Objectif

Le ressuage est une technique de contrôle surfacique qui permet de déceler les défauts débouchant sur tous types de matériaux non poreux. C'est une technique simple à mettre en œuvre rigoureuse pour garantir une sensibilité optimale (figure 24) [74] [75].

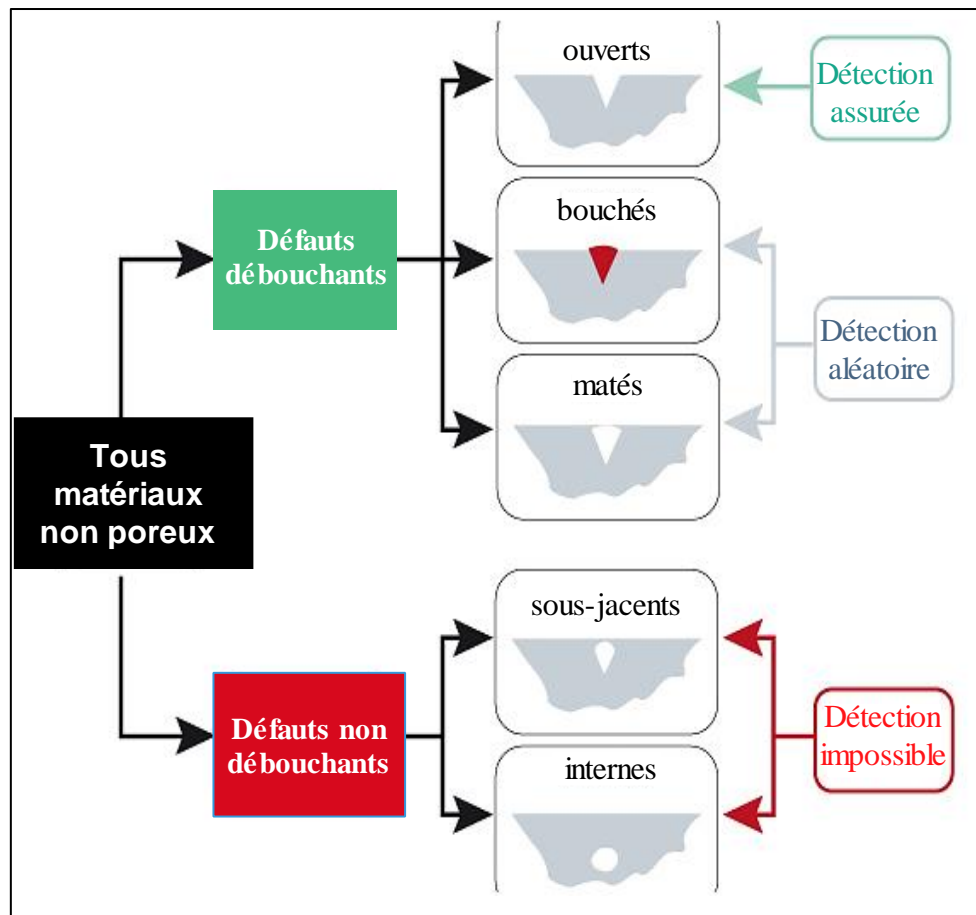


Figure 24. La détection des défauts selon la méthode Ressuage

3.2. Mode d'examen

Pour le mode d'examen, on suit la séquence suivante : Dans un premier temps on prépare la surface, cette surface doit être propre et exempte de pollution ; puis on applique le pénétrant, qui est un liquide contenant des traceurs ; puis on attend un certain temps pour que le pénétrant puisse remplir les discontinuités ; après on élimine l'excès de pénétrant ; puis on applique un révélateur sur la surface, ce dernier agit de manière à faire 'ressuer' le pénétrant retenu dans les discontinuités ; et finalement, après un certain temps, les discontinuités sont révélés à la surface par une tache colorée.

Il existe trois familles principales de pénétrants [76] :

- les pénétrants colorés : qui sont généralement de coloration rouge/violette, pour lesquels l'observation se fait en lumière blanche ;
- les pénétrants fluorescents : qui nécessitent un examen en lumière ultraviolette, en ambiance sombre ;

- les pénétrants mixtes : qui peuvent indifféremment être examinés en lumière blanche ou en lumière ultraviolette.

Parallèlement, dans chaque famille, on peut rencontrer trois cas possibles d'utilisation :

- le pénétrant est pré-émulsifié (ou pré-émulsionné) : auquel cas il est directement rinçable à l'eau.
- le pénétrant est à post-émulsification (ou post-émulsion) : auquel cas l'excès de pénétrant pour être éliminé, doit être soumis à l'action d'un émulsifiant intermédiaire.
- le pénétrant est éliminable à l'aide d'un solvant approprié.

La figure 28 suivante donne une représentation schématique des situations couramment utilisées industriellement.

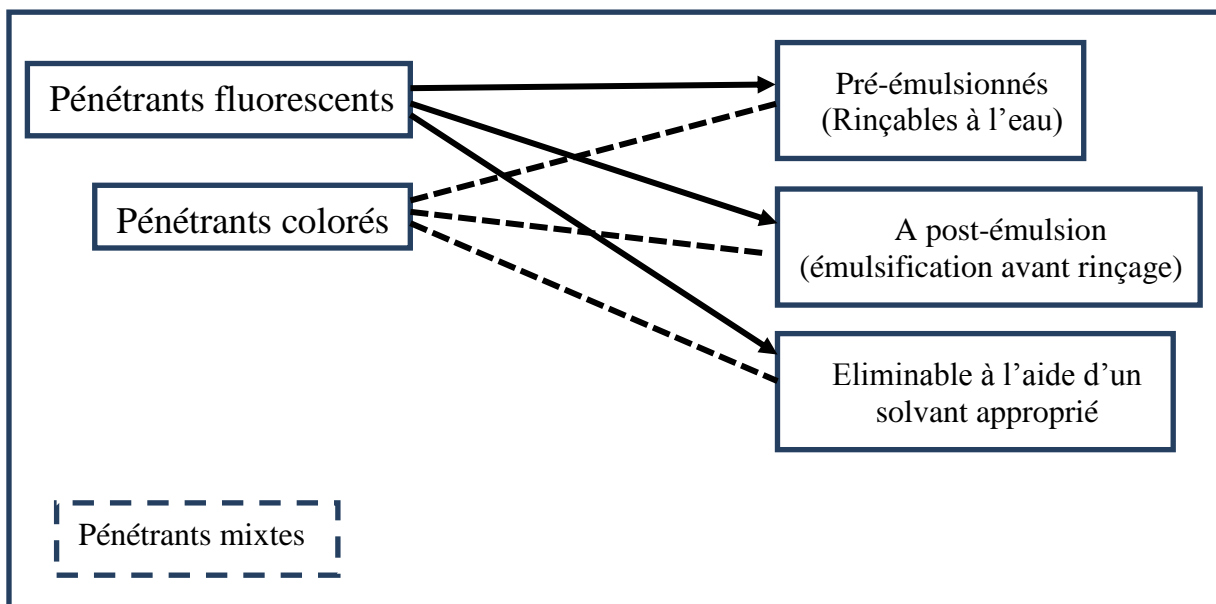


Figure 25. Représentation schématique des situations couramment utilisées industriellement

3.3. Avantages et limites du ressuage

Le tableau 8 représente les différents avantages et limites de la méthode ressuage en se basant sur une étude littérature et retour d'expérience des industriels [76][77]:

TABLEAU 8. AVANTAGES ET LIMITES DU RESSUAGE

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none">-Très simple à mettre en oeuvre ;-Permet une localisation précise des défauts de surface et une appréciation de leurs largeurs ;-La seule méthode globale en CND autorisant un examen de la totalité de la surface ;-Possibilité de ressuage à chaud (240°)-L'orientation du défaut n'influence pas l'inspection ;-Les différentes séquences se prêtent bien à l'automatisation.	<ul style="list-style-type: none">-Mise en évidence uniquement des défauts débouchant à la surface ;-Applicable pour les matériaux non absorbants ;-L'appréciation de la profondeur des discontinuités n'est pas possible ;-L'interprétation reste délicate ;-Nocivité des produits : utilisation des produits inflammables et irritants.-Nécessité d'un nettoyage de surface avant examen-Temps d'opération

3.4. Domaines d'application

Le ressuage est une technique particulièrement adaptée aux [78] :

- Contrôle des cordons de soudure : Ce contrôle est effectué le plus couramment avec une gamme de ressuage coloré. En effet, les pénétrants colorés lavables à l'eau sont le meilleur choix pour les surfaces rugueuses telles que les soudures particulièrement arasées.
- Contrôle d'étanchéité : les équipements étanches sont une exigence permanente dans l'industrie et dans notre vie de tous les jours.
- Métallurgie : les pièces de fonderie et de forge, de même que les produits laminés, étirés, extrudés, sont le plus souvent contrôlés par ressuage à l'aide d'un pénétrant fluorescent lavable à l'eau ou à post-émulsion.
- Médical : les assemblages métalliques de prothèse sont généralement contrôlés avec des pénétrants à poste-émulsion.
- Automobile
- Remontées mécaniques
- Aérospatiale
- Nucléaire
- Marine
- Ferroviaire

4. Magnétoscopie

4.1. Objectif & Principe

Cette méthode consiste à créer un flux d'induction magnétique intense dans des structures ferromagnétiques entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des traceurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux [79] [80].

Les lignes de force du flux sont bien alignées lorsque le matériau est sain. Elles sont déviées par des défauts orientés perpendiculairement à leur sens d'alignement.

La reproductibilité de l'examen peut être obtenue à condition d'éliminer ou de réduire l'aimantation rémanente qui peut subsister dans les pièces.

4.2. Mode d'examen

L'examen peut être effectué en lumière blanche avec des fonds contrastants et des traceurs (révélateurs magnétiques) colorés ou en lumière ultraviolette avec des traceurs fluorescents.

Les traceurs peuvent être secs ou humides :

- Les traceurs secs : ils sont ferromagnétiques, très mobiles sur la pièce et très visibles à l'œil.
- Les traceurs humides : les liquides porteurs qui sont soit des produits aqueux non inflammables, soit des produits au kérosène.

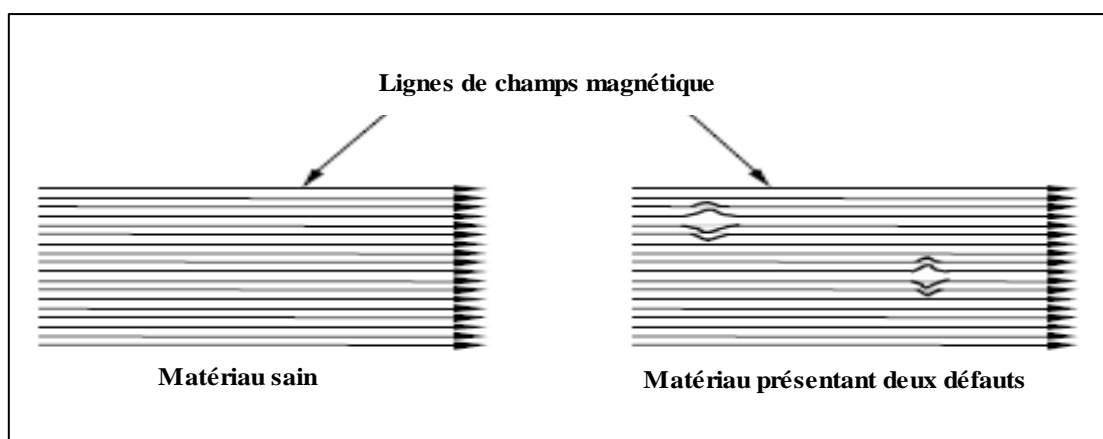


Figure 26. Schéma de principe de la méthode de la magnétoscopie

4.3. Avantages et limites de la magnétoscopie

Une étude littérature et retour d'expérience des industriels a permis de présenter le tableau 9 suivant qui représente les avantages et les inconvénients de la magnétoscopie :

Tableau 9. Avantages et inconvénients de la magnétoscopie

Avantages	Limites
-Méthode simple à mettre en œuvre ; -Localisation précise des défauts de surface ; Appréciation de la longueur des défauts.	-Pièces en alliage ferromagnétique ($H=2400A/m \rightarrow B =$ au moins 1 Tesla) ; -Pas d'appréciation de la profondeur des défauts ; La sensibilité dépend de l'orientation du défaut.

5. Ultrasons

5.1. Principe

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire un balayage mécanique. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts [81] [82].

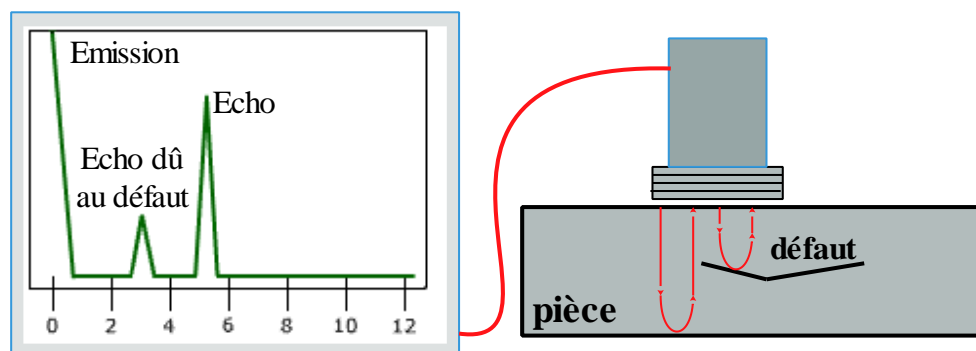


Figure 27. Schéma de principe des ultrasons

5.2. Domaines d'application

Le tableau 10 fournit une liste des systèmes et composants contrôlés habituellement par des techniques ultrasoniques [83] :

TABLEAU 10. DOMAINE D'APPLICATION DES ULTRASONS

-Détecter les fuites dans les systèmes d'air ou de gaz comprimé ; -Mesurer la corrosion et l'érosion dans les tuyaux et les ballons ; -Détecter une infiltration d'air à travers les murs des bâtiments ; -Localiser les tubes percés dans les échangeurs de chaleur ; -Détecter les arcs électriques ; -Inspecter les soudures et les pièces mécaniques sensibles ; -Mesurer la tension des boulons dans les connexions sensibles.

5.3. Avantages et inconvénients des ultrasons

Une étude littérature et retour d'expérience des industriels a permis de tracer le tableau suivant qui représente les avantages et les inconvénients des ultrasons :

TABLEAU 11. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ULTRASONS

Avantages	Inconvénients
-Localisation de la longueur du défaut ; -Sans danger contrairement à la radiographie ; -A privilégier si accessibilité d'un seul côté ; -Associer aux fortes épaisseurs.	-Pas de trace de contrôle ; -Subjectivité de l'interprétation de l'opérateur.

6. Radiographie

6.1. Principe de la radiographie

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. L'image est obtenue grâce à un support de l'image radiographique qui est soit :

- un film radiographique,
- un écran fluorescent,
- une caméra à barrettes CCD (Charge Coupled Device).

Cette technique permet de visualiser les manques de matière du volume de l'objet contrôlé, sur une image à deux dimensions [84] [85].

La figure suivante illustre le principe de la méthode radiographie [86] :

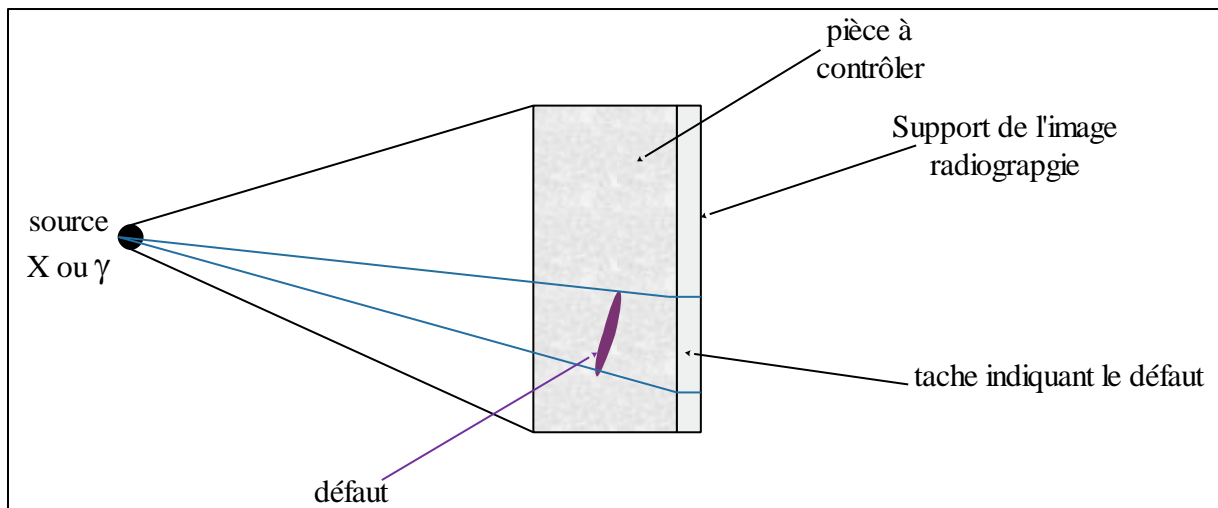


Figure 28.Principe de la méthode radiographie

Cette méthode est applicable dans les fonderies et la détection des défauts de soudure [84].

6.2. Avantages et inconvénients de la radiographie

Une étude littérature et retour d'expérience des industriels a permis de tracer le tableau suivant qui représente les avantages et les inconvénients de la radiographie :

TABLEAU 12. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA RADIOGRAPHIE

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts ; -Localisés dans le volume de la pièce ; -Bonne définition des images ; -Archivage des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> -Accès à faces opposées ; -Rayonnements dangereux ; -Sensibilité dépend de la direction des défauts ; -Pénétration très limitée.

III. Synthèse comparative

La présentation de ces méthodes ne serait pas complète sans une synthèse comparative, en se basant sur l'étude littérature et aussi sur les avantages et les inconvénients de l'analyse globale (tableau 5), de l'analyse fréquentielle (tableau 6), de la thermographie (tableau 7), du ressuage (tableau 8), de la magnétoscopie (tableau 9), des ultrasons (tableau 11) et de la radiographie (tableau 12). En ce qui concerne l'analyse vibratoire, elle donne des résultats pertinents avec les machines tournantes ; quant à la thermographie, elle indique les points chauds mais parfois sans préciser l'emplacement des défauts ; pour le ressuage, cette

technique donne des bons résultats pour les défauts surfaciques ; alors que la radiographie est applicable dans les fonderies et la détection de soudure ; et finalement, la magnétoscopie est applicable pour les pièces magnétoscopiques.

La synthèse comparative entre les différentes techniques de mesure est représenté dans le tableau 13 que nous avons élaboré selon les critères de la rapidité d'exécution, du coût, de la reproductibilité, de la fiabilité, de la sensibilité et la résolution [18] sur une échelle de quatre niveau allant du point le plus faible (--) jusqu'à le point le plus fort (++) :

TABLEAU 13. SYNTHÈSE COMPARATIVE ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE

	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Ressuage	++	++	-	-	--	-
Radiographie	++	-	+	+	-	-
Thermographie	++	-	+	+	+	-
Ultrasons	+	+	-	-	++	+
Magnétoscopie	+	+	-	-	++	+
Analyse vibratoire	+	+	++	+	+	-

Nous constatons que par exemple que le ressuage est la technique de mesure la plus coûteuse, et le coût de la magnétoscopie et des ultrasons est moyennement élevé par rapport au coût de la radiographie et la thermographie.

Si on prend par exemple la technique de mesure analyse vibratoire, on remarque qu'elle est moins résolue, moyennement rapide, sensible et fiable, mais plus reproductible.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une description précise des techniques du CND les plus répandues industriellement en présentant leurs avantages et leurs inconvénients, nous avons donné un aperçu global des différents types de défauts qui peuvent être rencontrés dans les équipements industriels, ainsi qu'une synthèse comparative de ces techniques.

Il existe donc une grande variété de techniques de mesure, du fait de cette variété de techniques de mesure, il est toujours possible de trouver la technique la plus convenable pour juger l'état des machines industrielles. Il ne faut toutefois pas oublier que ces différentes techniques possèdent des avantages et aussi des inconvénients.

Le choix d'une méthode du CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme du défaut, ...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce, ...) et les problèmes économiques, et selon les critères de rapidité, coût, reproductibilité, fiabilité, sensibilité et résolution.

Dans ce contexte, nous allons faire un état des lieux des entreprises marocaines en matière d'utilisation des techniques du CND en maintenance prédictive qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III. ETUDE STATISTIQUE SUR L'UTILISATION DES TECHNIQUES DE MESURE EN MAINTENANCE PREDICTIVE SUR UN ECHANTILLON D'ENTREPRISES MAROCAINES

Ce chapitre dresse un état des lieux des entreprises marocaines en matière d'utilisation des techniques de mesure CND en maintenance prédictive. L'objectif étant de recenser les principaux avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure (analyse vibratoire ; thermographie ; radiographie ; ressuage ; magnétoscopie et ultrasons) en tenant compte des caractéristiques de la production (continue, discontinue, par projet) et du secteur d'activité (agroalimentaire, automobile, textile, service,...).

I. Introduction

Parmi les préoccupations majeures des responsables industriels, le faible rendement de production dû à des arrêts et des pannes imprévus et spontanés des machines.

Les frais de maintenance constituent souvent la majeure partie des coûts opératoires dans bon nombre d'unité de production. Ces coûts peuvent être sensiblement réduits par la maintenance prédictive tel n'est pas le cas des méthodes traditionnelles de maintenance.

De récentes études sur l'efficacité de la gestion en maintenance ont montré que plus d'un tiers des coûts de maintenance provient d'opérations inutiles ou mal effectuées [87] [88]. Une mauvaise politique de maintenance a des conséquences désastreuses sur la qualité des produits.

Pour éviter donc les bris qui risqueraient de ralentir et même d'arrêter la production, le programme de maintenance doit se diriger vers une maintenance prédictive, qui utilise de nombreuses techniques [18] (analyse vibratoire ; thermographie ; radiographie ; ressuage ; magnétoscopie).

Le développement des instruments de mesures, utilisés pour le contrôle des caractéristiques opératoires d'une machine, a entraîné des progrès remarquables dans le secteur de la gestion. Il a permis de réduire ou d'éliminer jusqu'à 20% des réparations inutiles, d'éviter les pannes de machines les plus graves, et ainsi de limiter les effets d'une maintenance inadéquate sur la rentabilité d'une usine [89].

Du fait qu'un mauvais programme de maintenance peut empêcher l'augmentation des taux de production et nuire au développement des entreprises, il nous a semblé opportun de nous interroger sur la place de la maintenance prédictive au niveau des entreprises marocaines et de poser la question de recherche suivante : « les entreprises marocaines disposent-elles de tous les outillages spéciaux et équipement de test pour faire face aux bris qui risqueraient de ralentir et même d'arrêter la production ? ».

