

Table de matières

Introduction générale	01
Chapitre I: L'utilisation de l'analyse vibratoire dans la maintenance	
I.1. Introduction	05
I.2. La Maintenance Par Analyse Vibratoire	05
I.2.1. Les stratégies de maintenance	05
I.2.1.1. Les différents types de maintenance	07
I.2.1.2. Le principe de la maintenance conditionnelle	08
I.2.1.2.1. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle	09
I.2.1.2.2. La comparaison entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle	
I.2.1.2.3. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle	10
I.2.1.2.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle	12
I.2.3. Les techniques de détection	12
I.3. Surveillance Et Diagnostic	13
I.4. Surveillance vibratoire de l'évolution d'un défaut	15
I.4.1. La nature de vibration	16
I.4.2. Le dépistage des défauts	16
I.4.3. Le diagnostic des défauts	16
I.4.4. Suivi de l'évolution d'un défaut	17
I.5. Les outils de l'analyse vibratoire	17
I.5.1. La chaîne d'acquisition	17

I.5.2. Le capteur de vibrations	17
I.5.3. Le matériel d'analyse	18
I.6. Mesure de signal vibratoire	19
I.6.1. Analyse temporelle	20
I.6.2. Analyse spectrale	20
I.6.3. Analyse cepstral	20
I.7. Conclusion	21
	23

Chapitre II: Source de vibration dans les engrenages

II.1. Introduction	
II.2. Les sources de vibration dans les engrenages	24
II.3. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages	24
II.3. 1. Défauts répartis sur toutes les dents	24
II.3.1.1. L'usure	25
II.3.1.2. Les piqûres (Pitting)	25
II.3.2. Défauts localisés sur certaines dents	25
II.3.2.1. L'Écaillage	26
II.3.2.2. Le grippage	26
II.3.2.3 La fissuration	26
II.4. L'engrènement des dents	27
II.5. Techniques d'identification des défauts	27
II.6. Fréquences caractéristiques de défauts	28
II.7. Les défauts des engrenages	30
II.7.1. Définition	30
II.7.2. Fréquence d'engrènement	30
II.7.3. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement	31
II.7.3.1. Détérioration d'une dent	32
II.7.3.2. Détérioration de deux dents sur les deux roues	32
II.7.3.3. Détérioration de l'ensemble de dentures	33
II.7.3.4. Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)	34
II.7.3.5. Jeu de fond de denture trop grand	34

II.7.3.6. Défauts induisant une modulation d'amplitude	35
II.7.3.7. déformation d'arbre	36
II.8. Conclusion	36
Chapitre III: Application de l'analyse d'ondelettes	38
III.1. Introduction	
III.2 . Transformée en ondelettes	39
III.2.1. Historique des ondelettes	39
III.2.2. Définition d'une ondelette	39
III.2.3. Ondelettes et résolution temps-échelle	40
III.2.4. La famille d'ondelettes	41
III.2.4.1. Ondelette de Haar	43
III.2.4.2. Ondelettes de Daubechies	44
III.2.4.3 Ondelette de Morlet	44
III.2.4.4. Ondelette chapeau mexicain	45
III.2.4.5. Ondelettes de Meyer	45
III.3. Type de la transformée en ondelette	45
III.3.1. La transformée en ondelette continue (TOC) ou (CWT)	46
III.3.2. La transformée en ondelette discrète (TOD)	47
III.3.3. La transformée en paquet d'ondelettes	47
III.4. Choix de l'ondelette et du nombre de niveaux de calcul pour la décomposition	48
III.5. Étude Expérimentale D'un Banc D'essai	49
III.6. Résultat et discussion	49
III.6.1. L'analyse spectrale (FFT)	52
III.6.2. L'analyse cepstral	52
III.6.3. Analyse d'ondelette	53
III.6.3.1. Cas du signal sans défaut	53
III.6.3.2. Cas du signal avec défaut	54
III.7. Conclusion	55
Chapitre IV : Étude comparative de diagnostic sur un réducteur d'un hélicoptère	56
IV.1. Introduction	
IV.2. Résultats et discussions	58

IV.2.1. L'analyse temporelle de forme d'onde	59
IV.2.2. Analyse de modulation d'amplitude	60
IV.2.3. Analyse Cepstral	61
IV.3. Diagnostic par moyennage synchrone	63
IV.3.1. Sans défauts	64
IV.3.2. Avec défauts	65
IV.4. Identification des harmoniques redondant	65
IV.5. Conclusion	66
Conclusion générale	68
Bibliographie	69
	71