L'objectif de ce chapitre est de faire un état des lieux sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance préventive pour appréhender la situation dans les entreprises marocaines, c'est-à-dire, on cherche à travers notre échantillon d'entreprises marocaines, les entreprises industrielles qui utilisent les techniques de mesure de la maintenance prédictive dans leurs programme de la maintenance, et à discerner les principales limites et les principaux avantages de chaque technique de mesure, selon les critères de rapidité, de coût, de reproductibilité, de fiabilité, de sensibilité et de résolution de chaque technique de mesure dans chaque secteur d'activité [90].

Ce chapitre est ainsi structuré : une première partie résumant la méthodologie de recherche, particulièrement le choix de l'échantillon, le questionnaire d'enquête et la mesure des variables. Ensuite, une deuxième partie présente les résultats de l'enquête et enfin une troisième partie relative aux discussions et aux conclusions.

II. Méthodologie de l'Etude

En vue de réaliser un état des lieux des entreprises marocaines en matière d'utilisation des techniques de mesures en maintenance préventive, nous avons mené une enquête auprès de 50 entreprises, soit un taux de 28%, l'échantillon enquêté est caractérisé par une valeur réduite suite aux difficultés rencontrées dans le sens de mobilisation des entreprises à répondre au questionnaire. Avant de présenter les résultats de cette enquête, nous définissons dans ce qui suit la méthodologie de l'étude qui a été suivie, notamment, les caractéristiques de l'échantillon, le mode de collecte de données ainsi que les mesures des différentes variables.

1. Le choix de l'échantillon

La population visée dans notre travail concerne toutes entreprises, tous secteurs confondus. En ce qui concerne le choix de l'échantillon nous avons choisi comme critère 'la certification', c'est-à-dire que toutes les entreprises de notre échantillon doivent au moins être

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

certifiées ISO 9001, possédant d'un manuel de qualité, soumettent à des audits qualité et leurs opérateurs sont informés sur les objectifs à atteindre en matière de qualité des produits.

Les entreprises enquêtées présentent divers profils en ce qui concerne leur secteur d'activités (Tableau 14).

TABLEAU 14. REPARTITION DES INDUSTRIES QUI ONT RENSEIGNE LE QUESTIONNAIRE SELON LEUR SECTEUR D'ACTIVITES

	Secteur d'activité					
	Chimique	Agroalimentaire	Textile	Automobile	Pharmaceutique	Service
Nombre d'entreprises qui ont renseigné le questionnaire	1	4	1	5	0	3
Total de questionnaires renseignés	14					

2. Le questionnaire d'enquête

Le questionnaire élaboré est constitué de trois types de question, des questions fermes, des questions ouverts et des questions à choix multiple. Pour ces derniers, nous avons demandé aux répondants d'évaluer les caractéristiques de chaque technique de mesure étudiée sur une échelle de 4 niveaux que nous avons adaptés en collaboration avec les responsables maintenance.

Le questionnaire utilisé dans notre enquête est principalement composé de trois parties :

- Présentation de l'entreprise : il s'agit, pour chaque entreprise, d'indiquer le type de secteur d'activité (chimique, agroalimentaire, textile, automobile ou bien service), les caractéristiques de la production (la production est continue, discontinue ou bien par projet), la clientèle (public, PME, multinationale ou bien gouvernementale) et le marché destiné (local, régional, national ou bien à l'export).

- La maintenance dans l'entreprise : il s'agit ici, de caractériser l'organisation générale de la maintenance, d'évaluer le suivi technique et de d'indiquer le type de la maintenance pratiquée.
- Les techniques de mesure en maintenance préventive : dans cette partie, il s'agit pour chaque entreprise, d'indiquer les techniques de mesure utilisées, d'évaluer les caractéristiques de chaque technique de mesure étudiée et de lister les autres techniques de mesure utilisées et qu'elles ne sont pas mentionnées dans notre questionnaire.

La version finale de ce questionnaire a été réalisée en collaboration avec des responsables de maintenance et ensuite renseigné en face à face et aussi par la voie emails auprès des responsables de la maintenance, le cas échéant, auprès des membres du service de la maintenance. L'enquête en face à face par rapport à l'enquête par voie email, présente divers avantages, tels que l'interaction avec les répondants et le recueil d'informations plus approfondies et plus informelles servant à l'analyse des résultats.

3. La mesure des variables

Le questionnaire renferme des questions permettant de couvrir les principales limites qui menacent la réussite des opérations de la maintenance au sein des entreprises enquêtées et les principaux avantages de chaque technique de mesure. Il regroupe aussi des questions relatives aux critères de rapidité d'exécution, coût, reproductibilité, fiabilité, sensibilité et de la résolution qui permettent de faire une synthèse comparative entre ces techniques de mesure.

III. Résultats

L'objectif de ce travail consiste à discerner les principaux avantages et limites de chaque technique de mesure sur un échantillon d'entreprises marocaines, suivie d'une synthèse comparative entre ces techniques dans chaque secteur d'activité.

Mais avant d'entamer l'étude principale, il nous semble nécessaire de savoir la démarche mercatique (marché auquel l'entreprise destine les produits qu'elle fabrique), la clientèle ciblée, les caractéristiques de la production, l'organisation et type de la maintenance pratiquée pour chaque secteur d'activité des entreprises marocaines.

1. Présentation générale des entreprises marocaines

Le tableau suivant représente le marché auquel les entreprises destinent les produits qu'elles fabriquent, leurs clientèles ciblées, ainsi que leurs caractéristiques de la production :

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

TABLEAU 15. LE MARCHÉ, LA CLIENTELE ET LES CARACTERISTIQUES DE LA PRODUCTION DE NOTRE ECHANTILLON

Secteur d'activité		Chimique	Agroalimentaire				Textile	Automobile					Service		
Total d'entreprises		1	4				1	5					3		
			Ag1	Ag2	Ag3	Ag4		A1	A2	A3	A4	A5	S1	S2	S3
Marché	Local	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	×	-	-
	Régional	-	×	-	-	×	-	-	-	×	-	-	-	-	-
	National	-	-	×	×	-	×	-	×	×	-	×	-	×	×
	A export	×	-	×	×	-	×	×	×	×	×	-	-	-	×
Clientèle	Public	-	×	×	×	×	-	-	-	×	-	-	×	×	×
	PME	-	-	×	×	-	×	-	-	×	-	-	-	×	-
	Multinationale	×	-	-	×	-	×	×	×	×	×	×	-	-	×
	Gouvernementale	×	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	×	-
Caractéristique de la production	Continu	×	×	-	×	-	×	×	-	×	-	-	×	-	×
	Discontinu	-	-	×	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Par projet	-	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	-	×	-

Selon l'échantillon, nous pouvons remarquer que : 100 % des entreprises chimiques, 33 % des entreprises agroalimentaires, 50% des entreprises textiles, 44% des entreprises d'automobile et 25% des entreprises de service, leurs marchés sont destinés, à l'export. 33% des entreprises d'agroalimentaire et d'automobile et 50% des entreprises de textile et de service leurs marchés sont, sur le plan national. 33% des entreprises d'agroalimentaire et 11% des entreprises d'automobile leurs marchés sont sur le plan régional. 25% des entreprises de service et 11% des entreprises d'automobile leurs produits qu'elles fabriquent sont destinés au marché local.

Quant à la clientèle, nous pouvons remarquer que : la clientèle des entreprises chimiques est de 50% multinational et 50% gouvernemental. La clientèle des entreprises d'agroalimentaire est 57% public, 28% PME et 14% multinational. La clientèle des entreprises de textile est constituée principalement de PME et multinational. 62% de la clientèle des entreprises d'automobile est multinational ; 12% gouvernemental, PME et public. 50% de la clientèle des entreprises de service est public, 16% PME, multinational et gouvernemental.

On remarque clairement que toutes les entreprises chimiques et textiles, 67% des entreprises de service, 50% des entreprises agroalimentaire et 33% des entreprises d'automobile fabriquent leurs produits en continu. 67% des entreprises d'automobile et 33% des entreprises de service fabriquent leurs produits par projet. Alors que 50% des entreprises d'agroalimentaire fabriquent leurs produits en discontinu.

2. La maintenance dans les entreprises marocaines

Le tableau suivant représente l'organisation générale, le suivi technique et le type de la maintenance pratiquée pour chaque secteur d'activité de notre échantillon :

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

TABLEAU 16. L'ORGANISATION GENERALE, LE SUIVI TECHNIQUE ET LE TYPE DE LA MAINTENANCE PRATIQUE DANS NOTRE ECHANTILLON

Secteur d'activité		Chimique	Agro-alimentaire	Textile	Automobile	Service
Organisation générale	La maintenance est rattachée au service production	100%	100%	100%	74%	70%
	Le pourcentage de la maintenance sous traitée	100%	100%	40%	64%	80%
	Les responsabilités et les tâches sont clairement définies	70%	70%	100%	100%	70%
	Le service maintenance assure la sécurité et l'hygiène du travail	70%	70%	100%	88%	70%
	Les responsables assurent le perfectionnement de leur personnel dans le domaine technique	70%	70%	40%	80%	80%
Suivi technique	Documentation technique générale	100%	100%	100%	100%	100%
	Inventaire des équipements par unité	100%	70%	100%	100%	100%
	Historique des travaux par équipement	100%	70%	40%	100%	100%
	Les moyens de reprographie	70%	70%	70%	70%	90%
Type de la maintenance	Corrective	70%	100%	70%	100%	100%
	Préventive	40%	40%	10%	100%	100%

Selon les répondants :

Pour toutes les entreprises de chimie, de textile et d'agroalimentaire, le service de la maintenance est totalement rattaché (dépendant) au service de la production. Le service de la maintenance est rattaché au service de la production à 74% pour les entreprises d'automobile et à 70% pour les entreprises de service.

Concernant les responsabilités et les tâches des responsables sont clairement définies à 100% pour les entreprises d'automobile et textile et à 70% pour les entreprises de service, d'agroalimentaire et chimique.

Les entreprises d'agroalimentaire et chimique ont 100% de la maintenance sous-traitée, les entreprises de service ont 80% de la maintenance sous-traitée, les entreprises d'automobile ont 64 % de la maintenance sous-traitée, alors que 40% de la maintenance sous-traitée dans les entreprises de textile.

Quant au service de la maintenance, il assure totalement la sécurité et hygiène du travail dans les entreprises textile, 88% dans les entreprises automobile et 70% dans les entreprises agroalimentaire, service et chimique.

Pour le perfectionnement du personnel dans le domaine technique, les responsables les assurent à 80% dans les entreprises de service et d'automobile, à 70% dans les entreprises chimiques et agroalimentaires et à 40% dans les entreprises textiles.

Globalement toutes les entreprises marocaines disposent d'une documentation technique générale suffisante : (mécanique de construction, électricité, réglementation,...).

L'inventaire des équipements par unité existe totalement pour toutes les entreprises sauf à 70% pour les entreprises d'agroalimentaire.

Les entreprises de service, d'automobile et chimique possèdent parfaitement un historique des travaux pour chaque équipement, alors que les entreprises d'agroalimentaire possèdent 70% des historique, et les entreprises de textile ne possèdent que 40% des historique.

Les moyens de reprographie, classement et archivage sont suffisants à 90% dans les entreprises de service et à 70% dans les entreprises d'automobile, d'agroalimentaire, de textile et chimique.

Et pour le type de la maintenance pratiquée, on remarque que les entreprises d'automobile et de service utilisent totalement la maintenance corrective et la maintenance préventive ; les entreprises agroalimentaires utilisent totalement la maintenance corrective et 40% de la maintenance préventive ; les entreprises chimiques pratiquent 70% de la maintenance corrective et 40% de la maintenance préventive, alors que les entreprises de textile ne pratiquent que la maintenance corrective avec un pourcentage de 70%.

3. Les techniques de mesure en maintenance préventive

3.1. Secteur chimie

Toutes les entreprises chimiques utilisent la plupart des techniques de mesure en maintenance prédictive : l'analyse vibratoire ; la thermographie ; la radiographie ; le ressuage et la magnétoscopie.

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure pour les entreprises chimiques marocaine qui ont renseigné le questionnaire :

TABLEAU 17. LES PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CHAQUE TECHNIQUE DE MESURE POUR LES ENTREPRISES CHIMIQUES DE NOTRE ECHANTILLON

		Critères	Pourcentages
Analyse vibratoire	Avantage	-Appareillage coûteux	40%
		-Exige une préparation très longue (cinématique, points de mesure, détermination des seuils...)	40%
	Inconvénient	-La méthode ne peut déterminer l'organe défectueux	100%
		-Exige une formation du personnel	100%
		-les défauts de faibles énergies sont indécélables	100%
		-Les réponses spectrales de certains défauts sont analogues	100%
		-problème de la somme de plusieurs défauts	100%
		-Les signaux type chocs ne sont pas détectés	100%

Thermographie	Avantage	-Localisation des points chauds	100%
		-Mesures sans contact sur des objets *en mouvement, *sous tension, *inaccessibles, *polluants ;	100%
		-L'accès à des environnements sévères	70%
	Inconvénient	-Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface)	100%
		-Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	100%
Ultrasons	Avantage	-Localisation de la longueur du défaut	100%
		-prendre des mesures sans aucun danger	100%
		-Associer aux fortes épaisseurs	100%
	Inconvénient	-Pas de trace de contrôle	70%
		-Subjectivité de l'interprétation de l'opérateur	100%
Magnétoscopie	Avantage	-Localisation précise des défauts de surface	100%
		-Appréciation de la longueur des défauts	70%
	Inconvénient	-Utilisable que pour les pièces en alliage ferromagnétique	100%
		-Pas d'appréciation de la profondeur des défauts	100%
		-La sensibilité dépend de l'orientation du défaut	70%

Radiographie	Avantage	-Bonne définition des images	100%
		-Archivage des résultats	100%
	Inconvénient	-Rayonnements dangereux	100%
		-Sensibilité dépend de la direction des défauts	10%
		-Pénétration très limitée	10%
	Ressuage	Avantage	-Permet une localisation précise des défauts de surface et une appréciation de leurs largeurs
-La seule méthode globale en CND autorisant un examen de la totalité de la surface			100%
-L'orientation du défaut n'influence pas l'inspection			70%
Inconvénient		-Mise en évidence uniquement des défauts débouchant à la surface	100%
		-Applicable pour les matériaux non absorbants	70%
		-L'interprétation délicate	40%
		-Utilisation des produits inflammables et irritants	100%

3.1.1. Etude comparative

Le graphe suivant représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure étudiées précédemment selon les critères suivants : la facilité à mettre en œuvre, la rapidité d'exécution, le coût, la reproductibilité, la fiabilité, la sensibilité et la résolution.

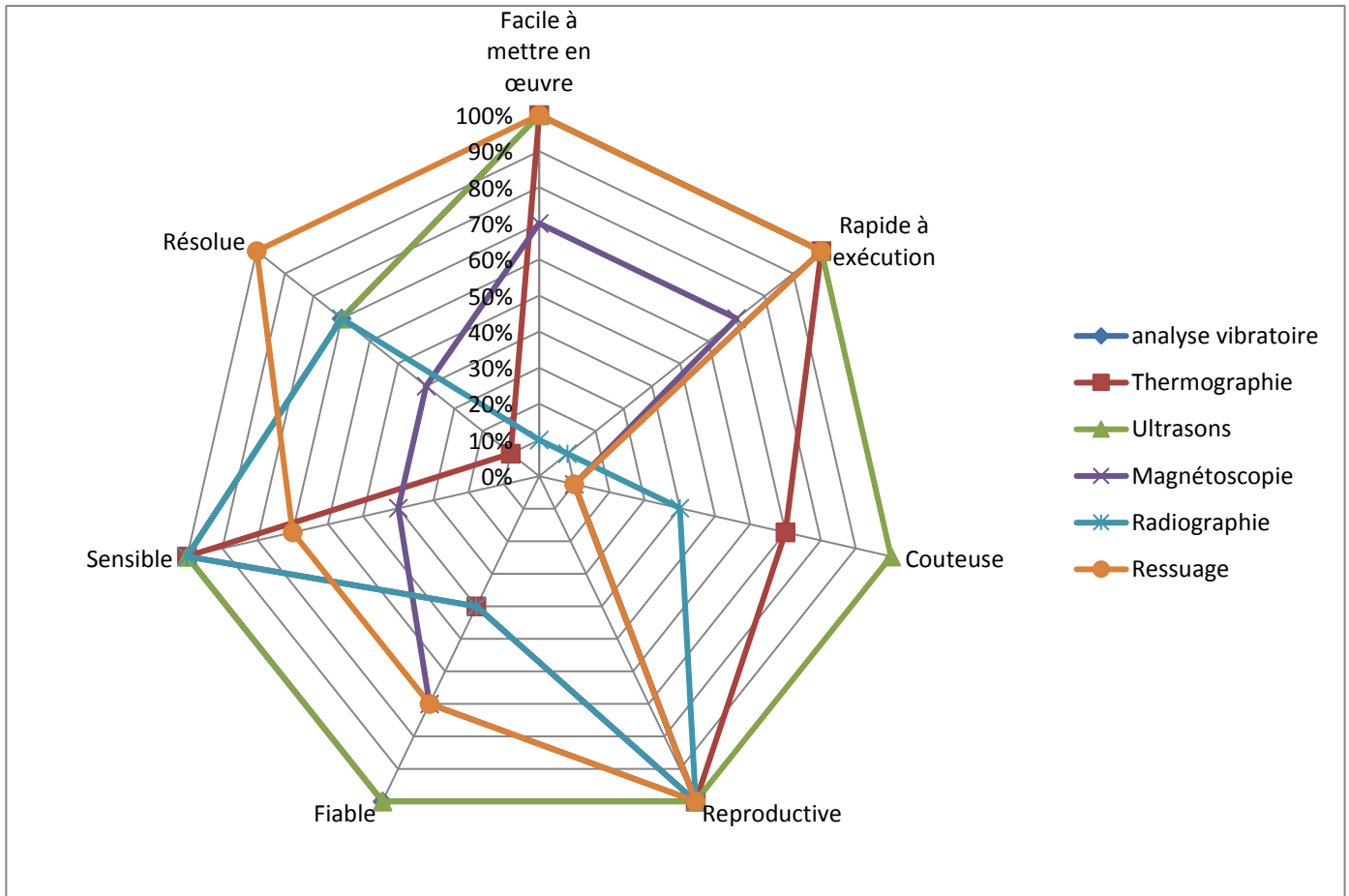


Figure 29. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure selon les entreprises chimiques marocaines de notre échantillon

En tenant compte des résultats présentés dans le graphe précédent, on a pu élaborer le tableau suivant qui représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure utilisées dans les entreprises chimiques marocaines de notre échantillon.

TABLEAU 18. SYNTHÈSE COMPARATIVE ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE POUR LES ENTREPRISES CHIMIQUES MAROCAINES DE NOTRE ÉCHANTILLON

	facilité	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Ressuage	++	++	--	++	+	+	++
Radiographie	--	--	-	++	-	++	+
Thermographie	++	++	+	++	-	++	--
Ultrasons	++	++	++	++	++	++	+
Magnétoscopie	+	+	--	++	+	-	-
Analyse vibratoire	++	+	--	++	++	++	+

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

A la lecture des résultats présentés dans le tableau précédent, on peut lire par exemple que les ultrasons est la technique de mesure la plus coûteuse, le coût de la thermographie est moyennement élevé, et le coût de la magnétoscopie et l'analyse vibratoire est moins chère par rapport au coût de la radiographie.

Si on prend par exemple la technique de mesure analyse vibratoire, on remarque qu'elle est moyennement résolue et rapide, mais plus fiable, sensible et reproductible.

3.2. Secteur Agroalimentaire

Seulement 25% des entreprises agroalimentaire qui n'utilisent que l'analyse vibratoire et la thermographie.

TABLEAU 19. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE CHAQUE TECHNIQUE DE MESURE SELON LES ENTREPRISES AGROALIMENTAIRES QUI ONT RENSEIGNE LE QUESTIONNAIRE :

		Critères	Pourcentages
Analyse vibratoire	Avantage	-Exige une formation du personnel	10%
		-Exige une préparation très longue (cinématique, points de mesure, détermination des seuils...)	40%
	Inconvénient	-La méthode ne peut déterminer l'organe défectueux	100%
		-les défauts de faibles énergies sont indécélables	100%
		-Les réponses spectrales de certains défauts sont analogues	0%
		-problème de la somme de plusieurs défauts	100%
		-Les signaux type chocs ne sont pas détectés	100%
-Appareillage coûteux	70%		
Thermographie	Avantage	-Localisation des points chauds	100%
		-Mesures sans contact sur des objets *en mouvement, *sous tension, *inaccessibles, *polluants ;	100%
		-L'accès à des environnements sévères	100%
	Inconvénient	-Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface)	100%
		-Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	10%

3.2.1. Etude comparative

Le graphe suivant représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure étudiées précédemment selon la facilité à mettre en œuvre, la rapidité d'exécution, le coût, la reproductibilité, la fiabilité, la sensibilité et la résolution.

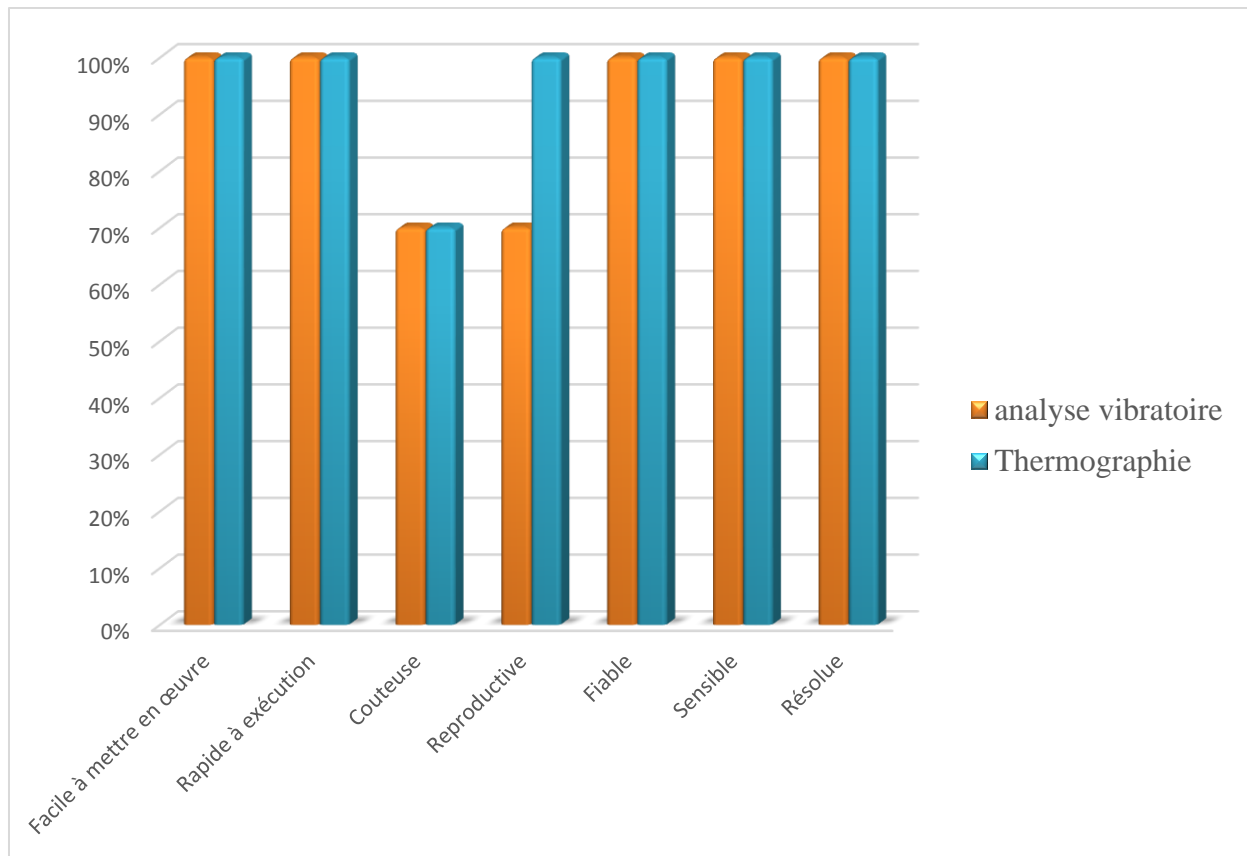


Figure 30. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure pour les entreprises agroalimentaires marocaines de notre échantillon

En tenant compte des résultats présentés dans le graphe précédent, on a pu élaborer le tableau suivant qui représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure utilisées dans les entreprises agroalimentaires marocaines de notre échantillon.