LISTE DE FIGURES

Liste des Figures		
Chapitre I: L'utilisation de l'analyse vibratoire dans la maintenance		
Fig. I.1	Les différents types de maintenance	06
Fig. I.2	L'intervention de la maintenance conditionnelle	09
Fig. I.3	La fonction globale d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle	15
Fig. I.4	Organigramme des types de vibration	17
Fig. I.5	Acquisition et visualisation du signal	18
Fig. I.6	Accéléromètre piézoélectrique	19
Fig. I.7	Transformation du signal dans le domaine temporelle au fréquentielle	21
Chapitre II: Source de vibration dans les engrenages		
Fig. II.1	L'usure	25
Fig. II.2	Les piques	25
Fig. II.3	L'écaillage	26
Fig. II.4	Le grippage	26
Fig. II.5	La fissuration	27
Fig. II.6	Évolution des dents engrenant	28
Fig. II.7	Différents types d'engrenage	31
Fig. II.8	Effort sur les dents d'engrenage selon le type de denture	31
Fig. II.9	Image vibratoire d'un engrenage sain	32
Fig. II.10	Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée	32
Fig. II.11	Spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage la fréquence de rotation du pignon est de 8.9hz	33

Fig. II.12	Image vibratoire théorique d'une denture	34
Fig. II.13	Image théorique et spectre réel d'un engrènement fond de denture sur un réducteur la fréquence d'engrènement est $Fe=249,48HZ$	35
Fig. II.14	Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée	36
Fig. II.15	Exemple de défaut d'engrènement a) faut rond d'un pignon	36
Fig. II.16	Image théorique de la modulation d'amplitude de Fe par Fr	37
Fig. II.17	Spectre réel d'une modulation d'amplitude	37

Chapitre III: Application de l'analyse d'ondelettes

Fig.III.1	Projection de l'ondelette sur le signal	41
Fig.III.2	Résolution temps-fréquence de la TFCT	42
Fig.III.3	Résolution temps fréquence de TO	42
Fig.III.4	Forme de l'ondelette Haar	44
Fig.III.5	Forme des ondelettes Daubechies	44
Fig.III.6	Ondelette de Morlet	45
Fig.III.7	Ondelette chapeau mexicain	45
Fig.III.8	Ondelettes de Meyer	46
Fig.III.9	Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer « TOC »	47
Fig.III.10	Transformée en paquet d'ondelette	48
Fig.III.11	Schéma d'un banc d'essai	50
Fig.III.12	Le schéma unifilaire de l'engrènement	51
Fig.III.13	Démonstration de différentes fréquences de rotation correspond au chaque arbre	51
Fig.III.14	Comparaison des deux spectres du signal à engrenage avec charge: sans défaut et avec défaut	52
Fig.III.15	Cepstre du signal avec charge avec défaut	53
Fig.III.16	Bande latérale autour de quéfrence de rotation du pignon dans Cepstre du signal avec défaut	53
Fig.III.17.a	La forme ondelette avec charge sans défaut	54
Fig.III.17.b	Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW et sans défaut	54
Fig.III.18.a	Forme d'ondelette avec charge avec défaut	55
Fig.III.18.b	Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW et un défaut de cassure de dent	56

Chapitre IV: Étude comparative de diagnostic sur un réducteur d'un hélicoptère

Fig.VI.1	Boite de vitesse d'un hélicoptère	59
Fig. IV.2	Partie étudiée de la boite de vitesse d'un hélicoptère	59
Fig.IV.3.a	Le signal original des données réelles dans le domaine temporel sans défaut	60
Fig.IV.3.b	Le signal original des données réelles dans le domaine temporel avec défaut	61
Fig.IV.4.a	Spectre de signal des événements vibratoire de modulation d'amplitude de l'engrenage avec défaut	62
Fig.IV.4.b	Spectre de signal des événements vibratoire de modulation d'amplitude de l'engrenage sans défaut	62
Fig.IV.5.a	Cepstre du signal présentant une fondamentale de 0,0028 s, qui est 349Hz (vitesse de rotation du pignon) plus élevées par rapport au fondamentale de 0.006s qui correspond à 164 Hz (la vitesse de rotation de la roue) avec	64

Fig. IV.5.b	défaut Cepstre du signal présentant une fondamentale de 0,0028 s, qui est 349Hz (vitesse de rotation du pignon) plus élevées par rapport au fondamentale de 0.006s qui correspond à 164 Hz (la vitesse de rotation de la roue) sans défaut	64
Fig. IV.6	Cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire moyen de manière synchrone selon le PPCM du pignon et la roue	65
Fig. IV.7	Cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire moyen de manière synchrone selon le PPCM du pignon et la roue : le réducteur comporte un défaut au niveau du pignon.	66
Fig. IV.8	Cepstre du train d'engrenage défaillant	67
Fig. IV.9	Cepstre du train d'engrenage sain	68