TABLEAU 20. SYNTHÈSE COMPARATIVE ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE POUR LES ENTREPRISES AGROALIMENTAIRES MAROCAINES DE NOTRE ÉCHANTILLON

	facilité	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Thermographie	++	++	+	++	++	++	++
Analyse vibratoire	++	++	+	+	++	++	++

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

Selon les entreprises agroalimentaires marocaines qui ont renseigné notre, l'analyse vibratoire et la thermographie ont les mêmes critères de facilité, rapidité, coût, fiabilité, sensibilité et résolution, mais quant à la reproductibilité, la thermographie est plus reproductible par rapport à l'analyse vibratoire.

3.3. Secteur Automobile

40% des entreprises d'automobile n'utilisent que l'analyse vibratoire et la thermographie comme techniques de mesure en maintenance prédictive :

Les avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure selon les entreprises d'automobile marocaines qui ont renseigné le questionnaire :

TABLEAU 21. LES PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CHAQUE TECHNIQUE DE MESURE POUR LES ENTREPRISES AUTOMOBILES DE NOTRE ECHANTILLON

		Critères	Pourcentages
Analyse vibratoire	Avantage	-Exige une formation du personnel	40%
		-Exige une préparation très longue (cinématique, points de mesure, détermination des seuils...)	40%
	Inconvénient	-La méthode ne peut déterminer l'organe défectueux	100%
		-les défauts de faibles énergies sont indécélables	10%
		-Les réponses spectrales de certains défauts sont analogues	0%
		-problème de la somme de plusieurs défauts	100%
		-Les signaux type chocs ne sont pas détectés	100%
-Appareillage coûteux	100%		
Thermographie	Avantage	-Localisation des points chauds	100%
		-Mesures sans contact sur des objets *en mouvement, *sous tension, *inaccessibles, *polluants ;	100%
		-L'accès à des environnements sévères	100%
	Inconvénient	-Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface)	100%
		-Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	10%

3.3.1. Etude comparative

Le graphe suivant représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure étudiées précédemment selon les critères suivants : la facilité à mettre en œuvre, la rapidité d'exécution, le coût, la reproductibilité, la fiabilité, la sensibilité et la résolution.

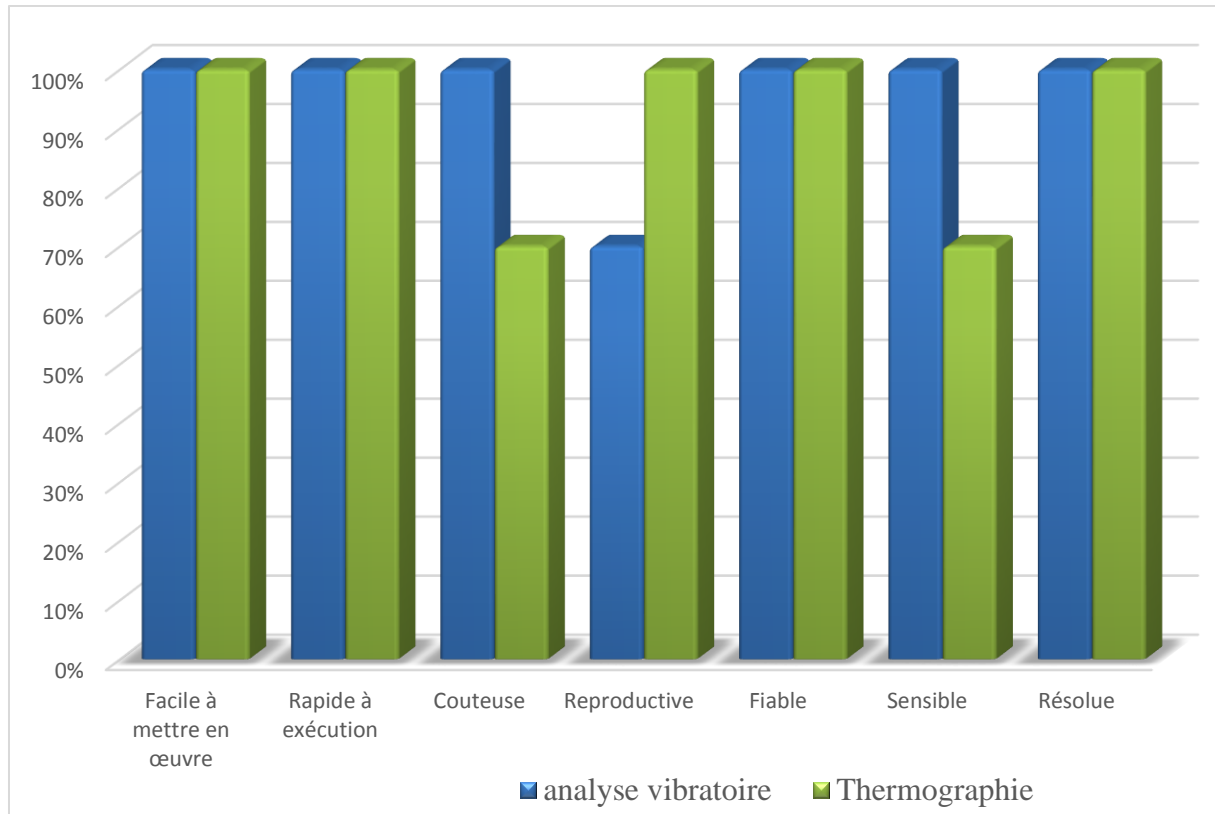


Figure 31. Etude comparative entre les différentes techniques de mesure selon les entreprises automobiles marocaines de notre échantillon

En tenant compte des résultats présentés dans le graphe précédent, on a pu élaborer le tableau suivant qui représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure utilisées dans les entreprises automobiles marocaines de notre échantillon.

TABLEAU 22. SYNTHÈSE COMPARATIVE ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE POUR LES ENTREPRISES D'AUTOMOBILE MAROCAINES

	facilité	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Thermographie	++	++	+	++	++	+	++
Analyse vibratoire	++	++	++	+	++	++	++

Selon les entreprises d'Automobile marocaines, l'analyse vibratoire et la thermographie sont plus faciles à mettre en œuvre, plus rapides, plus fiables et résolues, quant à la

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

reproductibilité, la thermographie est plus reproductible par rapport à l'analyse vibratoire, mais l'analyse vibratoire est très chère et plus sensible par rapport à la thermographie.

3.4. Secteur Service

67% des entreprises de service n'utilisent que l'analyse vibratoire et la thermographie comme techniques de mesure en maintenance prédictive.

Les avantages et les inconvénients de chaque technique de mesure selon les entreprises de service de notre échantillon :

TABLEAU 23. LES PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ANALYSE VIBRATOIRE ET LA THERMOGRAPHIE POUR LES ENTREPRISES DE SERVICE DE NOTRE ECHANTILLON

		Critères	Pourcentages
Analyse vibratoire	Avantage	-Exige une formation du personnel	70%
		-Exige une préparation très longue (cinématique, points de mesure, détermination des seuils...)	70%
	Inconvénient	-La méthode ne peut déterminer l'organe défectueux	10%
		-les défauts de faibles énergies sont indécélabes	0%
		-Les réponses spectrales de certains défauts sont analogues	0%
		-problème de la somme de plusieurs défauts	10%
		-Les signaux type chocs ne sont pas détectés	10%
-Appareillage coûteux	100%		
Thermographie	Avantage	-Localisation des points chauds	100%
		-Mesures sans contact sur des objets *en mouvement, *sous tension, *inaccessibles, *polluants ;	100%
		-L'accès à des environnements sévères	100%
	Inconvénient	-Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface)	70%
		-Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	70%

3.4.1. Etude comparative

Le graphe suivant représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure étudiées précédemment selon les critères de la facilité à mettre en œuvre, la rapidité d'exécution, le coût, la reproductibilité, la fiabilité, la sensibilité et la résolution.

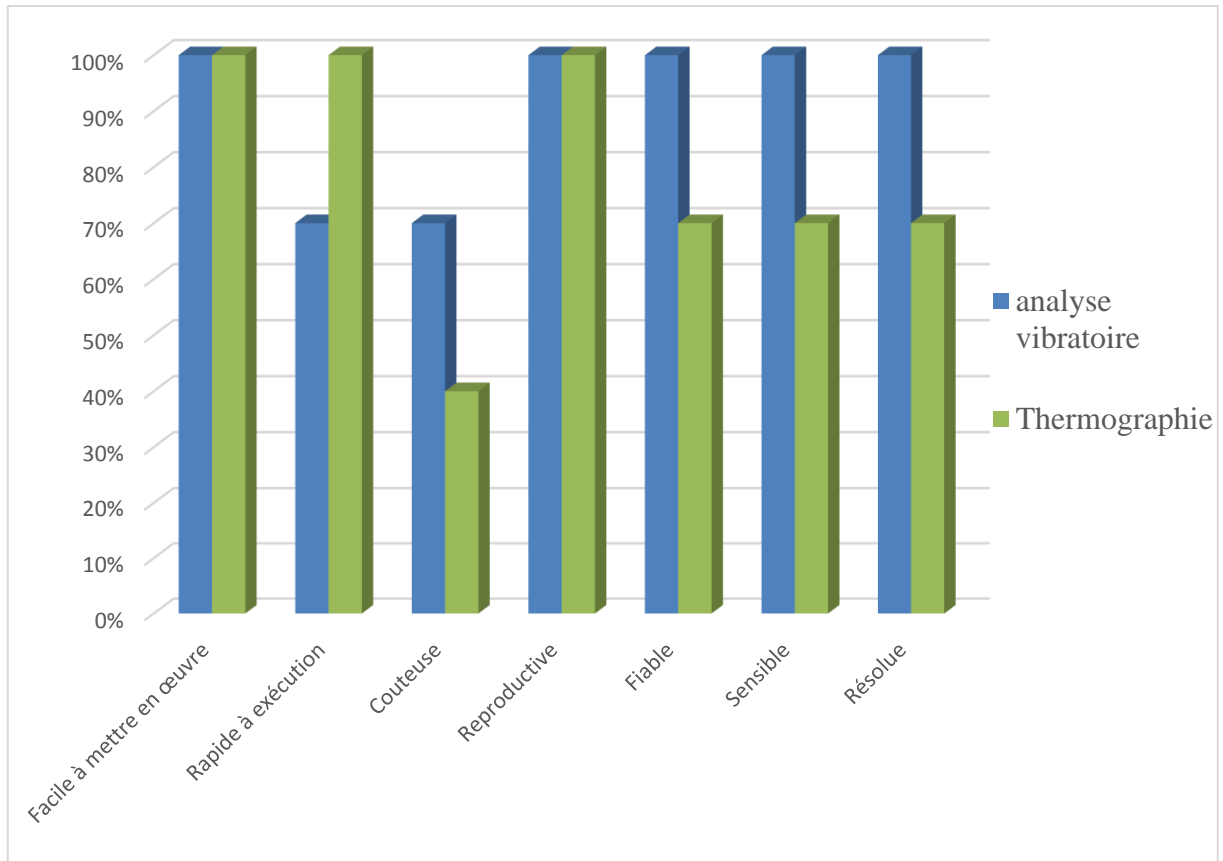


Figure 32. Synthèse Comparative entre les Différentes techniques de Mesure selon les Entreprises de Service Marocaines

En tenant compte des résultats présentés dans le graphe précédent, on a pu élaborer le tableau suivant qui représente une synthèse comparative entre les techniques de mesure utilisées dans les entreprises de service marocaines de notre échantillon.

TABLEAU 24. SYNTHÈSE COMPARATIVE ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MESURE POUR LES ENTREPRISES DE SERVICE MAROCAINES

	facilité	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Thermographie	++	++	-	++	+	+	+
Analyse vibratoire	++	+	+	++	++	++	++

Chapitre III : Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines

Selon les entreprises de service marocaines, l'analyse vibratoire et la thermographie sont plus faciles à mettre en œuvre et reproductible, quant à la rapidité, la thermographie est plus rapide par rapport à l'analyse vibratoire, mais l'analyse est chère, plus fiable, plus sensible et résolue par rapport à la thermographie.

3.5. Textile

Toutes les entreprises textiles marocaines de notre échantillon n'utilisent pas les techniques de mesure en maintenance prédictive. En effet, d'une part, ces entreprises possèdent des machines qui ne sont pas trop sophistiquées et qui ne demandent pas des contrôles de mesure de la maintenance prédictive. D'autre part, les techniques de mesure étudiées dans notre papier demandent des investissements très importants alors que ces entreprises réussissent à maintenir leurs installations par des actions réparatrices et correctives.

3.6. Synthèse

Selon notre étude, on a pu dresser le tableau suivant qui résume l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive pour chaque secteur d'activité et autres techniques de mesure que les entreprises utilisent :

TABLEAU 25. LES TECHNIQUES DE MESURE UTILISE DANS CHAQUE SECTEUR D'ACTIVITE DE NOTRE ECHANTILLON

Secteur d'activité	Chimique	Agro-alimentaire	Textile	Automobile	Service
Analyse vibratoire	×	×	-	×	×
Thermographie	×	×	-	×	×
Ultrasons	×	-	-	-	-
Magnétoscopie	×	-	-	-	-
Radiographie	×	-	-	-	-
Ressuage	×	-	-	-	-
Autres techniques de mesure	Feaz and ray	-Contrôle visuelle -Pince ampèremètre	-	-Contrôle visuelle -Mesure des tensions des courroies dans les machines de coupe. -Mesure des Forces des Pins Push-back sur les tests électriques. -Mesure des débits d'air.	-

IV. Discussion & Conclusion

Les entreprises marocaines sont de plus en plus confrontées aux problématiques d'arrêt de la production, notamment, les arrêts et les pannes imprévus et spontanés des machines. En effet, notre enquête menée auprès de 14 entreprises montre que ces dernières ont connu une augmentation de leur coût de maintenance et par la suite une baisse de leur chiffre d'affaire avant d'utiliser la maintenance prédictive. De nombreuses causes peuvent expliquer cette augmentation : d'une part des coûts de la maintenance concerne principalement les problèmes de la sécurité et de la surveillance en terme de personne, d'autre part des opérations mal effectuées est surtout relatives à l'augmentation des coûts qui semble perturber la majorité des entreprises. D'autres causes ont pu aussi être relevées, telles que les retards, les ralentissements, etc. Notons que ces causes ne sont pas relatives à l'entreprise particulièrement mais touchent tous les secteurs d'activités.

La majorité des entreprises enquêtées ont affirmé que l'augmentation des coûts de la maintenance a dépassé les 30%. Cette augmentation enregistrée est due aux pannes et arrêts non programmés des machines. Il s'ensuit une décélération du rythme de décroissance puis une légère amélioration de certaines entreprises après l'utilisation des techniques de mesure dans leurs programmes de la maintenance préventive.

Pour les entreprises agroalimentaires, les entreprises qui ont introduit les techniques de mesure, notamment, l'analyse vibratoire et la thermographie, sont arrivées à éliminer 40% des nuisances auprès d'analyse vibratoire et presque toutes les nuisances auprès de la thermographie.

Pour les entreprises de service, l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive semble très importante, principalement, pour les entreprises qui ont le public comme principal client. En effet, pour certaines entreprises électriques et d'après les répondants, l'état passait fréquemment des commandes importantes pour assurer les besoins des administrations publiques et des différents ministères, alors une mauvaise politique de la maintenance a des conséquences désastreuses sur l'image et la réputation de l'entreprise. Cette étude a montré que les entreprises qui ont utilisé l'analyse vibratoire et la thermographie comme techniques de mesure en maintenance préventive, sont arrivées à éliminer presque toutes les nuisances auprès d'analyse vibratoire et jusqu'à 70 % des nuisances auprès de la thermographie.

Pour les entreprises d'automobiles qui ont adopté l'analyse vibratoire et la thermographie en maintenance préventive, sont arrivées à éliminer jusqu'à 70 % auprès de ces deux techniques de mesure.

Enfin, les entreprises chimiques ayant utilisé toutes les techniques de mesure dans leur programme de la maintenance, sont arrivées à éliminer jusqu'à 40 % des nuisances auprès d'analyse vibratoire, 10% des nuisances auprès de la thermographie, jusqu'à 70% des nuisances auprès des ultrasons et de la magnétoscopie, et presque toutes les nuisances auprès de la radiographie et du ressuage.

La technique de mesure la plus utilisée dans la plupart des entreprises qui ont renseigné notre enquête est l'analyse vibratoire (51,52%), suivie de la thermographie (48%); et seulement 3% des entreprises de notre échantillon qui utilisent le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons et la radiographie.

La majorité des équipements industriels sont constitués par des systèmes mécaniques, c'est pour cette raison que le pourcentage de l'utilisation de l'analyse vibratoire est remarquable. Donc le contrôle de vibration constitue généralement l'élément-clé des programmes de maintenance prédictive. Néanmoins, cette technique ne peut fournir toute l'information requise. Pour cela, un programme de maintenance prédictive complet doit faire appel à d'autres techniques de contrôle telles que : la thermographie, la radiographie, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons.

67% des entreprises ont indiqué que la performance de chaîne logistique est affecté d'une façon grave par les risques liés à la planification de la maintenance [91], d'où l'intérêt de proposer une méthodologie permettant la mise en place de la maintenance prédictive basée sur les CND et le choix d'une technique adéquate en s'appuyant sur les indicateurs et des grandeurs physiques par une analyse approfondie et des conditions de fonctionnement du processus étudié qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE MISE EN PLACE D'UNE MAINTENANCE PREDICTIVE BASEE SUR LES CONTROLES NON DESTRUCTIFS

Dans ce chapitre, l'objectif assigné est de proposer une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les Contrôles Non Destructifs (MPCND), cette méthodologie s'articule en six phases complémentaires. Le présent chapitre consiste à fournir une description précise de chaque phase de notre méthodologie ainsi le déploiement des trois premières étapes au sein de l'un des ateliers d'un office phosphorique comme cas d'étude.

I. Introduction

La plupart des travaux de recherche dans le domaine industriel porte sur le développement des outils de surveillance et de diagnostic. Par contre, les travaux qui traitent l'aspect managérial notamment la mise en œuvre de la maintenance préventive basé sur les CND(MPCND) se font rares [92]. En outre, la plupart des programmes et politiques de maintenance préventive échouent suite au : manque des outils managériaux [93] et l'absence d'informations réelles qui permettraient de déterminer les besoins immédiats en réparation ou en maintenance.

En effet, dans plusieurs études bibliographiques, certains auteurs ont constaté qu'il n'y a pas de norme internationale sur la mise en œuvre et la gestion d'un programme de maintenance préventive [94], alors que d'autres auteurs ont présenté :

- des suggestions pour l'implantation d'un processus de maintenance conditionnelle [95] ;
- comment un programme de maintenance prédictive peut être établi [96] ;
- des conseils pratiques de mise en œuvre de la maintenance prédictive, axés sur les domaines clés permettant l'atteinte des objectifs fixés par l'entreprise [97] ;
- une démarche d'implantation de la maintenance conditionnelle en quatre phases successives, l'étude de faisabilité, la phase d'analyse, la phase de mise en place et la phase d'évaluation[92], cette démarche met l'accent sur un ensemble de facteurs clés de la réussite lors du processus d'implantation tels que le soutien managérial, la formation du personnel, la bonne communication entre les différentes parties prenantes et la motivation., mais elle ne présente pas les procédures de déploiement

dans une entreprise industrielle, en plus elle ne prend pas en considération les spécificités des techniques utilisées dans la maintenance prédictive (analyse vibratoire, thermographie, radiographie, ressuage, magnétoscopie) ;

- un programme de mise en place de la maintenance conditionnelle basé sur l'analyse vibratoire en huit étapes focalisées sur l'aspect technique, mais néglige l'aspect managérial [98] ;
- une démarche permettant la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire en quatre phase [99] : l'étude de faisabilité, les choix techniques, le démarrage du programme et la pratique de surveillance globale. Mais cette démarche néglige la faisabilité organisationnelle.

Les deux dernières démarches citées ci-dessus, ne fournissent pas des procédures détaillées sur le déroulement de la mise en place. En plus, elles ne sont ni testées ni validées dans les cas réelles.

Dans cette optique, notre objectif sera d'utiliser les trois dernières démarches pour élaborer une démarche de mise en place de la maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs [100], cette démarche s'articule sur six phases complémentaires :

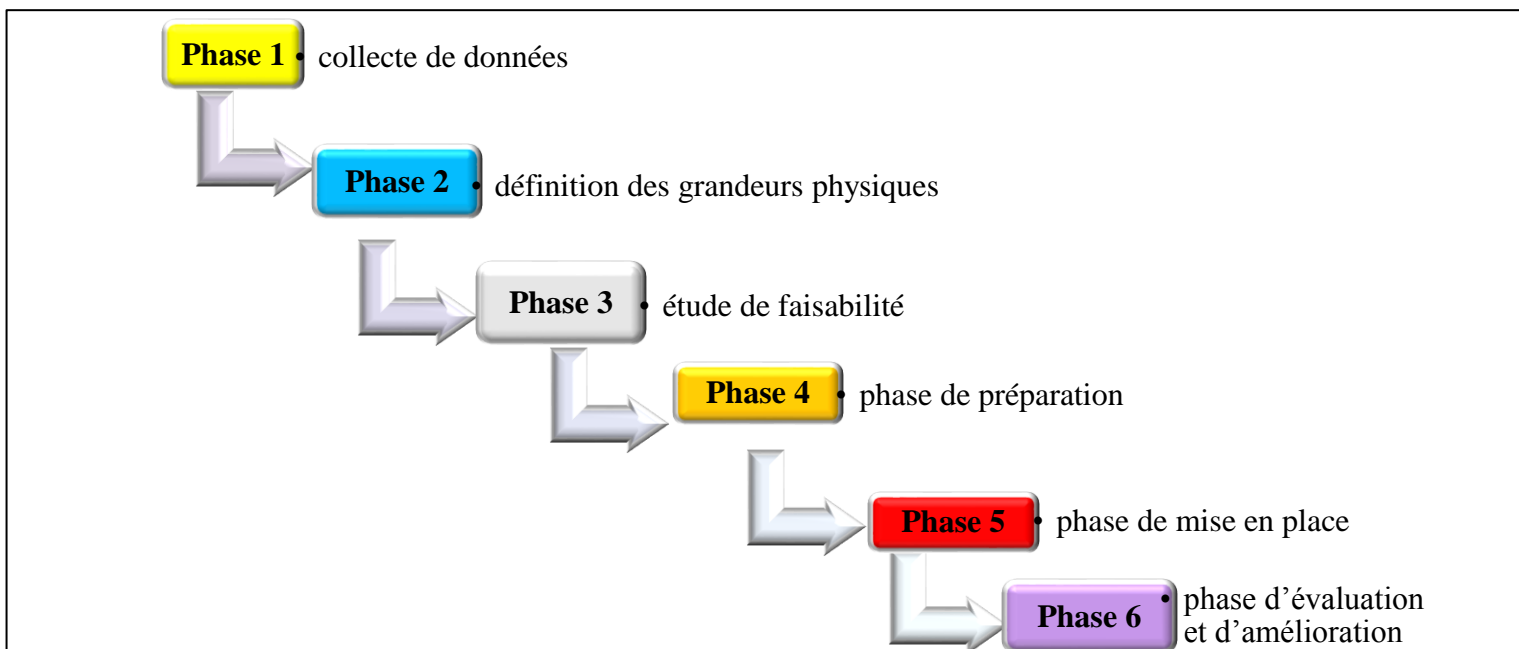


Figure 33. Les six phases de notre démarche de mise en place de la maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs

II. Démarche de mise en place de la MPCND

Pour éviter les problèmes qui risqueraient de ralentir et même d'arrêter la production, l'entreprise doit adopter une stratégie de maintenance de l'ensemble des équipements le long de leur cycle de vie, qui vise à : une meilleure gestion et organisation, le contrôle des équipements, la détection des anomalies ainsi qu'un diagnostic précis des dysfonctionnements.

Du fait qu'un mauvais programme de maintenance peut empêcher l'augmentation des taux de production et nuire au développement des entreprises, le programme de maintenance doit se diriger vers une maintenance prédictive, qui contient nombreuses techniques (analyse vibratoire ; thermographie ; ultrasons ; radiographie ; ressuage ; magnétoscopie).

Dans ce contexte, il nous a semblé opportun de proposer une démarche de mise en place de la maintenance prédictive basé sur les contrôles non destructifs MPCND, qui s'articule en six phases complémentaires (figure 34) : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.

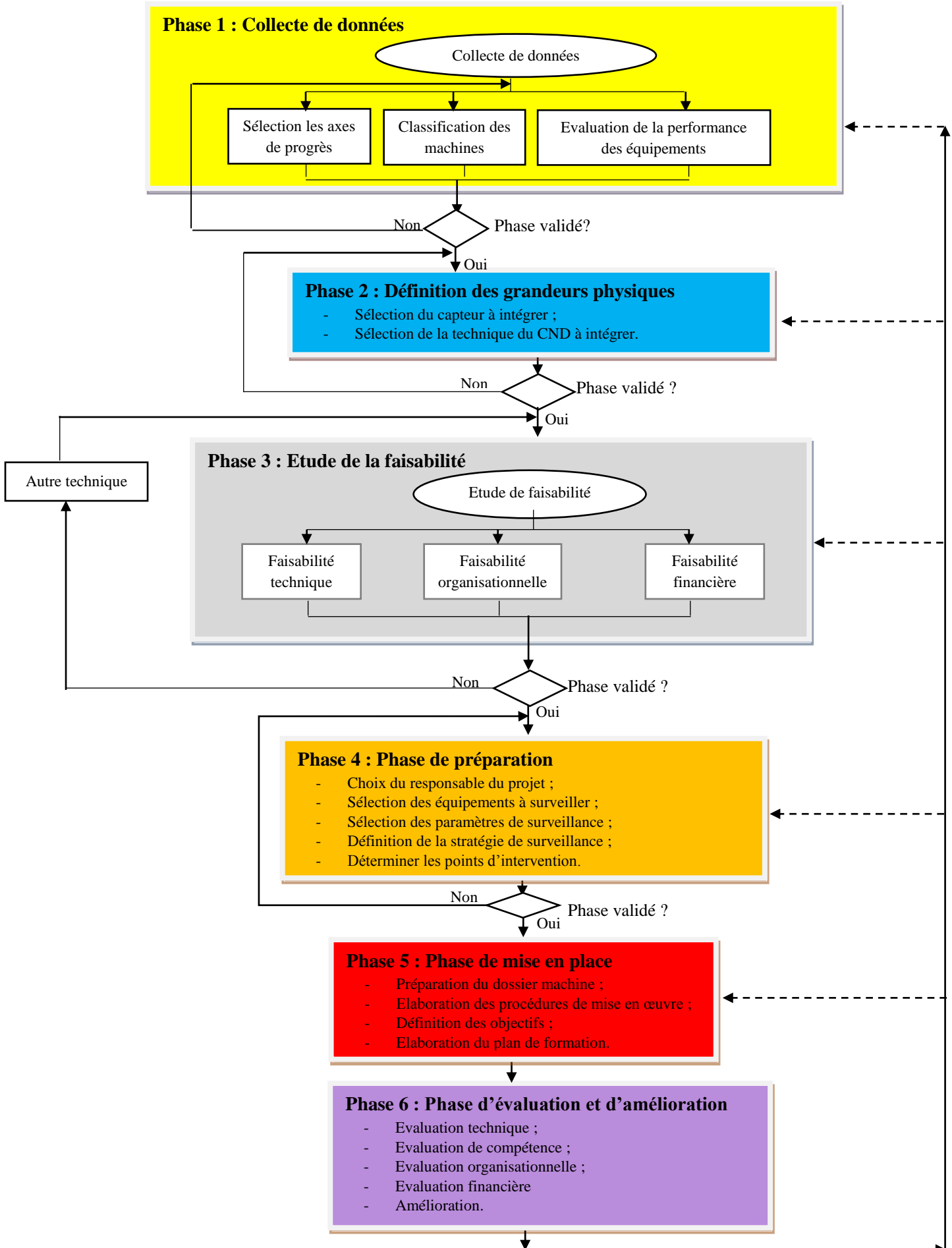


Figure 34. Démarche de mise en œuvre de la MPCND

1. Phase 1 : Collecte de données :

Cette première phase consiste à extraire les données relatives aux états des équipements à partir : des fiches de l'historique des équipements, des documents techniques du constructeur et de l'expérience du personnel ; à sélectionner les axes de progrès, il s'agira de définir les axes de progrès les plus profitables en tenant compte des spécificités de l'entreprise ainsi que les moyens disponibles ; et finalement à évaluer la performance du parc machine

Cette phase permet :

- de faire une première analyse du fonctionnement des équipements à travers les données collectées,
- de localiser les principaux défauts, leurs possibles causes, leurs récurrences et leurs effets,
- d'identifier les défaillances de ces équipements et limiter les risques,
- de classer les équipements,
- de connaître la fréquence des défaillances, de remplacement de pièces,
- de déduire la périodicité des opérations de contrôle et remplacement systématique,
- d'assurer un suivi régulier de la performance des machines,
- d'assurer le développement des compétences du personnel ;
- d'identifier les forces, les faiblesses, les menaces et les opportunités du parc machine.

2. Phase 2 : définition des grandeurs physiques

Cette phase consiste à définir les grandeurs physiques (Vibration, émission acoustique, température...) qui doivent être sensibles à l'apparition et/ou l'évolution du défaut et qui nous permettra de choisir les moyens de contrôle (appareillage) à intégrer, ces derniers dépendent d'une part, de la complexité de l'équipement et d'autre part, de l'appareillage disponible et fourni par les fournisseurs des services technologiques. Et par la suite de mieux sélectionner les techniques de contrôles non destructifs.

3. Phase 3 : Etude de la faisabilité

Dans cette phase, il s'agira de vérifier la faisabilité du projet de mise en œuvre de la MPCND sur le plan technique, organisationnel et financier [101] :

- Faisabilité technique : L'étude de la faisabilité technique précise les grands paramètres du système qui permettront de réaliser le concept élaboré ou serviront à sa prestation (capacité, choix de technologies, processus et calendrier de production). L'étude de la

faisabilité technique détaille subséquentement les diverses facettes de ce système (stocks, approvisionnement, équipements, outillages, manutention, transport, main-d'œuvre, aménagement, installations, localisation).

- Faisabilité Organisationnelle : Elle remet en question les capacités de l'entreprise à gérer adéquatement l'organisation, la dotation, le fonctionnement, la qualité, le suivi, le contrôle et les aspects légaux du projet. Au besoin, la réalisation de l'étude de la faisabilité organisationnelle améliore ou complète ensuite les capacités de l'entreprise.
- Faisabilité Financière : L'étude de la faisabilité financière détermine la rentabilité de l'investissement avec les critères établis. Ensuite, elle prend en compte le contexte fiscal, estime le coût de la surveillance afin d'évaluer la rentabilité du programme MPCND.

4. Phase 4 : Phase de préparation

Après la validation de la phase « étude de faisabilité », la phase de préparation permet de prendre conscience du programme MPCND, cette phase peut s'articuler en cinq points suivants :

- Définition des acteurs du projet : l'achèvement de cette phase avec succès nécessite l'intervention et la collaboration de tout le personnel de l'entreprise avec la diversité de leurs fonctions et services, dans cette étape il faut :
 - ✓ Établir un comité directeur ou choisir certaines personnes à consulter et tenir responsables des décisions importantes, comme la conception du processus, la logistique, les communications, la gestion, la coordination et les finances,
 - ✓ Déterminer qui récoltera les données (spécialistes ou employés spécialement formés),
 - ✓ Déterminer la logistique, les ressources, la technologie et les personnes nécessaires pour élaborer et mettre en œuvre d'un plan de MPCND.
- Sélection des équipements à surveiller : selon la classification établie dans la première phase afin d'identifier les équipements les plus critiques afin de :
 - ✓ Surveiller le bon fonctionnement des équipements,
 - ✓ Identifier les équipements en état de panne,
 - ✓ Suivre l'état de la production et la disponibilité,
 - ✓ Faire des statistiques des pannes et des états d'arrêt des équipements

- Sélection des paramètres de surveillance : choix des indicateurs de surveillance, l'emplacement des capteurs, l'intervalle de mesure selon les grandeurs physiques définies dans la deuxième phase ;
- Définition de la stratégie de surveillance : en se servant des CND afin de quantifier le vieillissement des structures et anticiper des accidents, dans cette étape on définit les seuils, les suivis d'évolution et les périodes (intervalles de mesure) ;
- Détermination des points d'interventions : il s'agira d'identifier exhaustivement les activités et processus critiques au sens des unités maintenables critiques.

5. Phase 5 : Phase de mise en place

Après la phase de préparation, la phase de mise en place est un processus comportant les points suivants :

- *La création des dossiers machines* : Pour mettre en place de la MPCND, le personnel doit disposer des dossiers techniques résumant les caractéristiques techniques des machines et des pièces d'usure; des fiches d'historique résumant les opérations déjà effectuées, en d'autres termes, le comportement de la machine; de la documentation du fournisseur constamment mise à jour et résumant l'évolution des techniques et des banques de données.
- *La mise en place des procédures de mise en œuvre* : cette étape a pour but de:
 - ✓ Gérer des compétences des acteurs en CND,
 - ✓ Planifier, mesurer, diagnostiquer et analyser les défaillances : à l'aide d'utilisation des certains outils des techniques du génie industriel qui sont fortement conseillé (AMDEC, TDPC...)
 - ✓ Assurer un suivi de l'accompagnement et de la sous-traitance,
 - ✓ Mettre à jour les dossiers machines,
 - ✓ Mesurer et suivre les différents indicateurs.
- *La mise en place des indicateurs de performance* : pour quantifier la réussite du programme et justifier les différents investissements.
- *La définition d'un plan de formation continue* : qui rassemble l'ensemble des actions de formation définies dans le cadre de la politique de gestion du personnel de l'entreprise. Le plan de formation peut comporter deux types d'actions : les actions visant à assurer l'adaptation au nouveau projet ou liées à l'évolution ou au maintien dans l'emploi dans l'entreprise, elle se déroule obligatoirement pendant le temps de

travail ; et les actions ayant pour objet le développement des compétences des salariés qui peut se dérouler pendant et hors le temps de travail ;

- *Analyse des pannes* : tout dépassement d'un des seuils définis dans la quatrième phase, doit être suivi d'un diagnostic approfondi dans le but d'identifier la gravité du défaut et les causes racines de ce dépassement.

6. Phase 6 : Phase d'évaluation et d'amélioration

Cette phase consiste à instaurer des indicateurs d'évaluation à chaque étape du processus d'implantation afin de s'assurer de la bonne exécution du projet et avoir un système d'évaluation fiable qui permet aux responsables de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue.. Cette phase combine plusieurs opérations :

- ✓ Assurer la veille technologique dans ses dimensions techniques et financières
- ✓ Mettre en place et maintenir les systèmes de mesure des CND
- ✓ Assurer une amélioration permanente des processus
- ✓ Structurer et maintenir le système d'information
- ✓ Garantir la pérennité et la fiabilité des informations
- ✓ Gérer la diffusion et les échanges d'information

Il devrait aussi inclure les éléments suivants :

- ✓ Un résumé des résultats de l'analyse et de l'interprétation des données ;
- ✓ Les mesures qui seront prises pour éliminer les obstacles et lacunes et tirer parti des possibilités à l'heure actuelle et à l'avenir ;
- ✓ Des objectifs réalistes et atteignables avec des délais à court et à long terme ;
- ✓ les commentaires sollicités auprès des intervenants ;
- ✓ La surveillance, l'évaluation et le rapport des progrès accomplis par rapport aux objectifs établis.

Dans le but d'exploiter et de valider notre démarche proposée, une étude de cas a été faite au sein de l'un des ateliers d'un office phosphorique. Dans le cadre de cette étude, nous présenterons le déploiement des phases de notre démarche de mise en place d'une MPCND à savoir : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et la phase d'évaluation et d'amélioration.

III. Etude de Cas

Pour le déploiement de notre démarche proposée, l'atelier choisi est l'atelier sulfurique qui a pour fonction principale la production de l'acide sulfurique (H_2SO_4), selon le procédé MONSANTO à double absorption, à partir du soufre liquide. Il génère aussi la vapeur d'eau surchauffé pour l'utile interne d'office phosphorique, qui construit une partie importante dans l'industrie de phosphate et leurs dérivés. Pour assurer sa production annuelle, l'entreprise en question dispose d'un ensemble d'ateliers qui rassemblent leurs biens et services produits schématisé comme suit :

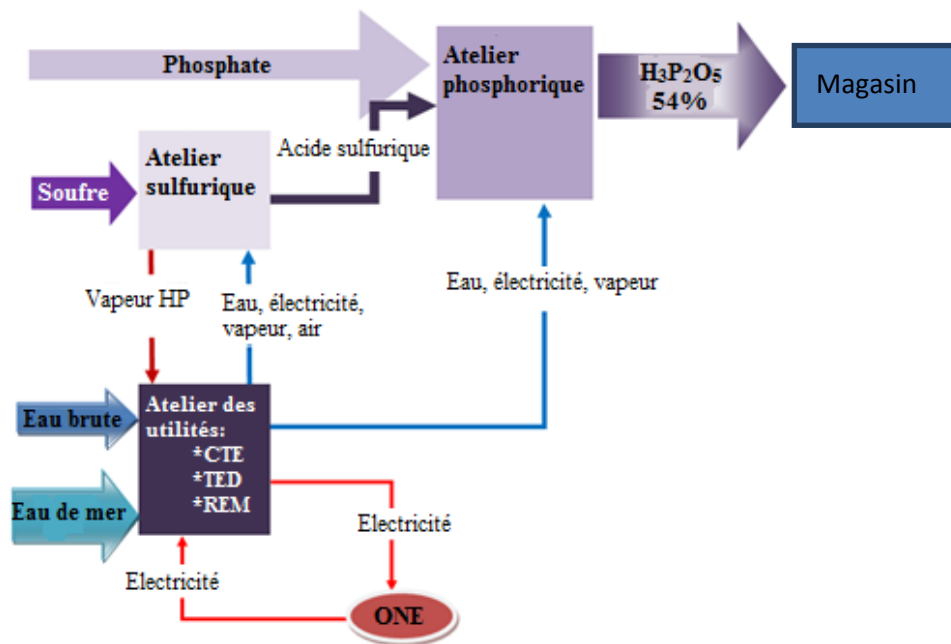


Figure 35. Schéma bloc des différents ateliers d'office phosphorique

L'atelier Sulfurique objet de l'étude est divisé en 5 procédés à savoir : Stockage du soufre liquide ; Combustion du soufre ; Conversion ; Production d'acide sulfurique ; Stockage d'acide sulfurique.

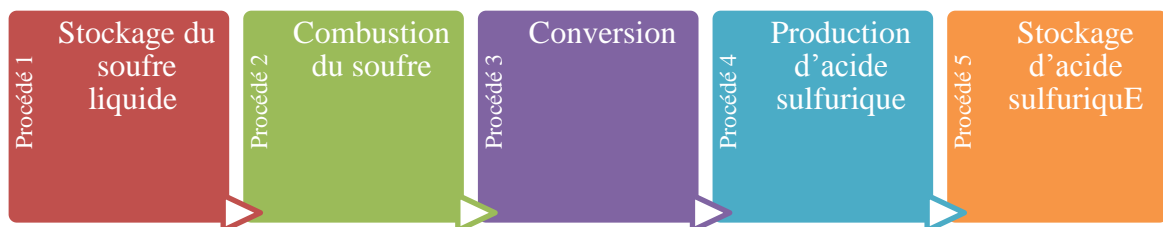


Figure 36. Les 5 procédés de l'atelier sulfurique d'office phosphorique

1. Phase 1 : Collecte de données

1.1. Sélection les axes de progrès

Afin de déterminer les axes de progrès du parc machine, nous commençons par analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats), c'est une analyse interne et externe de notre atelier, présentée sous une forme matricielle.

L'analyse se divise en 2 groupes :

Les forces et faiblesses : Ce sont les facteurs positifs et négatifs de l'entreprise d'origine interne. Ce sont des éléments qui peuvent être, en théorie, régulés par le biais du management de l'entreprise.

Les opportunités et menaces : Ce sont les facteurs positifs et négatifs de l'entreprise d'origine externe. C'est éléments évoluent indépendamment des décisions managériales de l'entreprise mais doivent être pris en compte par la direction.

La réalisation d'une analyse SWOT est une étape primordiale lors de la planification du projet de la mise en place du MPCND.

TABLEAU 26. ANALYSE DES FORCES, FAIBLESSE, MENACES ET OPPORTUNITES DE L'ATELIER SULFURIQUE

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Existence d'un capital humain qui détient une expérience solide et qui vise l'alignement à la stratégie du groupe ; - Atelier en amélioration continue. - Suivi rigoureux des indicateurs de performance ; - Existence d'une GMAO. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limites de responsabilités parfois absentes ; - Absence de dossiers machine ; - Probabilité d'occurrence d'accidents de travail et maladies professionnel élevée ; - Gestion des pièces de rechange non développée ; - Mal organisation du magasin local et de la station de graissage.
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - L'office phosphorique est en amélioration continue ; - Impérativité du changement vu la conjoncture économique mondiale 	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de production à cause de l'indisponibilité des machines et des pannes ; - Indisponibilité des équipements et machines à cause du manque des pièces de rechange et

actuelle ; – Refonte de tout le système de maintenance ; – Possibilité de Benchmark entre services et lignes de production.	mauvaise gestion de la lubrification ; – Perte de confiance des clients ; – Retard de livraison due à l'indisponibilité des machines ; – Dégradation du climat de travail ; – Augmentation des coûts à cause des accidents de travail ; – Pertes à cause de la mal organisation de l'espace de travail.
---	--

Il s'agit de définir les axes de progrès les plus profitables en tenant compte des spécificités de l'atelier ainsi que ses moyens disponibles. A partir de l'analyse des forces, faiblesses, menaces et opportunités du parc éolien on peut identifier ses axes de progrès :

- ✓ Minimiser les coûts de la maintenance ;
- ✓ Minimiser les heures d'arrêt de la production ;
- ✓ Faciliter la possibilité de faire des interventions.

1.2. Classification des équipements

La classification des équipements a pour but de déterminer les équipements critiques de l'atelier qui induisent beaucoup d'arrêt de production, elle assure une meilleure exploitation des ressources de maintenance, main d'œuvre et moyen financier.

Dans cette étape, on applique la méthode multicritère TDPC, c'est une méthode d'évaluation des équipements de production. Elle fait partie des étapes de gestion de la maintenance d'office phosphorique, son principe est la classification des équipements selon les critères suivants :

- **T** : Temps de réparation, c'est le temps moyen pris dans l'historique ;
- **D** : Degré d'influence, c'est l'effet sur la sécurité, l'environnement, la qualité produit, les coûts ;
- **P** : Probabilité de panne, basé sur l'historique ;
- **C** : Criticité de l'équipement, basé sur la durée d'arrêt de production.

Chaque critère, on lui affecte un barème, ce barème, déterminé selon le tableau ci-dessous, a été élaboré en accord avec les industriels:

TABLEAU 27. LES CRITERES TDPC ET BAREME ASSOCIE.

Critère	Thème	Barème
Temps de réparation (T)	Temps moyen de réparation MTTR	Supérieur à 2 jour = 35
		24h < ... < 48h =30
		12h < ... < 24h =25
		8h < ... < 12h =20
		4h < ... < 8H =15
		0,5h < ... < 4H =10
		< 0,5H = 5
Degré d'influence (D)	Charge de la machine	100 % = 5; Inf. à 60% = 1
	Effet sur la qualité (Indice Qualité)	Pas d'effet = 1, effet sup à 10% = 5
	Coût de non qualité (Réclamation clients)	2500 DH= 1; Sup. à 25000 DH = 5
	Perte d'énergie	2500 DH = 1; Sup. à 40000 DH = 5
	Impact sur le rendement	Perte inf. à 0,01 % = 1; Perte de 0,1% = 5
	Effet sur la sécurité	Aucun = 1; Risque élevé = 5
Probabilité de panne (P)	Fréquence des pannes (MTBF)	Inf. à une par mois = 1, Sup. à 4 par mois = 5
Criticité de l'équipement (C)	Criticité de l'équipement par rapport à l'arrêt de la production	20 = pas d'impact sur la production
		40 = impact inférieur à 8 heures
		60 = entre 8 et 24 heures sur une ligne
		80 = plus de 24 heures sur une ligne
		100 = arrêt total de la production plus de 48 h

Le score TDPC est calculé par une sommation des résultats des quatre critères :

$$\text{Score TDPC} = T + D + P + C \quad (11)$$

Le résultat sera une classification avec les critères suivants :

TABLEAU 28. CLASSES ET SCORE DE LA METHODE TDPC

Score de l'évaluation	Type de classe		Description de criticité
95% - 100%	Classe AA	5%	Criticité très élevé
80 - 95%	Classe A	15%	Criticité élevé
20% - 80%	Classe B	60%	Criticité moyen
0% - 20%	Classe C	20%	Criticité faible

Après avoir extrait des informations de l'historique 2006-2014, nous avons abouti à des résultats illustrés dans le graphe ci-dessus :

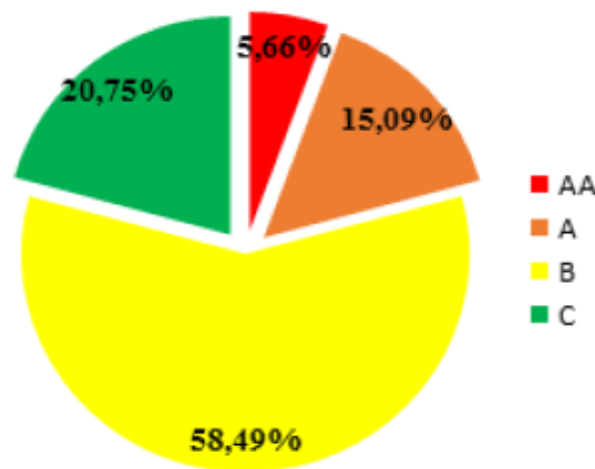


Figure 37. Résultat de la classification des équipements de l'atelier sulfurique

Après le graphe de la figure 37, on remarque que les équipements critiques appartenant à la classe AA représentent 5.66% des équipements de l'atelier sulfurique. D'ailleurs, les équipements ayant une redondance importante et appartenant à la classe A représentent 15.09%. Les équipements ayant une criticité moyenne appartenant à la classe B représentent 58.49% et les équipements de l'atelier sulfurique ayant une faible criticité appartenant à la classe C représentent 20.75%.