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux		
Chapitre I: L'utilisation de l'analyse vibratoire dans la maintenance		
Tableau. I.1	Comparaison des outils de maintenance préventive conditionnelle	11
Tableau. I.2	Les défauts selon les techniques de détection	14
Tableau. I.3	La représentation temporelle de chaque nature de vibration	16
Chapitre III: Application de l'analyse d'ondelettes		
Tableau.III.1	Variation de la précision et de temps et fréquence en fonction du facteur d'échelle et fréquence	41

Tableau III.2	Les familles d'ondelette les plus usuelles	43
Tableau III.3	Les paramètres du réducteur	50
Chapitre IV: Étude comparative de diagnostic sur un réducteur d'un hélicoptère		
Tableau.IV.1	Calcule de différentes fréquences pendant l'engrènement	60

NOMENCLATURE

Indice	Désignation
Ipc	Intervention préventive conditionnelle
S(t)	Signal quelconque
S(f)	Le spectre

$C[s(t)]$	Le cepstre
TF	La transformée de Fourier
TF^{-1}	La transformée inverse de Fourier
Z1	Nombre des dents de pignon
Z2	Nombre des dents de la roue
F1	Fréquence de rotations de pignon
F2	Fréquence de rotations de la roue
Fe	Fréquence d'engrènement
Fco	Fréquence de coïncidence
PPCM	Plus petit commun multiple Z1, Z2
TO	Transformé d'ondelette
TOC	Transformé d'ondelette continue
TOD	Transformé d'ondelette discrète
$\psi(t)$	Ondelette mère
$h(t)$	Fonction de Haar
$\psi(x)$	Fonction de Morlet
$\psi(\omega)$	Fonction de Meyer
dbn	Les familles d'ondelettes de Daubechies
TFCT	La transformée de Fourier à courte terme
a	Le paramètre de localisation fréquentielle
b	Le paramètre de localisation temporelle
\sqrt{a}	Permet d'assurer la même énergie pour l'ondelette dilatée
a_0	Paramètre de dilatation
b_0	Paramètre de translation

f_s	Fréquence d'échantillonnage
n _{Ls}	Le nombre approprié de niveaux de la décomposition
f	Fréquence fondamentale
f _{m2} ;f _{m3} et f _{m4}	Les fréquences d'engrènement
f ₃	Fréquence de l'arbre de sortie

Introduction Générale

Introduction générale

L'analyse du signal vibratoire est une méthode importante dans la détection et le diagnostic des défauts et des dommages de boîtes de vitesses. La détection des défauts de boîtes de vitesses à temps peut réduire l'effet des dommages des matériaux et des équipements. Par conséquent, d'importants moyens ont été utilisés pour la détection précoce des défauts dans la boîte de vitesses de l'hélicoptère. L'entretien périodique a ses limites car certains défauts peuvent se produire de façon aléatoire. Ainsi, les méthodes de surveillance conditionnelle basée sur différents tests effectués régulièrement ont été employées. L'analyse des signaux de vibration [1, 2, 3, 4] enregistré par les accéléromètres [5] est l'une des méthodes les plus appropriées pour ces tests ou essais. Les signaux de vibration mesurées à partir d'une boîte de vitesses sont complexes, non stationnaire et variable dans le temps [6]. Lors de la détection des dommages de boîte de vitesses, les résultats de l'analyse de Fourier traditionnelle [7, 8] ne sont pas faciles à analyser et à interpréter; d'autres procédés de traitement de signal ont été étudiés [9] dans le but de faciliter l'interprétation et l'analyse des résultats. Parmi les méthodes employées pour la détection des défauts de boîte de vitesses; Hilbert et Wavelet Packet Transform [10, 11], filtre à ondelettes adaptative [12], extraction des caractéristiques artificiel basé sur un programme génétique [13], EMD et la sélection automatique du mode intrinsèque [14],[15].

De nombreux travaux de recherche ont été menés sur les engrenages de la boîte de vitesses [16], les dents [17, 18], les roulements [19, 20, 21, 22] et le système de transmission [23, 24, 25, 26] pour la détection précoce de défauts pour éviter les accidents et en même temps améliorer le système de surveillance de l'hélicoptère [27, 28, 29].