1.3. Evaluation de la performance des équipements

La fonction maintenance conditionne fortement le niveau de performance d'une installation, son optimisation est complexe car elle doit prendre en compte différents critères parfois antagonistes comme par exemple la disponibilité et les coûts [102] [103].

Pour effectuer ces choix stratégiques, des méthodes permettant d'optimiser les performances des systèmes sont appliquées [104]. Les responsables de maintenance en

viennent ainsi à envisager de véritables stratégies et ne se contentent plus de surveiller et de réparer, plutôt, ils cherchent à prévoir et à évaluer les événements et les différentes alternatives qui s'offrent à eux pour exploiter au mieux les installations en fonction des contraintes techniques et budgétaires imposées.

Les décisions sont majoritairement prises sur la base d'informations qualitatives fournies par des experts et quelquefois appuyées par des données de retour d'expérience. Il serait toutefois utile de pouvoir effectuer des choix sur des critères quantitatifs décrivant les performances des programmes de maintenance [105], tel que TRS [106], le MTBF et le MTTR [107] [108] qui sont trois indicateurs de performance, largement exploités en maintenance pour suivre la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité d'un bien [109] ; ces indicateurs seront calculés à partir de l'historique des pannes qui renseignent sur l'ensemble des événements qui ont été vécu par chaque équipement depuis sa mise en service.

1.3.1.Moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF :

La Moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF se calcule comme suit :

$$MTBF = \Sigma MTBF_i/n \quad (12)$$

Avec n : nombre de pannes

Cet indicateur fait référence à un autre indicateur qui est la fiabilité, ce dernier peut se calculer de manière probabiliste suivante :

$$F = 1 / MTBF \quad (13)$$

1.3.2.Moyenne des Temps Techniques de Réparation MTTR :

Moyenne des Temps Techniques de Réparation : C'est la somme sur une période donnée des temps d'arrêt pour la maintenance corrective, divisée par le nombre de défaillance. Parfois le temps technique de réparation « TTR » est inférieur au temps d'arrêt « TA ». l'historique dont nous disposons jusqu'à présent renvoie sur le fait que TTR = TA, mais dans le but d'avoir plus de précision, nous proposons qu'on renforce les informations rassemblées dans le cahier de rapport de manière à ajouter toute sorte de perte de temps (attente de matériels, manque d'effectif, degré d'urgence ...) les données seront rassemblées au niveau de la secrétariat de maintenance qui donnera un bilan des problèmes rencontrés lors des interventions afin de bien optimiser le temps d'efficacité des interventions.

Avec les informations dont nous disposons pour ce cycle, nous calculons la moyenne des temps de réparation MTTR comme suite :

$$MTTR = \Sigma TTR_i / n \quad (14)$$

La maintenabilité étant :

$$M = 1/MTTR \quad (15)$$

1.3.3. Disponibilité des équipements :

La disponibilité d'un dispositif est une aptitude à être en état de fonctionner dans des conditions données à un instant t. Il existe plusieurs mesures de disponibilités (Instantanée, moyenne, asymptotique) définies suivant la norme NF X 60-503. Nous allons nous intéresser à un modèle de base, la disponibilité opérationnelle. Cette disponibilité se calcule de la manière suivante :

$$D = MTBF / (MTBF + MTTR) \quad (16)$$

2. Phase 2 : Définition des grandeurs physiques

Définir les grandeurs physiques c'est trouver des paramètres qui mettent en évidence les défaillances (déplacement, température, pression, Vibrations, Emission, Acoustique, Température, Courant...etc.) fournit par son état (situation de mesure), ces grandeurs physiques nous permettront de sélectionner les capteurs et par la suite les techniques de mesure les plus convenables à utiliser. Nous avons développé un algorithme décisionnel de la technique ou les techniques de mesure à utiliser présenté dans la figure 38 :

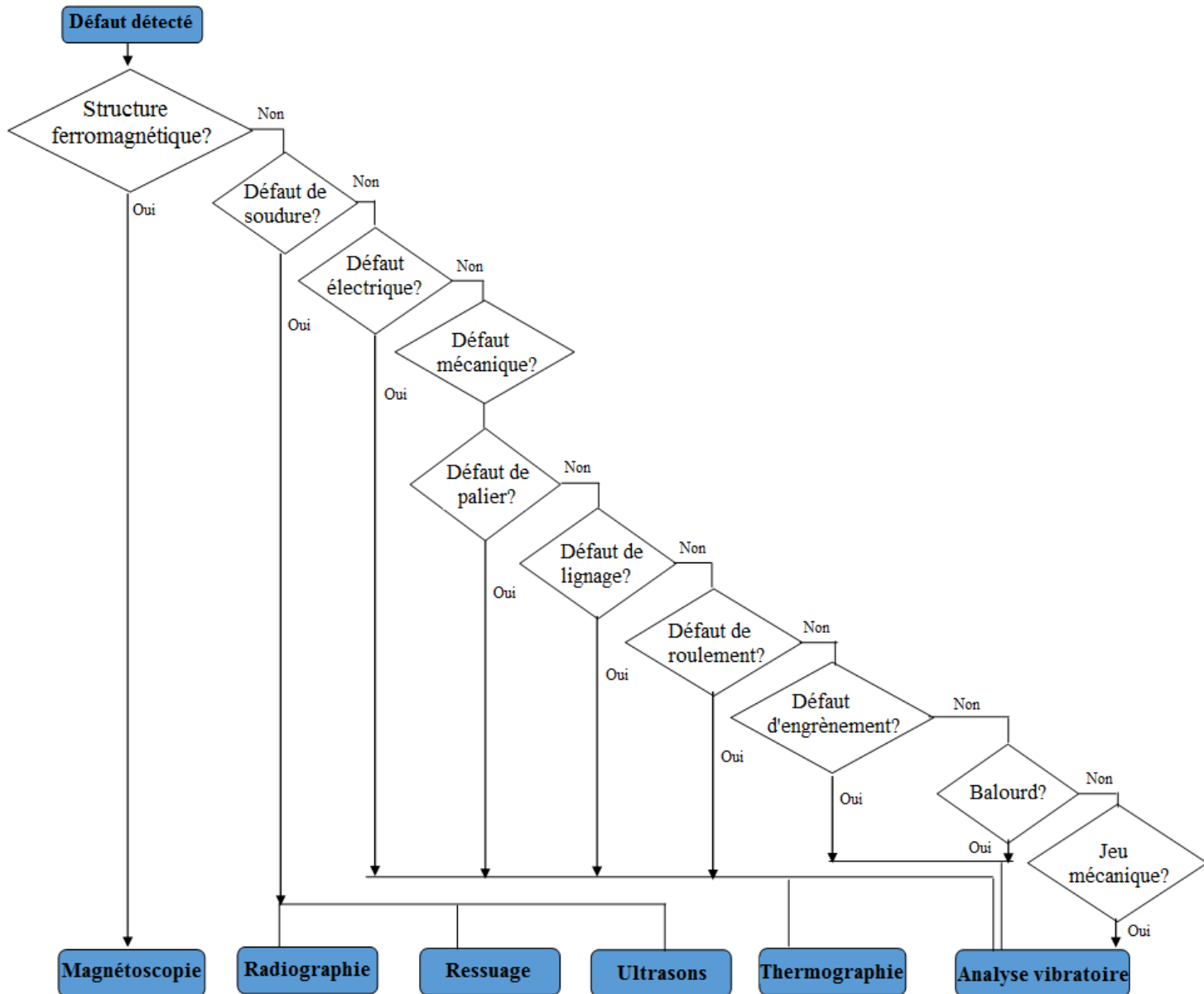


Figure 38. Algorithme décisionnel sur la technique ou bien les techniques de mesure à utilisées

3. Phase 3 : Etude de la faisabilité

Dans cette phase, il s'agira de vérifier la faisabilité du projet de mise en œuvre de la MPCND sur le plan technique, organisationnel et financier :

3.1. Faisabilité technique

Pour étudier la faisabilité technique, nous avons élaboré un algorithme décisionnel (figure 39) de la faisabilité technique des CND pour les machines de l'atelier sulfurique.

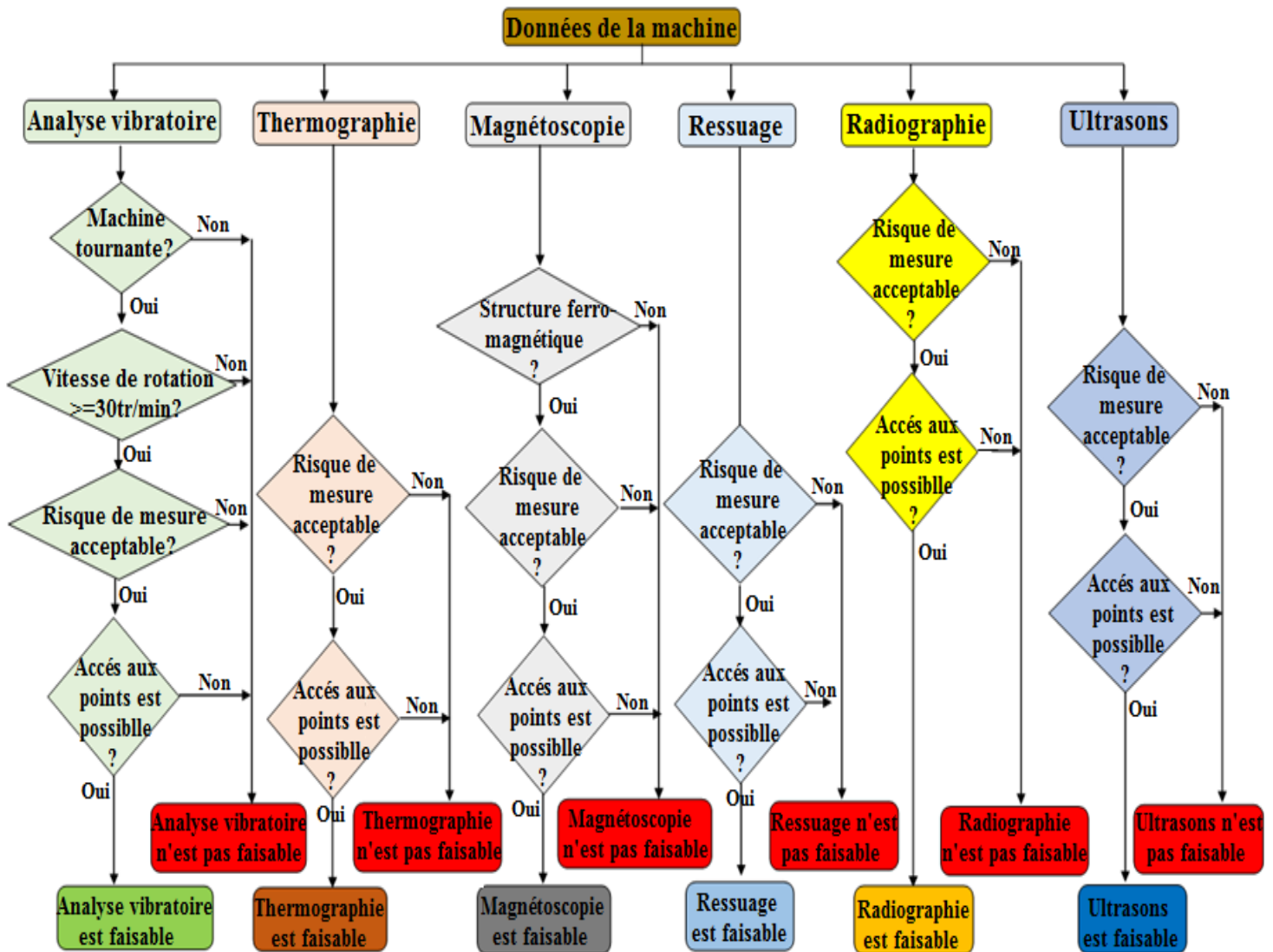


Figure 39. Algorithme décisionnel sur la faisabilité technique des CND

L'étude de la faisabilité technique des techniques du CND nous a permis de conclure que toutes les techniques du CND sont faisables techniquement.

3.2. Faisabilité organisationnelle

Évaluer la faisabilité organisationnelle, c'est évaluer la maturité de la maintenance afin de s'assurer si le service maintenance est prêt à mettre en place la MPCND. Pour le faire nous allons nous appuyer sur un modèle très utilisé dans les entreprises [110], ce modèle est basé sur un grille d'évaluation de dix facteurs (tableau 37) : l'efficacité de la maintenance ; le déploiement et l'organisation politique ; l'approche de la maintenance, la planification des tâches et l'ordonnancement ; la gestion de l'information et la GMAO ; la sous-traitance de la maintenance ; l'amélioration continue ; les aspects financiers ; la gestion des ressources

humaines ; la gestion des pièces de rechange. Chaque facteur est à évaluer suivant 3 niveaux de maturité : Niveau 1 : innocence; Niveau 2 : compréhension; Niveau 3: excellence.

TABLEAU 29. LA GRILLE DE MATURITE DE LA MAINTENANCE

Facteur	Niveau 3: excellence	Niveau 2 : compréhension	Niveau1 : innocence
1-l'efficacité de la maintenance (sortie)	performances de maintenance très satisfaits (>80%)	performances de maintenance satisfaisant (entre 80% et 20%)	Performances d'entretien insatisfaisant (<20%)
2-le déploiement et l'organisation politique	Avoir écrit la politique de maintenance qui est entraînée d'une entreprise ou stratégie de production. Administrateurs impliqués dans l'établissement des politiques et la politique est revue régulièrement	politique de maintenance écrite en place. Avoir cadre intermédiaire ou junior responsable de la maintenance. Maintenance en cours de production. La politique est parfois examiné mais sans participation directe	Aucune politique de la maintenance formel.
3-l'approche de la maintenance	Application de la stratégie de maintenance proactive pour une amélioration durable. Tous les problèmes sont analysés et résolus de façon permanente. la maintenance autonome est appliquée	Avoir un entretien préventif comme une approche principale. Certaines implications opérationnelles dans la maintenance	Fiez fortement sur la stratégie de maintenance réactive (< 50 % de l'effort). Pas d'implication de l'opération dans la maintenance
4-la planification des tâches et l'ordonnancement	Plus de 90% des travaux planifié accompli. Faible heures supplémentaires (<15%)	plus de 50 % des travaux planifié accompli. Relativement élevé des heures supplémentaires (>15 %)	Moins de 50 % des travaux planifié accompli. Haute heures supplémentaires (> 30 %)

<p>5-la gestion de l'information et la GMAO</p>	<p>Meilleure utilisation de GMAO dispose et le bénéfice de GMAO est réalisé</p>	<p>GMAO ou au moins PC utilisé. Avoir des mesures de performance. GMAO ne sont pas très bien utilisés et les avantages ne sont pas pleinement réalisés</p>	<p>Aucun GMAO utilisés. Travail manuel. Les informations sur les lots de flux sur le papier. Aucun système de mesure du rendement utilisé</p>
<p>6-la sous-traitance de la maintenance</p>	<p>Des bénéfices élevés par la sous-traitance de la maintenance</p>	<p>Quelques bénéfices par la sous-traitance de la maintenance</p>	<p>Obtenez des prestations faibles ou pas de sous-traitance de maintenance</p>
<p>7-l'amélioration continue</p>	<p>Maintenance proactive. TPM ou RCM appliquée, les mesures de rendement sont en place et utilisé efficacement</p>	<p>Avoir la maintenance proactive en place, avec la participation de la direction dans l'établissement des politiques et des évaluations</p>	<p>Ne pas avoir TPM ni TPM ni RCM. Faible participation de la direction. la maintenance réactive est très fréquente</p>
<p>8-les aspects financiers</p>	<p>Dépense de la maintenance faible avec une performance efficace. Excellent contrôle budgétaire. La perte de production est mesurée et étudiée</p>	<p>Dépense de la maintenance est relativement élevé dû au manque de contrôle efficace des coûts. La perte de production est mesurée mais pas étudié</p>	<p>Aucun dossier de dépense de la maintenance. Aucun budget de la maintenance. Une mauvaise compréhension des pertes de production et ses coûts associés</p>
<p>9-la gestion des ressources humaines</p>	<p>L'accent mis sur la formation en gestion axée sur les besoins futurs. Description de l'emploi est bien comprise. les gens de maintenance sont bien motivés</p>	<p>Basée sur la formation technique, Description de l'emploi est bien comprise. Bonne performance, mais la gestion des ressources humaines ne sont pas efficaces</p>	<p>Pas de formation. Le manque des compétences. Manque de motivation. Nombre d'employés de la maintenance est relativement élevé, mais un manque de</p>

			performance
10-la gestion des pièces de rechange	Faible coût de stock / coût de remplacement. Pareto est utilisé pour contrôler les exigences des stocks	Le coût de stock / coût de remplacement est relativement élevé. Pas d'utilisation de Pareto	Aucune pièce de rechange enregistré dans le stock. Aucun système de contrôle du stock

Le tableau suivant représente le résultat de l'évaluer de la grille de maturité de notre démarche de mise en place de la MPCND au sein de l'atelier sulfurique.

TABLEAU 30. LE RESULTAT DE L'EVALUATION DE LA GRILLE DE MATURETE DE LA MAINTENANCE AU SEIN DE L'ATELIER ETUDIE

1-l'efficacité de la maintenance (sortie)	Niveau 3
2-le déploiement et l'organisation politique	Niveau 3
3-l'approche de la maintenance	Niveau 2
4-la planification des tâches et l'ordonnancement	Niveau 2
5-la gestion de l'information et la GMAO	Niveau 3
6-la sous-traitance de la maintenance	Niveau 2
7-l'amélioration continue	Niveau 2
8-les aspects financiers	Niveau 2
9-la gestion des ressources humaines	Niveau 3
10-la gestion des pièces de rechange	Niveau 2

D'après le tableau 30, on remarque que les niveaux 2 et 3 de maturité sont atteints pour tous les facteurs de la grille de maturité de la maintenance, on peut donc conclure que, sur le plan organisationnel, l'atelier étudié est prêt à mettre en place de la MPCND.

3.3. Faisabilité financière

Evaluer la faisabilité financière de la mise en place de la MPCND, c'est calculer les différents coûts : dû aux arrêts de la production (figure 40) ; liés à la maintenance ; relatifs au cycle de vie des équipements ; le coût d'investissement de la MPCND. Cette étude juge si l'investissement est rentable ou non.

Dans le calcul des coûts d'arrêt nous avons pris en considération que les arrêts qu'on peut les remédier par les CND ; et pour les coûts liés à la maintenance, c'est la somme des trois coûts principales à savoir : coût de main d'œuvre, coût de la sous-traitance et le coût de matériel et outillages.

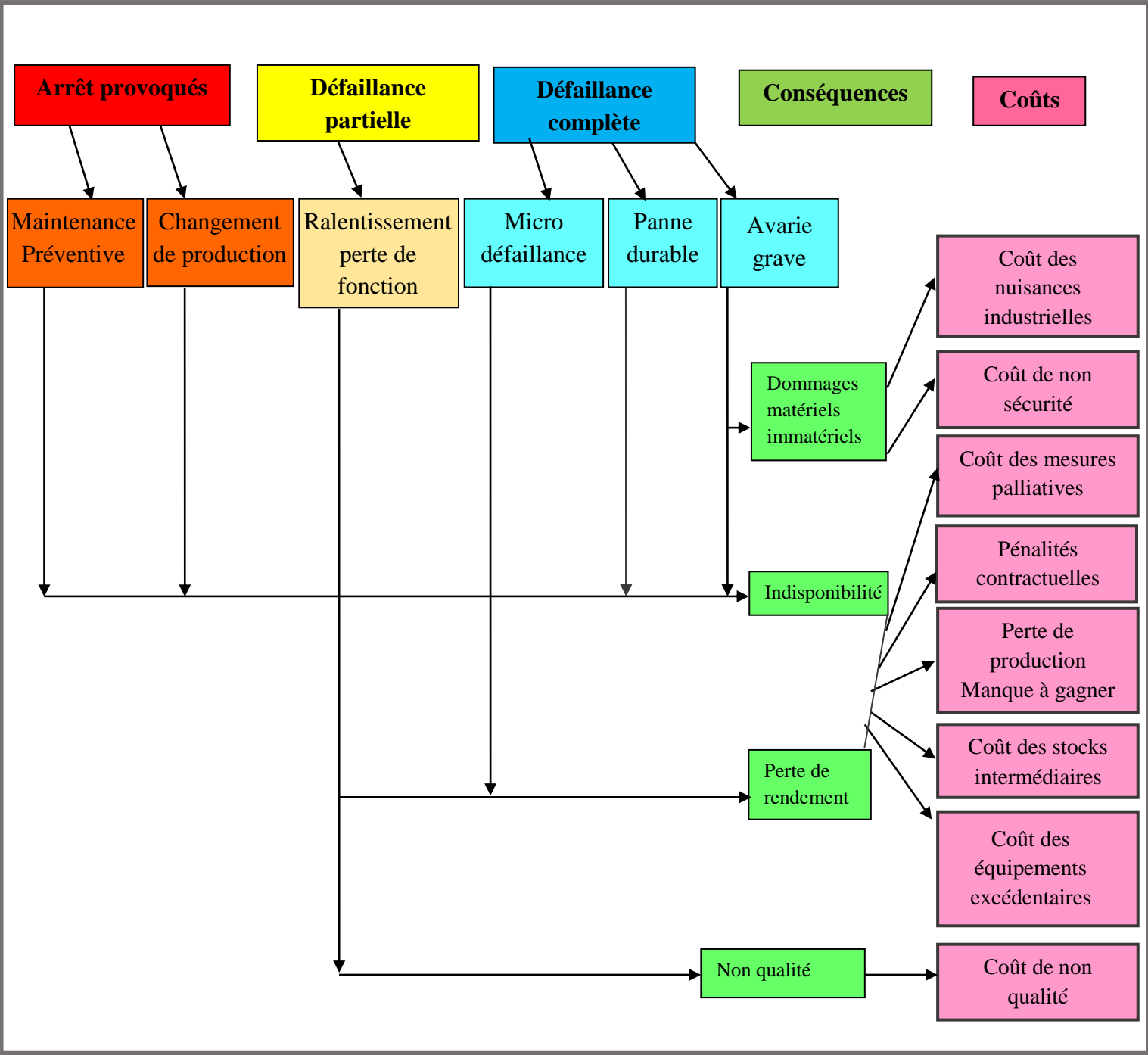


Figure 40. Conséquences des arrêts de production en terme de coût

L'application de cette étape nous a permis de conclure que les techniques du CND sont faisables sur le plan financière.

Après l'étude de la faisabilité, nous avons trouvé que toutes les techniques sont faisables sur le plan technique, organisationnel et financier.

4. Phase 4 : Phase de préparation

Après l'application et validation de la phase «étude de faisabilité», la phase de préparation permet de prendre conscience du programme MPCND, cette phase peut s'articuler en cinq points suivants:

4.1. Choix des acteurs du projet

Ce projet n'est réalisable avec efficacité et dans de bonnes conditions qu'avec l'intervention et la collaboration de tout le personnel de l'entreprise dans un cadre de travail où tous les acteurs sont intéressés au progrès de notre projet. Pour créer ces conditions, il convient tout d'abord d'identifier et de dénombrer les acteurs qui participeront à la mise en œuvre sur le terrain des différentes phases présentées dans notre démarche :

- Le groupe de pilotage : il est constitué des décideurs de l'étude. Ils valident les résultats de chaque phase ;
- Le groupe de synthèse : le rôle de ce groupe est de fournir des informations et de proposer des solutions ;
- Le groupe d'analystes/spécialistes : il regroupe les personnes spécialisées dans l'application du programme de la MPCND. Son rôle principal est la collecte d'informations et l'élaboration de modèles en conformité avec les informations collectées ;
- Le groupe des interviewés : il est composé de personnes compétentes qui recherchent les solutions les mieux adaptées pour améliorer les défauts détectés.

4.2. Sélection des équipements à surveillance

Selon la classification établie dans la première phase, deux équipements de l'atelier sulfurique sont les équipements les plus critiques, et qui ont un MTBF très faible, un MTTR très élevé que nous devons réduire leurs effets nocifs sur la production.

4.3. Sélection des paramètres de surveillance

Pour les deux équipements stratégiques, l'application d'algorithme décisionnel des techniques de mesure développé dans la deuxième phase de notre méthodologie (figure 44), nous a permis de déduire que toutes les techniques de CND sont utilisables.

4.4. Définition de la stratégie de surveillance

La stratégie de la maintenance prédictive basée sur les CND semble plus adéquate à l'amélioration des états des équipements et permet par la même occasion de réduire les opérations de la maintenance inutiles. Dans cette étape on définit les seuils acceptables, ces

seuils seront fixés par le constructeur ou par les normes en vigueur dans la zone où l'entreprise manufacturière est installée. Par la suite, nous établissons la périodicité de chacune des activités. La périodicité est établie dans un premier temps en fonction des données du constructeur, puis elle est modifiée en fonction des conditions d'utilisation.

4.5. Déterminer les points d'interventions

Il s'agira d'extraire exhaustivement les composants les plus critiques pour identifier les points d'interventions des deux équipements critiques, c'est pour cela nous allons utiliser l'analyse AMDEC qui est une technique inductive avec laquelle les effets des causes de défaillances des composants élémentaires sont systématiquement identifiés en indiquant de plus, la criticité des effets de la défaillance [111]

D'après ces analyses l'équipement chaudière et la turbosoufflante sont les plus critique au point de vue fréquence et durée des pannes. (Rapport interne, office phosphorique, 2014)

4.5.1. Application de la technique AMDEC.

On distingue quatre principales étapes pour réaliser une AMDE [112]:

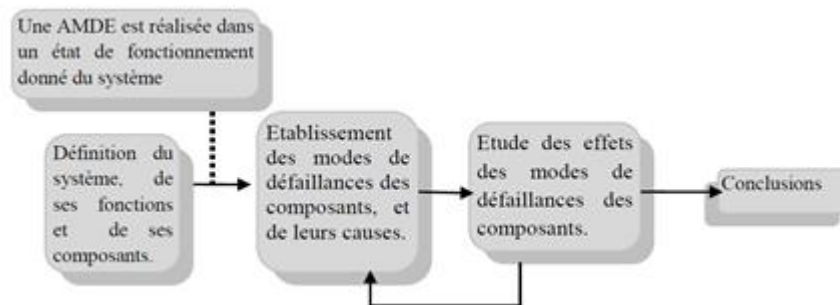


Figure 41. Etapes de l'élaboration de l'AMDE

Pour atteindre l'objectif suscité, l'AMDEC permet de présenter les modes de défaillances de l'atelier sulfurique, l'analyse est effectuée pour une période de 2 mois à l'aide d'un groupe de travail guidé par le chef de service maintenance; c'est à dire on va s'appuyer sur le retour d'expérience pour réaliser cet analyse. Dans ce sens, nous avons calculé la criticité des risques à partir de la fréquence, la gravité et la détectabilité. Ce calcul est réalisé par la formule (17) :

$$\text{Criticité (C)} = \text{Fréquence (F)} \times \text{Gravité (G)} \times \text{détectabilité (N)} \quad (17)$$

A partir de la formule (17), chaque indice est caractérisé par:

- la probabilité d'occurrence du risque: F

- la gravité des conséquences: G
- la détectabilité du risque: N

Pour attribuer une note par indice et pour chaque danger, l'évaluation des indices s'effectue généralement à l'aide d'une échelle de 1 à 4, mais lorsque l'effet implique des problèmes de sécurité des personnes, en dysfonctionnement ou en intervention ou non-conformité du produit envoyé en clientèle on attribue à la gravité la note G= 5.

L'estimation de la criticité s'articule sur le résultat abordé dans le tableau suivant:

TABLEAU 31. EVALUATION DE LA CRITICITE

Niveau de criticité	Les actions possibles en cas de processus de production
$1 \leq C \leq 12$: Criticité négligeable	Aucune modification de conception, maintenance corrective en cas de panne
$12 < C \leq 16$: Criticité moyenne	Amélioration des performances de l'élément, maintenance préventive systématique
$16 < C \leq 20$: Criticité élevée	Révision de la conception du sous ensemble et choix des éléments de surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle
$20 < C \leq 80$: Criticité interdite	Remise en cause complète de la conception du produit ou du processus et remplacement de l'opérateur en cas de perturbation causée par celui-ci

4.5.2. Résultat AMDEC

Durant le calcul de la criticité, on a considéré que les modes de défaillances les plus critiques sont supérieurs à 16 (criticité > 16). Le tableau 32 récapitule le résultat de l'AMDEC :

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

TABLEAU 32. RESULTAT AMDEC

Equipement	Unité maintenable		mode de défaillance	Cause de défaillance	Criticité
Equipement chaudière	Chaudière	Plaque tubulaire	Fissure	Conditions de service détachement de la chamotte, chamotte non adéquate défaut de fabrication	48
			Défaut métallurgique	au moment de la fabrication de la tôle ou en fonctionnement ou mauvaise protection	32
		Tube à fumée	corrosion / érosion	mauvaise protection qualité métallurgique des tubes	48
			Défaut métallurgique	Mauvaise protection	24
	Ballon chaudière	Niveau à glace	Mauvaise étanchéité	*Usure glace *Usure plan de joint *Usure joint *Procédure de révision ou de réparation	80
			Opacité et difficulté de vision	Procédure de révision ou de réparation	80
Turbo- soufflante	turbine	Rotor	Frottement (portés)	*Mauvaise lubrification, *mauvaise filtration, *défaut d'isolation thermique	36
		Vanne à fermeture rapide	Fuites internes *Coincement *grippage *défaut d'étanchéité *détérioration de la tige et celle de l'obturation du siège flexion de la tige	*Usure ou frottement *mauvais traitement de la tige *usure de la garniture d'étanchéité vapeur *coté huile c'est l'usure interne des joints *nombre de déclanchement	24
		Etanchéité	Défaut d'étanchéité	*Usure *Vibration *Carbonisation d'huile *Mauvaise isolation thermique	36
		Paliers	*Température élevée *vibration élevée *bruit Corrosion Carbonisation d'huile	*détachement du régule *usure au niveau de l'arbre *mauvais graissage *Mauvaise qualité d'huile *Mauvaise filtration *Fuite externe d'huile Mauvaise isolation thermique	48

L'application de la technique AMDEC dans cette étape permet d'identifier les unités maintenables critiques ensuite les points d'interventions de notre projet.

5. Phase 5 : Phase de mise en place

Après la phase de préparation, la phase de mise en place repose sur les points suivants :

5.1. La création des dossiers machines

Dans cette étape, et pour mettre en place la MPCND, nous devons préparer un document contenant les informations techniques, tels que :

- ✓ les caractéristiques de la machine : capacités, performances en consommation, puissance installée;
- ✓ la liste des accessoires fournis avec la machine;
- ✓ la nomenclature des pièces détachées comme les références, le stock minimal, etc.;
- ✓ les plans détaillés de tous les circuits, schémas et plans électriques, électroniques, hydrauliques ou pneumatiques;
- ✓ la notice de mise en action (délignage, manutention, nettoyage de réception, scellement fondation et les différents branchements);
- ✓ le rodage, les premiers réglages et les vérifications diverses;
- ✓ la notice de fonctionnement et de mise en route;
- ✓ les règles de conduite;
- ✓ les consignes de sécurité;
- ✓ la notice de maintenance;
- ✓ la notice de lubrification qui contient le type de lubrifiant, les points à graisser, les fréquences conseillées, etc.;
- ✓ les organigrammes de dépannage, les documents d'aide au diagnostic des défaillances les plus probables;
- ✓ la liste d'outillage spécifique.

Ce document est utile d'une part, pour organiser le magasin de pièces de rechange et d'autre part, pour classer les dossiers techniques relatifs à chaque composant.

5.2. La définition d'un plan de formation continue

Pour définir un plan de formation, nous avons élaboré l'algorithme suivant (figure 42) qui nous permettra la construction du plan de formation :

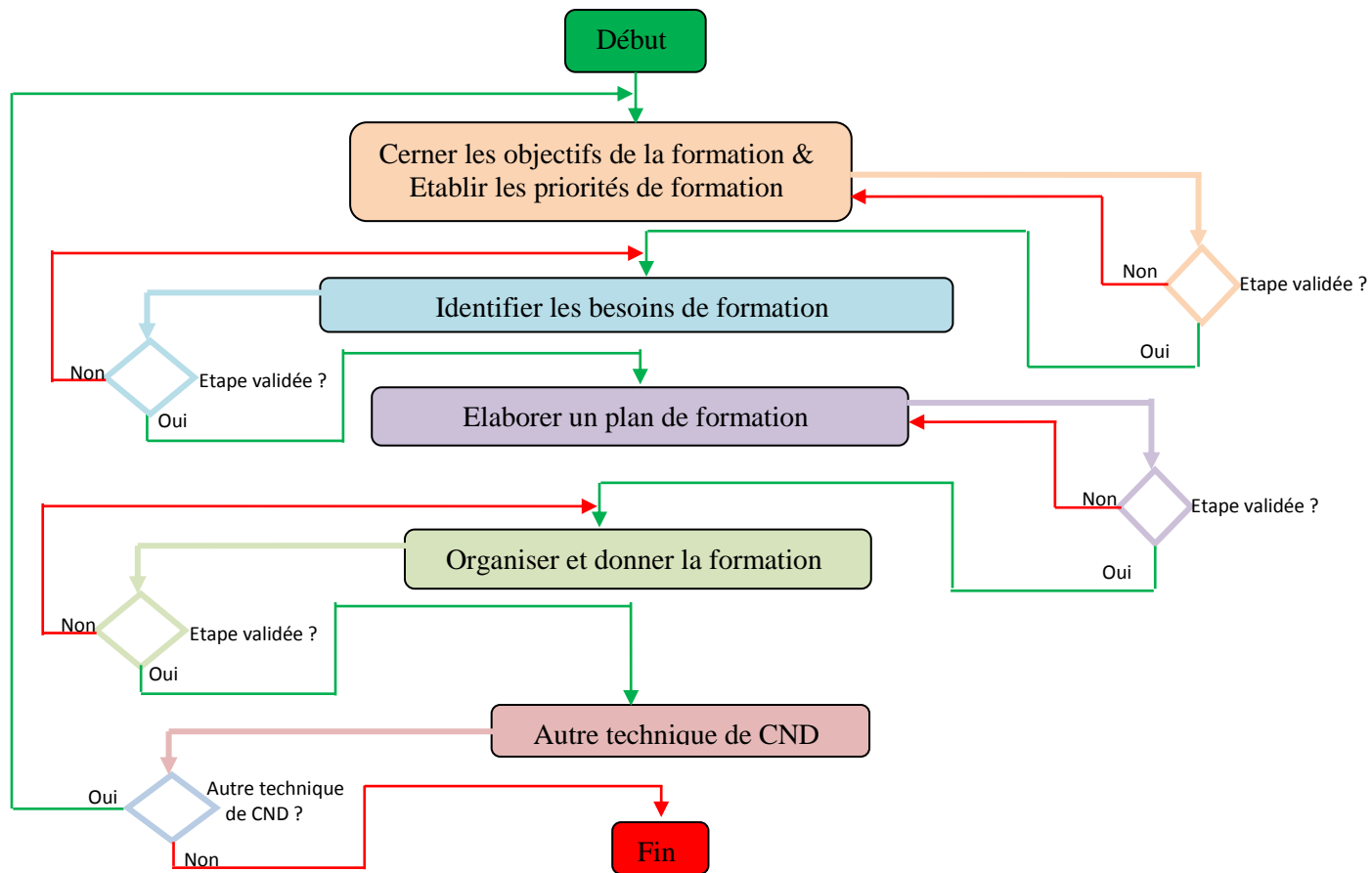


Figure 42. Algorithme constructif du plan de formation

5.2.1. Cerner les objectifs de la formation & Etablir les priorités de formation

Dans cette étape de l'algorithme, il s'agira à répondre à ces trois questions clés :

- Quels sont les changements et les mécanismes d'adaptation de ce programme de la MPCND ?
- Quels sont les résultats visés ?
- Quels sont les acteurs du projet concernés à ce type de formation ?

5.2.2. Identifier les besoins de formation

C'est mesurer, à l'aide des questionnaires, l'écart entre les compétences actuelles et celles qui sont requises, des acteurs concernés par la formation, pour réaliser et mettre en place de notre programme de la MPCND.

5.2.3. Elaborer un plan de formation

Lorsque les priorités et les besoins de formation sont définis, il faut planifier la formation en décrivant, pour chaque technique de CND, les objectifs de formation, les moyens utilisés pour développer la compétence, les groupes d'acteurs qui devront être formés, ainsi que

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

l'échéancier. Le tableau suivant, tableau 33, représente un exemple de planification de la formation d'analyse vibratoire :

TABLEAU 33. PLANIFICATION DE LA FORMATION D'ANALYSE VIBRATOIRE

Technique de CND	Objectif de formation	Moyen de formation	Groupes d'acteurs concernés	Echéancier
Analyse vibratoire	*Connaitre les principes d'analyse vibratoire. *Quels sont les avantages et les limites d'analyse vibratoire.	Séminaire	Tous les acteurs de projet de la MPCND : ➤ Le groupe de pilotage ; ➤ Le groupe de synthèse ; ➤ Le groupe d'analystes/spécialistes ; ➤ Le groupe des interviewés.	Le .../.../... de : ...h ...min à : ...h ...min
	*Comment prendre la mesure.	Coaching, conseil et encadrement	➤ Le groupe d'analystes/spécialistes ; ➤ Le groupe des interviewés.	Le .../.../... de : ...h ...min à : ...h ...min
	*Comment interpréter les résultats.	par un spécialiste	➤ Le groupe des interviewés.	Le .../.../... de : ...h ...min à : ...h ...min

5.2.4. Organiser et donner la formation

Dans cette étape, on passe à l'action pour réaliser le plan de formation. Pour le faire, il faut :

- Spécifier le budget et les ressources disponibles : le salaire du formateur ; Frais assumés par les acteurs pour assister à la formation : repas, transport, etc ; Frais de location d'équipement ou de locaux utilisés pour la formation ; Coût du matériel de formation : livres, matériel didactique, etc.
- Préciser l'échéancier, la durée, le lieu, l'équipement et les outils pédagogiques ;
- S'assurer que les registres des présences à l'activité sont disponibles;
- Produire une attestation de participation à la formation pour chaque acteur;
- Préparer les formulaires de satisfaction à remplir par les acteurs bénéficiés de cette formation.

5.3. La mise en place des indicateurs de performance

Ce sont les indicateurs qui font partie des étapes de la gestion de maintenance d'office phosphorique et étudié dans la première phase de notre démarche (MTTR, MTBF,

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

disponibilité), ces indicateurs nous permettront par la suite de quantifier la réussite du programme et justifier les différents investissements.

5.4. La mise en place des procédures de mise en œuvre

Afin d'assurer un bon suivi des machines par CND, et définir les moments opportuns pour les grandes interventions nous avons élaboré les tableaux de contre-mesure et check List qui sont présentés dans les tableaux 34,35 et 36 pour les composants critiques d'équipement chaudière et les tableaux 37 et 38 pour les composants critiques de turbosoufflante.

TABLEAU 34. TABLEAU DES CONTRE-MESURES D'EQUIPEMENT CHAUDIERE

Equipement	Sous ensemble	Contrôle par CND		
		Actions		Fréquence
Chaudière	Plaque	Epreuve décennale suivant le Dahir 1953	CND par magnétoscopie et Ultrason des cordons de soudure après démolition de la chamotte Epreuve hydraulique	Arrêt froid
			Epreuve hydraulique à la pression nominale	Chaque arrêt froid
			Essai de dureté	Chaque arrêt froid
			Conservation de la chaudière CND (réplique métallographique)	36 mois
	Tube à fumée		Epreuve hydraulique à la pression nominale	Arrêt froid
			CND par magnétoscopie et Ultrason des cordons de soudure Epreuve hydraulique à la pression nominale	Arrêt froid
			Contrôle par courant de Foucault (contrôle d'épaisseur)	Chaque an
Ballon de chaudière	Niveau à glace	Epreuve hydraulique chaque arrêt froid aussi chaque 10ans	Contrôle de non fonctionnement	Chaque jour

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

TABLEAU 35. CHECK-LIST D'INSPECTION ET DES CONTROLES D'EQUIPEMENT CHAUDIERE

<i>Etat d'équipement :</i>		<i>Marche :</i> <input type="checkbox"/>				<i>Arrêt :</i> <input type="checkbox"/>										
<i>Fréquence</i>	<i>Description de la tâche</i>	<i>Date</i>														
		../.../..		../.../..		../.../..		../.../..		../.../..		../.../..		../.../..		
		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		
		Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	
<i>Chaque semaine</i>	Contrôle visuel des niveaux															
<i>Chaque mois</i>	Contrôle des soupapes de sureté															
	Contrôle visuel de la virole															
	Contrôle des vannes HP															
	Graissage des tiges des vannes HP															
	Contrôle des circuits de vapeur															
	Contrôle des drains et des purgeurs															
	Contrôle des pots d'échantillon															
Contrôle de système d'injection de phosphate tri-sodique																
<i>Observation :</i>																
.....																
.....																
.....																

TABLEAU 36. CHECK-LIST DES TRAVAUX DE L'ARRET FROID

Composant	Description de la tâche	Fait	Non-fait	Observation
	Epreuve hydraulique selon le Dahir			Chaque dix ans
	Epreuve hydraulique à la pression normale			
Plaque	CND par magnétoscopie et ultrason des cordons de soudure			
	Conservation de la chaudière réplique métallographique			
	Essai de dureté			
	Remplacement de la chamotte			
Tube à fumé	CND par ressuage des embouts des tubes			
	Contrôle par courant de Foucault			Chaque cinq ans
	Remplacement des férules			
Virole et fond	CND par magnétoscopie et ultrason des cordons de			

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

bombé	soudure			
	CND par ultrason ou par radiographie			
	Essai de dureté			
Soupapes de sécurité	Révision et tarrage des soupapes			
Niveau à glace	Changement de glace, mica, joint			

TABLEAU 37. TABLEAU DES CONTRE-MESURES DE TURBOSOUFFLANTE

Composants/ organes	Contrôle par mesure				
	Actions	P	I	P M	G M
Rotor	CND par analyse vibratoire			×	×
	CND par ressuage			×	×
	CND par "ressuage / magnétoscopie "			×	×
Vanne à fermeture rapide	*contrôle d'étanchéité	×	×	×	×
	*essai de fonctionnement				
Dispositif de fermeture rapide	Contrôle d'étanchéité	×	×	×	×
	Contrôle du déclenchement de fermeture rapide				
Bloc de fermeture rapide	*contrôle avec mesure de pression	×	×	×	×
	*contrôle d'étanchéité				
Paliers	*contrôle par ressuage	×	×	×	×
	*contrôle de jeux	×	×	×	×
Etanchéité huile pour palier avant et palier arrière	Contrôle dimensionnel	×	×	×	×

Avec :

- **P** : représente *petite révision*, cette révision est à la base de chaque 12500 h, elle consiste à faire des contrôles, inspections et changement de pièces pour les éléments externes de la turbosoufflante sans ouverture du corps.
- **I** : *révision intermédiaire*, cette révision est à la base de chaque 25000 h, c'est le programme de la petite révision plus quelques pièces de rechanges.
- **PM** : *révision petite majeur*, cette révision doit être faite chaque 50000 h, en plus des travaux programmés dans la révision intermédiaire, dans cette révision il est question d'ouverture du corps et par suite des contrôles, inspections et changement de pièces.
- **GM** : *révision grande majeur*, cette révision est similaire à la révision «petite majeur » en plus d'un changement de pièces de rechanges coté vapeur.

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

TABLEAU 38. CHECK-LIST D'INSPECTION ET DES CONTROLES DE LA TURBOSOUFFLANTE

<i>Etat d'équipement :</i>		<i>Marche</i> <input type="checkbox"/>				<i>Arrêt :</i> <input type="checkbox"/>									
<i>Fréquence</i>	<i>Description de la tâche</i>	<i>Date</i>													
		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>		<i>../.../..</i>	
		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>		<i>Normal</i>	
		<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
<i>Chaque jour</i>	Contrôle des températures des paliers turbine														
	Contrôle des températures des paliers réducteur														
	Contrôle des températures des paliers de la soufflante														
	CND par analyse vibratoire des paliers turbine														
	CND par analyse vibratoire des paliers réducteurs														
	CND par analyse vibratoire des paliers soufflants														
	Contrôle encrassement filtres d'huile														
	Contrôle encrassement réfrigérant d'huile														
<i>Chaque semaine</i>	CND par thermographie du bouclier près de la zone d'étanchéité du presse-étoupe (in board site / out board site)														
	Espace entre le boîtier de la turbine et le palier pour le blocage de l'air (in board site / out board site)														
	CND par thermographie des pompes d'huile														
	CND par analyse vibratoire des pompes d'huile														
	Vérification de la contenance de l'eau dans l'huile														
<i>Chaque mois</i>	Vérification de la valeur de la couleur de l'huile														
	Contrôle de circuit d'huile														

Les tableaux dressés précédemment nous permettront aussi de :

- ✓ Mettre à jour les fiches d'historiques d'intervention ;
- ✓ Mesurer et suivre les différents indicateurs.