Dans certains cas, les bandes latérales sont pas toujours visibles sur le spectre, donc, un outil de traitement de signal appelé cepstre est utilisé pour améliorer la détection des défauts [30, 31, 32]. Ce sepstrum a la particularité de séparer une famille de raies spectrales de fréquence permettant la détection des défauts d'une manière plus claire. Dans le cas de défauts mixtes, le spectre montre non seulement les deux lignes de peignes correspondant à des fréquences de chaque arbre de rotation, mais également un peigne correspondant à une fréquence très basse dite

fréquence de coïncidence (Fc), ce qui peut refléter l'impact des deux dents défectueuse (roue / pignon).

Le but de ce travail est de discuter, d'évaluer et de mettre en évidence les méthodes de diagnostic de faute fondée sur l'analyse des vibrations. Les défauts des engrenages d'hélicoptères sont identifiées et analysées à l'aide de l'analyse temporelle de la forme d'onde, la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse de modulation d'amplitude, l'analyse cepstral, et le diagnostic par la technique moyenne synchrone [34, 35, 36, 37, 38]. Ces méthodes ont été testées par simulation en utilisant l'environnement MATLAB avec des données réelles enregistrées au cours d'un vol en hélicoptère. Le problème est analysé en commençant par l'explication des engrenages, les sources de vibrations et la description des différentes anomalies. Ensuite, la visualisation et la comparaison des différents signaux sains et non sains sont effectuées. Des méthodes appropriées ont été utilisées pour visualiser les défauts d'une manière claire et faire rapidement les corrections nécessaires.

L'engrenage dans une boîte de vitesses génère des vibrations et le signal de vibration correspondant pourrait être utilisé comme une référence lorsque le train d'hélicoptère est sain. Si des défauts se produisent dans l'un des engrenages en service, la boîte de vitesses défectueuse est susceptible de causer un dommage grave. Les changements dans les signaux de vibration sont souvent un signe que l'un des engrenages est endommagé. Par conséquent, le système de surveillance de la boîte de vitesses pendant le fonctionnement est essentiel car il est conçu pour éviter un mauvais fonctionnement qui pourrait provoquer une défaillance du système. Jusqu'à présent, l'état de surveillance et d'identification des dommages de réducteurs industriels ont reçu une attention considérable de la part des chercheurs [27, 28, 29]. L'évolution rapide des matériaux et de la technologie de capteurs intelligents ainsi que le traitement de signal et la technologie d'information offrent de nouvelles solutions pour surmonter une variété de problèmes liés à des défaillances dans les boîtes de vitesses industrielles opérant dans un environnement réel avec une précision et efficacité. Ces méthodes sont bien établies dans les applications industrielles, telles que les techniques de traitement de signal de vibration largement utilisées et appliquées. Toutefois, étant donné que les signaux de vibration mesurés de la boîte de vitesses sont non stationnaires et transitoires [6], quand une défaillance survient, il est plus intéressant de procéder à une investigation. Toutes ces techniques présentent des limites et ne peuvent être

appliquées dans toutes les conditions, ce qui signifie que certains types de pannes ne peuvent pas être détectés par des méthodes simples de vibration. Analyse spectrale simple est généralement incapable de détecter les dommages sur l'engrenage à un stade précoce pour cette raison, de nombreux travaux ont proposé l'application d'autres techniques d'évaluation des vibrations pour la détection précoce des signes des dommages. Dans le domaine fréquentiel, la contribution de l'analyse spectrale et cepstral a été démontré dans la littérature [30, 31, 32]. En fait, l'amplitude de la fréquence d'engrènement augmente progressivement avec l'augmentation de la taille de la fissure.

Les engrenages sont largement utilisés dans les machines de transmission de puissance d'un arbre à l'autre; ils sont généralement liés à un changement de vitesse et de couple. Dans mécanisme de réducteur, les sources les plus importantes de vibrations sont des variations de temps sur la rigidité de masse, causées par la variation de nombre de dents en contact, et la variation de rigidité de dent individuelle. Dans la pratique, tous les engrenages contiennent des erreurs de conception dans les dents, en raison de taillage d'engrenages, l'espacement de l'angle de maillage et de la rugosité de surface des engrenages. En raison de ces mécanismes, l'amplitude de modulation du signal ou la variation de fréquence peut être affectée, ce qui conduit à des structures à bande latérale autour de la fréquence d'engrènement de l'engrenage et ses harmoniques. L'amplitude du signal de vibration varie en fonction de la charge moyenne. Il existe deux principaux types de défauts [39]. Les défauts affectant toutes les dents (usure et à la corrosion) [40, 41] et ceux qui sont situés sur les dents particulier (fissures, un écaillage et saisie) [33, 35, 42, 43, 44].