5.5. Analyse des pannes

Dans cette phase, nous faisons une comparaison entre les résultats des mesures à des seuils qui sont définis dans la quatrième phase, phase de préparation, donc tout dépassement d'un des seuils doit être suivi d'un diagnostic approfondi dans le but d'identifier la gravité du défaut et les causes racines de ce dépassement.

6. Phase 6 : Phase d'évaluation et d'amélioration

Finalement, il sera question d'analyser et d'évaluer les résultats et de rédiger un rapport d'analyse cohérence (mise en évidence des points forts et des points faibles de notre démarche de mise en place la MPCND), cette phase consiste à évaluer chaque phase et chaque étape de notre démarche de la MPCND afin de s'assurer la bonne exécution du projet et avoir un système d'évaluation fiable qui permet aux responsables de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue.

→ Pour la première phase « *Collecte de données* » dans la rubrique « *classification des équipements* », nous avons élaboré un nouvel outil de classification [113], on se basant sur une combinaison de ces trois outils [114]: le diagramme de Pareto [115] [116] [117], le problème de Sac à dos [118] [119] [120] [121] [122] et l'algorithme de Glouton [123] [124] [125] [126]:

- ✓ le diagramme de Pareto, c'est un outil d'aide à la décision permettant de définir les priorités d'actions, autrement dit, le diagramme de Pareto fait apparaître les causes les plus importantes qui sont à l'origine du plus grand nombre d'effets;
- ✓ le problème de Sac à dos, noté également KP (en anglais, Knapsack Problem), c'est un problème d'optimisation combinatoire, il modélise une situation analogue au remplissage d'un sac à dos, ne pouvant supporter plus d'un certain poids, avec tout ou partie d'un ensemble donné d'objets ayant chacun un poids et une valeur, les objets mis dans le sac à dos doivent maximiser la valeur totale, sans dépasser le poids maximum ;
- ✓ l'algorithme de Glouton, l'idée de cette dite algorithme est d'ajouter en priorité les objets les plus efficaces, jusqu'à la saturation du sac.

Notre nouvel outil s'articule sur les trois étapes suivantes :

- Calculer le % du cumul de gravité (temps d'arrêt) de chaque machine ;
- Calculer la valeur d'efficacité pour chaque élément selon la formule suivante : ((%de gravité) / (valeur d'intervention)) ;
- Choisir et trier les éléments récoltés par ordre décroissant selon leurs efficacités via la méthode de sac à dos.

→ Pour l'étape « Sélection des équipements à surveiller » sous la phase « Phase de préparation », La technique AMDEC que nous avons utilisé, nous a permet de connaître les composants critiques ainsi que les causes possibles d'un défaut détecté, mais elle ne nous

permet pas d'identifier la cause principale du défaut et de décrire l'état actuel d'un équipement, c'est pour cette raison, il nous a semblé intéressant d'introduire des outils de modélisation du comportement dynamique des équipement pour déceler les causes de la défaillance, prédire leur effet et faire une estimation des défauts globaux liés à des défaillances localisées. Parmi ces outils de modélisation, on peut trouver les réseaux de Pétri RdP [127] et les réseaux de neurones [128]. L'utilisation de ces types des outils de modélisation accélère et améliore la qualité du système de production de chaque produit technique. Dans notre étude de cas, nous allons appliquer la modélisation neuronale. Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière [129]. On constate que le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. En effet, si on se déplace dans ce type de réseau à partir d'un neurone quelconque en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ. Les neurones qui effectuent le dernier calcul de la composition de fonctions sont les neurones de sortie. Ceux qui effectuent des calculs intermédiaires sont les neurones cachés (figure 43). Les réseaux non bouclés à couche sont structurés tel que les neurones qui appartiennent à une même couche ne soient pas connectés entre eux, chacune des couches recevant des signaux de la couche précédente, et transmettant le résultat de ses traitements à la couche suivante. Les deux couches extrêmes correspondent à la couche d'entrée qui reçoit ses entrées du milieu extérieur d'une part, et à la couche de sortie qui fournit le résultat des traitements effectués d'autre part. Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées, leur nombre est variable. Les réseaux de neurones non bouclés à couches dont les neurones cachés ont une fonction d'activation sigmoïde, sont souvent appelés des perceptrons multicouche (ou MLP pour Multi-Layer Perceptron) [130].

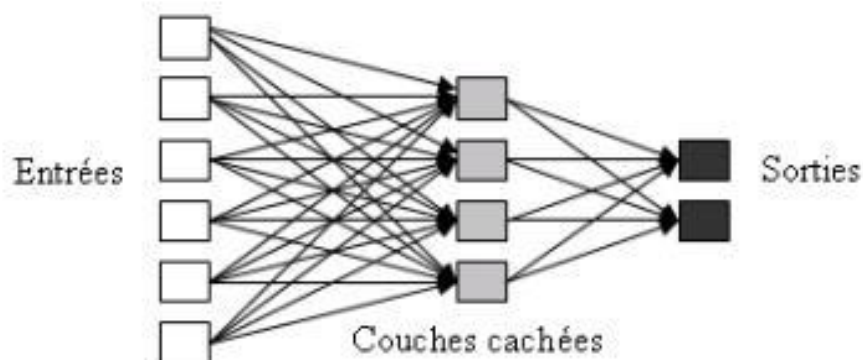


Figure 43. Structure d'un réseau de neurones non bouclé

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

Dans ce cas, la structure du réseau obtenu pour chaque équipement stratégique est comme suite: Pour l'équipement chaudière, il inclut 14 neurones en entrée, 6 neurones cachés et 2 neurones de sortie. Une représentation symbolique de cette structure est donnée par la figure 44, tant que les différents paramètres physiques sont abordés dans le tableau 39 :

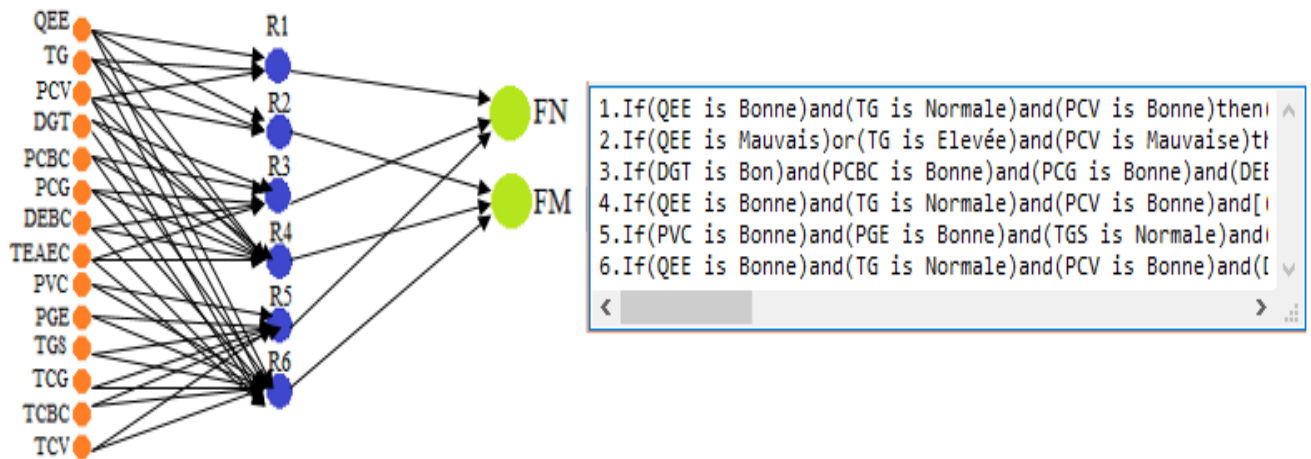


Figure 44. La structure neuronale associée à l'équipement chaudière

TABLEAU 39. LES VARIABLES ASSOCIEES A L'EQUIPEMENT CHAUDIERE

Entrée	Désignation	Sortie	Désignation
DGT	Débit de Gaz Total	FN	Fonctionnement Normal
PVC	Pression Vapeur Chaudière	FM	Fonctionnement Mauvaise
PCBC	Pression Calcul Ballon Chaudière		
PGE	Pression Gaz Entrée		
PCG	Pression Calcul Gaz		
PCV	Pression Calcul Vapeur		
DEBC	Débit d'Evacuation Ballon Chaudière		
QEE	Qualité Eau Entrée		
TG	Température Gaz		
TGS	Température Gaz Sortie		
TCG	Température Calcul Gaz		
TCBC	Température Calcul Ballon Chaudière		
TEAEC	Température Eau Alimentaire entrée chaud		
TCV	Température Calcul Vapeur		

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

La structure du réseau obtenu pour la turbosoufflante inclut 10 neurones en entrée, 6 neurones cachés et 2 neurones de sortie. Une représentation symbolique de cette structure est donnée par la figure 45, tant que les différents paramètres physiques sont abordés dans le tableau 40 :

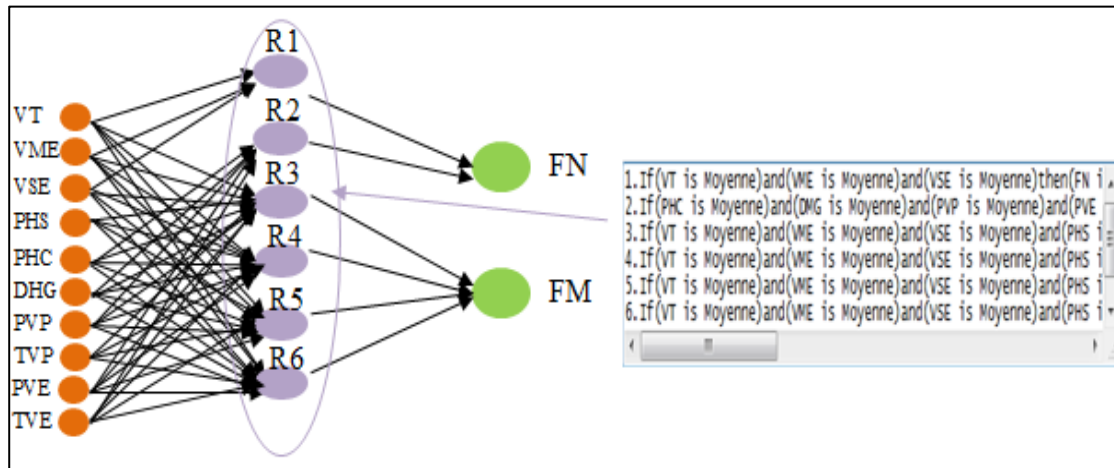


Figure 45. La structure neuronale associée à la turbosoufflante

TABLEAU 40. LES VARIABLES ASSOCIEES A LA TURBOSOUFFLANTE

Entrée	Désignation	Entrée	Désignation	Sortie	Désignation
VT	Vitesse de Turbine	PHG	Pression Huile de Graissage	FN	Fonctionnement Normal
VME	Vitesse Machine Entrainée	PVP	Pression Vapeur Principale	FM	Fonctionnement Mauvaise
VSC	Vitesse en Service Continue	TVP	Température Vapeur Principale		
PHC	Pression Huile de Commande	PVE	Pression Vapeur d'Echappement		
PHS	Pression Huile de Sécurité	TVE	Température Vapeur d'Echappement		

Cette modélisation présente un résumé des indicateurs de performances liés à notre système de production, ces indicateurs contribuent à la prise de décision optimale relative à l'utilisation des techniques de CND. Alors, on peut déterminer l'état de fonctionnement des deux équipements : équipement chaudière et turbosoufflante, et donc, de déterminer le plan de MPCND optimal qui permettra d'améliorer les performances de manière à diminuer le taux de réparation des composants critiques.

→ Pour l'étape « *Sélection des CND à utiliser* » de la phase « **phase de préparation** », on constate pour certain composant, on peut utiliser plusieurs CND, notre contribution pour l'amélioration de cet étape sera d'optimiser l'utilisation des CND et par la suite d'optimiser les coûts relatives à ces CND, pour répondre à cette problématique, une approche multicritère proposée pour classer les techniques de CND par ordre de priorité, Une famille de critères est proposée effectuer le classement. La démarche que nous avons adoptée pour aborder ce problème s'articule autour de ces quatre étapes principales:

1. identifier l'ensemble des CND à classer;
2. établir une liste cohérente de critères de priorité;
3. évaluer les performances de chaque technique de CND selon les différents critères retenus;
4. classer les CND selon leurs scores globaux.

La première étape a été déjà traitée précédemment dans la phase 2 « **définition des grandeurs physiques** », l'ensemble des CND seront notés comme suite : T1 : Analyse vibratoire, T2 : Magnétoscopie, T3 : Radiographie, T4 : Ressuage, T5 : Thermographie, T6 : Ultrasons.

Concernant la famille de critères, Une liste de six critères a été élaborée en collaboration directe avec la direction générale et les acteurs de notre projet, ainsi en se basant sur le questionnaire traité dans le chapitre III « **Etude statistique sur l'utilisation des techniques de mesure en maintenance prédictive sur un échantillon d'entreprises marocaines** ». Ces critères sont : C1 'la fiabilité' : nous nous interrogeons sur la fiabilité de la technique de CND étudiée, est-ce qu'elle a une fiabilité très importante ? Importante ? Ou bien, peu importante ? ; C2 'Le coût' : la technique de CND étudiée est très chère ? Moyennement chère ? Moins chère ? ; C3 'L'influence sur la sécurité des personnes' : l'utilisation de la technique de CND en question a un risque mortel ? Risque de dommage élevé ? Ou bien, aucun risque ? ; C4 'La rapidité d'exécution' : elle exprime le temps de préparation pour mettre en œuvre de la technique de CND étudiée, est-ce que les durées de préparation sont en moyen longues ? Moyennes ? Ou bien, courtes ? ; C5 'L'exigence de l'interprétation des personnes' : la technique de CND étudiée exige une interprétation moyennement très souvent ? Souvent ? Ou bien, Rarement ? ; Et finalement, C6 'la facilité de mise en œuvre' : nous nous interrogeons si l'utilisation de la technique de CND en question est facile ou non. En examinant le critère C3, influence sur la sécurité, on constate que la première alternative «risque mortel » constitue une condition d'élimination. En effet, une technique du CND dont

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

son utilisation engendre un risque mortel, doit être éliminée et ce même si ses performances sont les plus médiocres possibles sur les cinq critères restants. De ce fait, la comparaison entre cette technique et le reste des autres techniques n'a plus aucune signification, autrement dit la technique de CND en question n'est pas admissible à de telles comparaisons.

Pour pouvoir évaluer et classer les différentes techniques de CND sur la base des critères retenus, il faut associer à chaque critère un barème de notation de façon à en faire une dimension mesurable. Les échelles retenues sont regroupées dans le tableau 41. Il est à noter que dans le cas de la présente étude, tous les critères sont à maximiser. L'attribution des poids (ou coefficients) aux critères a été effectuée selon la méthode « Ranking & Rating » [131]. Dans un premier temps, nous avons demandé aux acteurs du projet de la MPCND de classer les six critères par ordre d'importance décroissant. La deuxième étape consistait à répartir un ensemble de 100 points entre les différents critères en respectant le classement précédent. Les valeurs des poids qui en découlent sont données dans le tableau suivant :

TABLEAU 41. POIDS DES CRITERES ET ECHELLE DES MESURES

Critère	Poids	Evaluation
C1 : La fiabilité	30%	Peu important.....1/3 Important.....2/3 Très important.....3/3
C2 : Le coût	15%	Cher.....1/3 Moyennement cher.....2/3 Moins cher.....3/3
C3 :L'influence sur la sécurité des personnes	8%	Risque mortel.....1/3 Risque de dommage élevé.....2/3 Aucun risque.....3/3
C4 : La rapidité d'exécution	15%	Longue.....1/3 Moyenne.....2/3 Courte.....3/3
C5 :L'exigence de l'interprétation des personnes	17%	Très souvent.....1/3 Souvent.....2/3 Rarement.....3/3
C6 :La facilité de mise en œuvre	15%	Non.....1/2 Oui.....2/2

Chapitre IV. Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les CND

Quant à évaluation des performances pour les techniques de CND, des scores ont été attribués par rapport à chacun des six critères, sur la base des échelles de mesure telles qu'elles sont présentées dans le tableau 42, Les résultats de ces notations sont regroupés dans le tableau suivant :

TABLEAU 42. PERFORMANCES DES CND

Technique	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Critère						
C1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3
C2	0.15	0.15	0.1	0.15	0.15	0.05
C3	0.07	0.047	0.047	0.047	0.07	0.047
C4	0.15	0.1	0.05	0.1	0.15	0.15
C5	0.12	0.12	0.12	0.18	0.18	0.06
C6	0.15	0.075	0.075	0.15	0.15	0.075

Et finalement pour la classification des CND selon leurs scores sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU 43. CLASSEMENT DES CND

Technique	Désignation	Scores	Rang
T1	Analyse vibratoire	0.94	1
T5	Thermographie	0.92	2
T4	Ressuage	0.827	3
T2	Magnétoscopie	0.692	4
T6	Ultrasons	0.682	5
T3	Radiographie	0.492	6

D'après le tableau précédent on constate que si, par exemple, on doit faire un choix entre plusieurs techniques de CND, on choisit d'abord T1 'Analyse vibratoire', puis T5 'Thermographie', puis T4 'Ressuage', puis T2 'Magnétoscopie', puis T6 'Ultrasons', et finalement T3 'Radiographie'.

➔ Pour l'étape « *La création des dossiers machine* » de la phase « **phase de mise en place** », notre contribution pour l'amélioration de cette étape sera de compléter les dossiers techniques, historiques et économiques ainsi que le dossier des fournisseurs.

→ Quant au « *plan de formation* » de la phase « **Phase de mise en place** », nous avons formé les représentants de chaque groupe d'acteur de notre projet de la MPCND, ces représentants forment le comité d'évaluation qui émet un avis sur l'exécution du plan de formation en cours et sur le projet de plan ou de mise en œuvre du plan de formation à venir. Et nous avons ouvert le champ en demandant aux acteurs les pistes d'amélioration qu'ils percevaient au regard de leur expérience à travers les questionnaires de satisfaction.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons élaboré une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs MPCND, notre méthodologie recommandée s'articule sur six étapes complémentaires, à savoir : la collecte de données, la définition des grandeurs physiques, l'étude de faisabilité, la phase de préparation, la phase de mise en place et la phase d'évaluation et d'amélioration. Une description précise de chaque phase de notre méthodologie a été fournie dans ce chapitre. Le déploiement de chaque étape et chaque phase de notre démarche proposée a prouvé sa robustesse dans la partie étude de cas au sein de l'un des ateliers d'un office phosphorique.

CHAPITRE V. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Notre travail a, tout d'abord, permis d'approfondir la connaissance théorique de la maintenance industrielle, son évolution, sa mise en œuvre et ses différents types ; et aussi de projeter un aperçu global des techniques de contrôle non destructifs CND les plus répandues industriellement : l'analyse vibratoire, la thermographie, la radiographie, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons, en présentant leurs intérêts, leurs défauts et une synthèse comparative en fine. Ces techniques de CND sont devenues incontournables pour augmenter la fiabilité, la sûreté et la durée de vie des installations. Elles permettent de caractériser l'état d'intégrité des équipements, sans détruire et sans perturber les lignes de production.

Par la suite, nous avons étudié statiquement l'utilisation de la maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs par un échantillon des entreprises marocaines à travers un questionnaire. L'ensemble des résultats de notre questionnaire nous a permis de positionner les différents avantages et inconvénients de chaque technique de CND (analyse vibratoire ; thermographie; radiographie; ressuage; magnétoscopie et ultrasons) en tenant compte des caractéristiques de la production (continue, discontinue, par projet) et du secteur d'activité (agroalimentaire, automobile, textile, service,...), et de faire une comparaison entre ces CND selon les critères de rapidité, de coût, de reproductibilité, de fiabilité, de sensibilité et de résolution.

La synthèse des résultats de notre questionnaire nous a conduit à proposer une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les techniques de contrôles non destructifs (MPCND). Cette méthodologie, repose sur six phases complémentaires contribuant au développement de gestion de la maintenance préventive adaptée aux entreprises : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration. Nous préconisons l'utilisation de cette méthodologie en complément des principes et des outils d'amélioration et planification d'une politique de maintenance préventive. Dans le but d'exploiter et de valider notre démarche proposée, une étude de cas a été faite au sein de l'un des ateliers d'un office phosphorique. Cette étude de cas a mis en évidence l'importance de l'utilisation des techniques, bien que l'analyse vibratoire est la plus largement utilisée vu que la majorité des équipements sont constitués par des systèmes

Chapitre V. Conclusion générale et perspectives de recherche

mécaniques, mais l'utilisation d'autres techniques de CND parfois complète cette dernière, d'où la nécessité d'une démarche permettant le choix de la technique la plus adéquate en s'appuyant sur les indicateurs et des grandeurs physiques par une analyse approfondie et des conditions de fonctionnement du processus étudié .

Comme montré dans le cadre de ce travail de thèse, l'introduction des différentes étapes de notre méthodologie de la MPCND peuvent aider à identifier le passage d'une démarche locale de la politique de maintenance pour la résolution de problèmes de défaillances à un niveau hiérarchique supérieur plus structuré. La suite logique de ce travail consisterait à étendre cette initiative de recherche à l'ensemble des outils de la maintenance pour identifier de manière systématique le niveau adapté d'utilisation de techniques de CND, ainsi que les compétences requises et les niveaux hiérarchiques des collaborateurs qui devraient participer à cette démarche.

Au-delà du déploiement de notre méthodologie de la MPCND, les futurs travaux pourront se focaliser sur les thématiques suivantes : évaluation de l'impact de méthodologie de la MPCND sur la performance de la maintenance industrielle au sein d'une entreprise et toute la performance industrielle, amélioration de la performance industrielle par l'utilisation de la MPCND et pérennisation de la démarche MPCND.

Références

- [1] Gilles Zwingelstein, la maintenance basée sur la fiabilité : Guide pratique d'application de la RCM, Edition HERMES, 1996.
- [2] AFNOR, Maintenance industrielle - Fonction maintenance, FD X60-000, Mai, 2002.
- [3] Richet D. & Gabriel M., Maintenance basée sur la fiabilité. Edition Masson, 1996.
- [4] Retour D., Bouche M. & Plauchu V., Où va la maintenance industrielle, Problèmes Économiques, VOL. 2 (159), pp. 7-13, 1990.
- [5] AFNOR, Norme NF EN 13306 X 60-319.
- [6] Chandler A.D.Jr., Strategie et structures de l'entreprise, Editions d'organisation, Paris, 1989.
- [7] J.C. Tarondeau and P. Lorino, De la strategie aux processus strategiques, Revue Française de la gestion, n°117, pp. 5-17, 1998.
- [8] R.A. Thietart and A.C. Martinet, Strategies : actualite et futurs de la recherche, Edition Vuibert / FNEGE, Paris, 2001.
- [9] J. Moubray, Reliability Centered Maintenance, New York, Industrial Press, 2nd edition, 1997.
- [10] R. Boulat and F. Berger, Les entreprises de biens de consommation sous l'occupation, VIIeme colloque international du Groupement de Recherche (GDR) 2539: Les entreprises francaises sous l'Occupation, CNRS, Université François-Rabelais, Tours, 2007.
- [11] R. Barlow, L. Hunter, Optimal preventive maintenance policies, Operations Research, VOL. 8, pp.90-100, 1960.
- [12] C. Valdez-Flores, R. Feldman, A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems, International Journal of Naval Research Logistics VOL. 36 (4), pp.419-446, 1989.
- [13] La norme AFNOR X 60010, décembre 1994.
- [14] Boulenger A., Vers les zéro pannes avec la maintenance conditionnelle, Guides de l'utilisateur, AFNOR, Paris, 1988.
- [15] D. Boitel, C. Hazard, Guide de la maintenance, Edition Nathan, 1990.
- [16] Camacho, E. F., Alba, C. B. (2013). 'Model predictive control'. 2nd Edition. Springer Science & Business Media.

Références

- [17] Nguyen, K. A., (2015), 'Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe', PhD thesis, University of technology of Troyes, Troyes, France.
- [18] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi, Brahim Herrou, Etude comparative des techniques de mesure en maintenance prédictive, Conférence Internationale Sur La Conception & Production Intégrées CPI'13, Tlemcen Algérie, 21-23 Octobre 2013.
- [19] Jean-Claude Francastel, Ingénierie de la maintenance: De la conception à l'exploitation d'un bien, Edition DUNOD, 2ème, 2009.
- [20] Jean Héng, Pratique de la maintenance préventive : Mécanique, Pneumatique, Hydraulique, Electricité, Froid, 3ème Edition DUNOD, 2011.
- [21] Henri Walaszek, Les nouvelles techniques de contrôle non destructif: un atout pour votre entreprise, centre technique des industries mécaniques, CEA Cadarache, Pôle EPI Expert référent CND, 2013.
- [22] W.G. Yi, M.R. Lee, J.H. Lee et S.H. Lee: A study on the ultrasonic thickness measurement of wall thinned pipe in nuclear plants. In APCNDT 2006, novembre 2006.
- [23] Le Blanc, J.-L. Le Chien, M. Talvard, G. Delsarte et M. Piriou, Subsurface cracks detection in Inconel using pulsed eddy currents technique. In 14th International Conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, pages 347–349. ASM International, janvier 1996.
- [24] Hamel, M., (2012), 'Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques', PhD thesis, Mouloud Mammeri University Tizi-Ouzou, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Algeria.
- [25] Jiayin, W., Baodong, B., Hongliang, L., & Chuang, M. (2013, October). 'Research on vibration and noise of transformer under DC bias based on magnetostriction'. In Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on (pp. 2225-2228). IEEE.
- [26] Boulenger A., Pachaud C., (2003), 'Analyse vibratoire en maintenance,' 2nd Edition, DUNOD, 2003.
- [27] Amal Boukili, Mohammed El HAMMOUMI, Preventive maintenance by vibratory analysis: case study, International Journal of Engineering Research ISSN: 2319-6890 (online), 2347-5013(print), Volume No.4, Issue No.8, pp : 450-455 01 August 2015.
- [28] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi, Dounia Moumen, Bachir El Kihel, Analyse et diagnostic de différents défauts par analyse vibratoire sur un banc d'essai,

Références

- Conférence Internationale des Matériaux Innovants & Leurs Applications JMAT-2016, ENSA Oujda-Maroc, 21-22 avril 2016.
- [29] AFNOR NF E 90-001.
- [30] Boulenger, C. Pachaud, Surveillance des machines par analyse des vibrations, DUNOD, 1998.
- [31] J. Héng, Pratique de la maintenance prédictive, DUNOD, 2002.
- [32] R. Chevalier, Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF, RFM, 2001.
- [33] D. Augeix, Analyse vibratoire des machines tournantes, Techniques de l'ingénieur, BM5 -145, 2001.
- [34] Bichler, B. Serio, S. Fischer, Design and performance of a mechanical strain optical sensor using a multimode fiber locally stressed by a periodical micrometric perturbation, Proc. SPIE, Vol. 7726, 2010.
- [35] M. Harris, Shock and vibration handbook, 6th Ed.2009.
- [36] O. Cousinard, Contribution à l'étude et au développement d'un système intégré de suivi de l'endommagement des composants mécaniques sur les machines tournantes : Application au développement et au choix des outils d'analyse et de mesure vibratoire, Thèse de doctorat de l'Université de Reims 2002.
- [37] Boulenger, C. Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, DUNOD, 1998.
- [38] DYNAE, L'analyse vibratoire pour la maintenance, Les indicateurs d'une surveillance fiable.
- [39] Pachaud, Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces, Mechanical Systems and Signal Processing 11(6), 903-916, 1997.
- [40] R. J. Alfredson and J. Mathew, Time domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings, Mech. Eng. Trans.--Inst. Eng. Aust. no 2, pp 108-112, 1985.
- [41] R. J. Alfredson and J. Mathew, Frequency domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings, Mech. Eng. Trans.--Inst. Eng. Aust. no 2, pp 102-107, 1985.
- [42] Carreau, Les roulements, des composants à surveiller de près, CETIM, guide d'achat Mesures N°754, avril 2003.
- [43] N. Tandon, A. Choudury, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, International Journal of Tribology, 32 pp 469-480, 1999.
-

Références

- [44] J. Michael Robichaud, Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis, Bretech Engineering Ltd., 70 Crown Street, Saint John, NB Canada, 2004
- [45] J. S. Mitchell. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance - Seventy Years of Continuous Progress-. SOUND AND VIBRATION/JANUARY 2007.
- [46] Norme ISO 10816
- [47] Norme ISO 2372
- [48] Norm E90-300
- [49] Márquez, F. P. G., Tobias, A. M., Pérez, J. M. P., Papaelias, M., (2012). ‘Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods’. Renewable Energy, vol. 46, pp: 169-178.
- [50] Philippe, (2004), ‘Numerical and experimental methodological approach to aid in the detection and monitoring of vibration of chipping defects of ball bearings’, University of Reims Champagne-Ardenne Faculty of Natural Sciences (Thesis ESTOCQ), 16 December 2004.
- [51] Augeix, Bruit et vibrations, Techniques de l’ingénieur, BM5– 145, 2007.
- [52] M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. Zouzou, M. Benbouzid, Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motor - Simulation and analytical study of its spectral signature on stator currents, ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, p. 1503-1513, 2008.
- [53] R. M. Stewart, The specification and development of a standard for gearbox monitoring, 2nd International conference of vibration in rotating machines, p. 353-358, Cambridge 1980.
- [54] M. Sidahmed, C. Garnier, Détection des défauts dans les engrenages, CETIM informations, n°124, p. 71-74, 1991.
- [55] R. Bigret, J. L. Feron, Diagnostic-maintenance disponibilité des machines tournantes, modèles – mesurages – analyses vibratoires MASSON, 1995.
- [56] C. Bard, Modélisation du comportement dynamique des transmissions par engrenages, Thèse de Doctorat N° 95 ISAL 0031, 295p, INSA de Lyon, 1995.
- [57] Rigaud, Interactions dynamiques entre dentures, lignes d’arbres, roulements et carter dans les transmissions par engrenages, Thèse de Doctorat. Ecole centrale de Lyon, 1998

Références

- [58] Benbouaza, B. Elkihel & F. Delaunois, Analysis and diagnosis of the different defects of asynchronous machines by vibration analysis, *International Journal on Computer Science and Engineering*, 5, issue 4, pp 258-269, 2013.
- [59] J. R. Stack, R. Harley, T. G. Habetler, An amplitude Modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 15, n°5, Oct, 2004.
- [60] J. R. Stack, T. G. Habetler, R. Harley, Experimentally generating faults in rolling element bearings via shaft current, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n°1, p. 25-29, Jan./Feb, 2005.
- [61] Y. Benllali, A. E. Hadjadj, D. Khalfa, Contribution a l'amélioration de la maintenance conditionnelle des roulements par analyse vibratoire, *Séminaire sur les techniques et le management de la maintenance STMM*, 2007
- [62] H. Bonnett, G. C. Soukup, Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, n°4, p. 921-937, July/August, 1992.
- [63] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. Capolino, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, G. Didier, H. Razik, E. Foulon, L. Loron, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, J. Faucher, G. Rostaing, J. Rognon, Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone a cage en présence de défauts, *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 8, n°2, p. 287-330, 2005.
- [64] S. Bazine, Conception et implémentation d'un Meta-modèle de machines asynchrones en défaut, Thèse de doctorat, L'Université de Poitiers en France et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis en Tunisie, Juin 2009.
- [65] Monchy, F., Vernier, J. P. (2012). *Maintenance-3e éd.: 'Méthodes et organisations pour une meilleure productivité.'* Dunod.
- [66] Amal Boukili, Mohammed El HAMMOUMI, Said HAOUACHE, Analysis and diagnosis of an industrial machine by infrared thermography, *International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST) ISSN: 2319:2682*, Vol.45, No.45, Pp 106-118 January 2016.
- [67] Amal Boukili, Mohammed El HAMMOUMI, Thermographie outil de surveillance et de diagnostic en maintenance prédictive, *Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels (CIMSI'2014) ENSA, Marrakech, Maroc, 25-26 Décembre, 2014.*

Références

- [68] Vollmer M., Mollmann K.P.,(2010), ‘Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications’, WILEY-VCH, Germany, 2010.
- [69] Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). ‘Infrared thermography for condition monitoring—a review’. *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp: 35-55, 2013.
- [70] X. Maldague,. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, J. Wiley & Sons, Canada, 2001.
- [71] P. A. Fokaides, S. A. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Appl Energy* 88 (2011) 4358–65, 2011.
- [72] Moropoulou, N. P. Avdelidis, Emissivity measurements on historic building materials using dual-wavelength infrared thermography, In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. 1st ed. Orlando (FL, USA): SPIE, p. 224–8, 2001.
- [73] Cyril RAVAT, Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif, Thèse de l’Université PARIS-SUD, 2008.
- [74] Kalinichenko, N.P., Kalinichenko, A.N., Lobanova, I.S., Borisov, S.S., (2013), ‘Methods for the manufacture of nonmetallic reference specimens for liquid penetrant inspection’, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 49 (11) (2013), pp. 668–672.
- [75] Boukili, A., El Hammoumi, M., Elkihel, B., Haouache, S., (2016), ‘Ressuage outil de surveillance et de diagnostic en maintenance prédictive’, Workshop sur Les Systèmes de Production Industriels: Pilotage, Automatisation et Maintenance Industrielle, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, 12 mai 2016.
- [76] M. Mbarek, “Controle non destructif par ressuage,” Institut supérieur des études technologiques de Mahdia, Note personnelle.
- [77] I. Al-Naemi, J. P. Hall, and A. J. Moses. Fem modelling techniques of magnetic flux leakage-type ndt for ferromagnetic plate inspections. *Jornal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304 (2) : 790-793, 2006.
- [78] Institut de Soudure Industrie (IS), “Principales limites des techniques d’examen non destructif note a l’attention des donneurs d’ordres,” RDT -ISI-1035 1/3, Rév.3, Mai 2013. (<http://www.isgroupe.com>)
- [79] Li, J.W., Xu, M.Q., Leng, J.C., Xu, M.X., (2012), ‘Modeling plastic deformation effect on magnetization in ferromagnetic materials’, *J Appl Phys*, 111 (2012):063909-1-4.
-

Références

- [80] Blitz, J., (2012), 'Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing', 2nd Edition, Vol. 3, Non-Destructive Evaluation Series, Springer Science & Business Media, P: 261.
- [81] S. J. Lee, W. S. Park, J. H. Lee, and J. H. Byun, A study on non-contact ultrasonic technique for on-line inspection of CFRP, In 12th A- PCNDT 2006- Asia Pacific Conference on NDT, Auckland, New Zealand, 2006.
- [82] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., (2013), 'Ultrasonic testing of materials', 4th Edition, Springer Science & Business Media.
- [83] R. Keith Mobley, La maintenance prédictive, Edition Masson, 1992.
- [84] Marais, J. J., (2014, May), 'Defect assessment by means of non-destructive testing', In Engineering Applications of Fracture Analysis: Proceedings of the First National Conference on Fracture Held in Johannesburg, South Africa, 7-9 November 1979 (p. 203). Elsevier.
- [85] Wassink, C. H. P., (2012), 'Innovation in Non-Destructive Testing', thesis in Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [86] Halmshaw, R., (2012), 'Industrial radiology: theory and practice', Vol. 1, Springer Science & Business Media, p 203.
- [87] Rebai, M., Kacem, I., Adjallah, K. H. (2013). 'Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines'. Operational Research - An International Journal (ORIJ), vol.13, no.3, pp.363-383.
- [88] Jardine, A. K., Tsang, A. H. (2013). 'Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications'. 2nd Edition. CRC press.
- [89] Deryk Anderson, Reducing the cost of preventive maintenance, Business Analyst – Maintenance, Oniqua Enterprise Analytics, 2013. Disponible sur : <http://www.plantmaintenance.com/articles/PMCostReduction.pdf>
- [90] Amal Boukili, Mohammed El Hammoui, Said Haouache, "Statistical Study on the use of the measurement techniques in predictive maintenance taking Moroccan companies as an example", International Journal of Industrial and Systems Engineering (IJISE), ISSN online: 1748-5045.
- [91] Amal Boukili, Mariam Elhiri, Mohammed El Hammoui, Abdelali En-nadi, "Etudes empiriques sur les risques liés aux infrastructures et les techniques de mesures déployées - Cas du MAROC", 3ème édition du Congrès International du Génie Industriel et Management des systèmes CIGIMS 2017, 17 au 18 mai 2017, ENSAM, Meknès, Maroc.
-

Références

- [92] M. Bengtsson, Condition based maintenance systems –an investigation of technical constituents and organizational aspects. These, Mälardalen University, Suède, 2004.
- [93] M. Bengtsson, On condition based maintenance and its implementation in industrial setting, These, Mälardalen university, Suède, 2007.
- [94] C. Moya, How To Set Up a Predictive Maintenance Program, Quality Progress, 36(3), pp. 56-62, 2003.
- [95] B.F. Mitchell, R.J. Murry, Predictive Maintenance Program Evolution – Lessons Learned, “1995 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium”, Washington D.C., pp. 7-10, 1995.
- [96] R. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance”. Butterworth-Heinemann/Elsevier Science, USA. ISBN 0-7506-7531-4, 2002
- [97] G. Trodd, Practical Implementation of Predictive Maintenance, “Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1998”, USA, Portland, ME, 1998, pp. 29-37.
- [98] J. Courrech, R. L. Eshleman, Condition monitoring of machinery, Fifth, New York, 2002.
- [99] A. Boulenger and C. Pachaud, Analyse vibratoire en maintenance - Surveillance et diagnostic des machines, Dunod, Paris, 2007.
- [100] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi, Said Haouache, “ Proposition d'une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les contrôles non destructifs,” Colloque International sur les Monitorings des Systèmes Industriels, 19-20 octobre 2016, Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès, Maroc.
- [101] Gilles Corriveau, Valérie Larose, William Menvielle, Théophile Serge Nomo, Jocelyne Gélinas, Pierre Cadieux, Guide pratique pour étudier la faisabilité de projets, 504 pages, D3302, ISBN 978-2-7605-3302-8, 2012.
- [102] Lyonnet.P, “ Optimisation d’une politique de maintenance,” Edite par TEC ET DOC, 1999.
- [103] Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l’aéronautique. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2007.
- [104] Despujols. A, “ Optimisation de la maintenance par la fiabilité,” Techniques de l’ingénieur, dossier MT9310, 2004.
- [105] Zille.V, Berenguer.C, Grall.A, Despujols.A&Lonchamp. J, “Modelling and performance assessment of complex maintenance programs for multi-component systems,” In ESREDA 32nd Seminar proceedings, Alghero, Mai 2007.

Références

- [106] S. Nakajima, Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge, Productivity Press, 1988.
- [107] H. Kaffel, La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2001
- [108] F. Monchy, Maintenance - Méthodes et organisation, Dunod, Paris, 2000
- [109] M. Oliveira, I. Lopes and D. Figueiredo, Maintenance Management Practices of Companies of the Industrial Pole of Manau, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II WCECS 2014, 22-24, San Francisco, USA, 2014.
- [110] C. Cholasuke, R. Bhardwa, and J. Antony, The status of maintenance management in UK manufacturing organizations: results from a pilot survey, Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 5–15, 2004.
- [111] Michel R., AMDEC-Moyen, Techniques de l'Ingénieur Doc, AG4 220.
- [112] Villemeur A., “ Sécurité de fonctionnement de systèmes industriels: fiabilité - facteurs humains – informatisation “, Collection des études et recherches d'électricité de France n°67, Ed Eyrolles, 1988.
- [113] Mohamed Fri, Amal Boukili, Fouad Belmajdoub, Mohammed El Hammoumi, “Developing a new method “ PKPGA” by using a combination of the ABC method Knapsack Problem and Greedy algorithm as a tool for decision support” , International Journal of Advanced Engineering, Management and Science, ISSN : 2454-1311, Issu 7 of volume 2, July 2016.
- [114] Amal Boukili, Mohamed Fri, Mohammed El Hammoumi, Fouad Belmajdoub, “Comparative study of Pareto, Knapsack and Greedy Algorithm in the field of industrial Maintenance”, International Journal of Scientific and Engineering Research IJSER. Issu 4 Volume 7. ISSN 2229-5518, April 2016.
- [115] C. Brooks,” What Is a Pareto Analysis? ”, Business News Daily Senior, March 29, 2014.
- [116] R. Cirillo, “The Economics of Vilfredo Pareto”, Routledge, 12 nov. 2012 - 148 pages.
- [117] M. Doostparast, Narayanaswamy Balakrishnan, “Pareto analysis based on records”, A Journal of Theoretical and Applied Statistics, Volume 47, Issue 5, 2013, pages 1075-1089.
- [118] H. Kellerer, U. Pferschy, D. Pisinger, “Knapsack problems,” Springer, 2004.
- [119] M. Hifi, H. Mhallah, S. Sadfi, “Adaptive algorithms for the Knapsack problem,” European Journal of Industrial Engineering, 2 (2), 2008, pp. 134-152.
-

Références

- [120] X. Song, R. Lewis, J. Thompson, and Y. Wu, “An incomplete m-exchange algorithm for solving the large-scale multi-scenario knapsack problem,” *Computers & Operations Research*, vol. 39, no. 9, pp. 1988–2000, 2012.
- [121] P. Sharafi, L. H. The, M. N. S. Hadi, “Conceptual design optimization of recti-linear building frames: A knapsack problem approach”, *Engineering Optimisation*, Taylor& Francis, DOI: 10.1080/0305215X.2014.963068, 2014.
- [122] F. Furini, M. Iori, S. Martello, M. Yagiura, “Heuristic and exact algorithms for the interval min-max regret knapsack problem”, *INFORMS Journal on Computing*, 2015. INFORMS. DOI:10.1287/ijoc.2014.0632
- [123] B. Diop, D. Diongue, O. Thiaré, “Greedy Algorithms for Target Coverage Lifetime Management Problem in Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Control and Automation* Vol. 8, No. 2, pp. 232-250, 2015.
- [124] Z. Zou, Z. Li, S. Shen, R. Wang, “Energy-Efficient Data Recovery via Greedy Algorithm for Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Article ID 856764, 2015.
- [125] L. Turner, M. Ehrgott, H. W. Hamacher; “On the generality of the greedy algorithm for solving matroid base problems”, *Discrete Applied Mathematics*, 2014.
- [126] F. Glover, “Advanced greedy algorithms and surrogate constraint methods for linear and quadratic knapsack and covering problems”, *European Journal of Operational Research*, Volume 230, Issue 2, 16 October 2013, Pages 212-225.
- [127] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi, Said Haouache, « Petri Networks: Application to Discrete Systems of Dynamics Event», 5th International Congress of the SM2A, March 16 - 18, 2017, Meknes, Morocco.
- [128] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi, « Elaboration d’un plan de maintenance optimal basé sur la modélisation neuronale », 2ème édition du Congrès International du Génie Industriel et Management des systèmes CIGIMS 2015, 21 au 23 mai 2015, Ecole Supérieure de Technologie, Fès, Maroc.
- [129] Dreyfus G., Martinez J-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria SS., Hérault L, *Réseaux de neurones : Méthodologie et Applications*, Eyrolles, 2002.
- [130] Aggarwal, A., & Thakur, G. S. M. (2013). Techniques of performance appraisal-a review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(3), 617-621.
- [131] Bishop C., “*Neural Networks for Pattern Recognition*”, Oxford University Press, 1995.
-



Résumé de la thèse

La maintenance est devenue une véritable source de productivité pour les entreprises. La majorité des composants des machines industrielles doit satisfaire à des exigences de la qualité élevées et sans cesse croissantes ; le maintien des machines en bon état lors de la production est donc devenu un point fondamental pour le succès d'un produit ou d'une entreprise. Grâce aux techniques de mesure de maintenance prédictive, il est possible de satisfaire ces exigences complexes avec succès et de réduire les coûts de la maintenance.

Nombreuses sont les techniques qui doivent être utilisées dans un programme de maintenance. Vu que les systèmes mécaniques et les machines constituent la majorité des équipements industriels, le contrôle des vibrations constitue généralement l'élément-clé des programmes de maintenance prédictive. Néanmoins, cette technique ne peut fournir toute l'information requise. En effet, elle permet seulement de contrôler les conditions mécaniques et ne mesure pas les autres paramètres nécessaires au maintien de la fiabilité et du rendement. Pour cette raison, une démarche de maintenance prédictive complète doit faire appel à d'autres techniques de Contrôle Non Destructif (CND) telles que : la thermographie, la radiographie, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons.

Le présent travail consiste à fournir une description précise et une étude comparative de ces techniques de CND ; à dresser un état des lieux des entreprises marocaines en matière d'utilisation de ces techniques de CND en maintenance prédictive, à recenser les principaux avantages et les inconvénients de chaque technique de CND en tenant compte du secteur d'activité (agroalimentaire, automobile, textile, service,...) selon les critères de rapidité, coût, reproductibilité, fiabilité, sensibilité et résolution de chaque technique de mesure ; et par la suite à proposer une méthodologie de mise en place d'une maintenance prédictive basée sur les Contrôles Non Destructifs (MPCND), qui s'articule en six phases complémentaires : collecte de données, définition des grandeurs physiques, étude de faisabilité, phase de préparation, phase de mise en place et la phase d'évaluation et d'amélioration. La méthodologie proposée a prouvé sa robustesse dans la partie étude de cas au sein de l'un des ateliers d'un office phosphorique.

Mots clés : Maintenance prédictive ; Contrôle Non Destructif ; Analyse vibratoire ; Thermographie, Radiographie ; Ressuage ; Magnétoscopie ; Ultrasons ; Disponibilité ; Fiabilité ; Rapidité ; Coût ; Reproductibilité ; Sensibilité.