Dans ce travail, on intéresse à présenter une étude détaillée sur le diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire (cas d'un réducteur de vitesse). Pour atteindre l'objectif fixé, on a réparti la thèse en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, l'analyse vibratoire est utilisée pour prévoir et détecter les pannes des équipements (maintenance préventive conditionnelle). Avant de montrer l'importance de l'analyse vibratoire dans le domaine de la maintenance, la définition et la description de chaque type de maintenance a été donnée ainsi que les méthodes utilisées telles que l'analyse d'huile et la thermographie.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude générale d'un élément de transmission mécanique qui est le réducteur. Une partie de ce chapitre est dédié aux sources de vibrations dans les engrenages, les différents types de détérioration des dentures d'engrenages, l'engrènement des dents, les fréquences caractéristiques des défauts, les défauts dans les engrenages et les fréquences d'engrènement. L'importance de la surveillance de l'état du système de la boîte de vitesses lors de son fonctionnement et l'identification des dommages des réducteurs industriels est expliquée et détaillé à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre traite et explique la technique des ondelettes et son application sur un banc d'essai. Dans la première partie de ce chapitre, la méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur cette méthode, son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la méthode de calcul de la transformation des signaux analysés ainsi que l'état de l'art de quelques travaux utilisant la méthode (TO)dans le domaine du diagnostic mécanique. La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude expérimentale sur un banc d'essais composés d'un réducteur à plusieurs étages entraînés par un moteur asynchrone.

Dans le quatrième chapitre on a fait une comparaison avec plusieurs techniques de diagnostic et aussi on a basé sur l'outil statistique. L'objectif de l'utilisation de la moyenne géométrique est de pénaliser les fréquences des harmoniques presque nulles. Il est alors un indicateur de redondance fréquentielle.

Ce travail de recherche est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Utilisation de l'analyse vibratoire dans la maintenance

- I.1. Introduction
- I.2. La maintenance par analyse vibratoire
- I.3. Surveillance et diagnostic
- I.4. Les outils de l'analyse vibratoire
- I.5. Les outils de l'analyse vibratoire
- I.6. Mesure de signal vibratoire
- I.7. Conclusion

Chapitre I

L'utilisation de l'analyse vibratoire dans la maintenance

I.1.L' introduction

Les machines industrielles vibrent d'où la nécessité d'interpréter leurs vibrations dans le but de déterminer les différentes anomalies. La rigidité de la machine, sa structure, sa fixation, ses conditions de fonctionnement sont des paramètres qui influent sur le signal vibratoire. Généralement, le capteur destiné à suivre l'information fournie par les vibrations ne peut être placé à la source du défaut, donc le signal capté est influencé par le chemin qu'il parcourt entre la source et le capteur. La conception d'une machine n'est donc pas simple et nécessite de prendre en compte tous ces paramètres, sans oublier ses fonctions de base.

Pour établir un diagnostic, il faut s'appuyer sur le fait qu'une machine émet vers l'extérieur de nombreux signaux qui sont particuliers à son fonctionnement, tels que la chaleur dégagée, la puissance absorbée, le bruit, les vibrations, etc

Les mesures réalisées sur les machines en fonctionnement sont faciles à mettre en œuvre cela permet une détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines de production. Souvent la plupart des anomalies peuvent être détectées suffisamment tôt pour planifier une intervention avant la panne. L'analyse vibratoire joue un rôle important dans le diagnostic des machines à des fins de maintenance.

Dans ce chapitre, l'analyse vibratoire est utilisée pour prévoir et détecter les pannes des équipements (maintenance préventive conditionnelle). Cette méthode est riche en information et son objectif principal est d'éviter les pannes des machines tournantes.

I.2. La maintenance par analyse vibratoire

Avant de montrer l'importance de l'analyse vibratoire dans le domaine de la maintenance il est nécessaire de définir et décrire chaque type de maintenance.

I.2.1. *Les différents types de maintenance*

Selon la norme NF-X60-010 [AFNOR 90b], la maintenance est définie comme étant un ensemble d'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. Pour des raisons de sécurité et de rentabilité, les activités de maintenance sont essentielles pour assurer la continuité et la durabilité des machines industrielles. Elles permettent une diminution des coûts de production et

l'amélioration de la qualité des produits. Il est possible de distinguer trois stratégies de maintenance, comme illustré sur la Fig. I.1.

- la maintenance corrective correspondant à une action effectuée après la panne.
- la maintenance préventive systématique effectuée selon un échéancier fixé sur la base du minimum de durée de vie des composants mécaniques.
- la maintenance préventive conditionnelle subordonnée à un type d'événement prédéterminé.

Cette stratégie doit tenir compte de la complémentarité des méthodes correctives et préventives. Les paramètres qu'il faut prendre en considération pour réaliser cette politique sont d'ordre économique et humain.

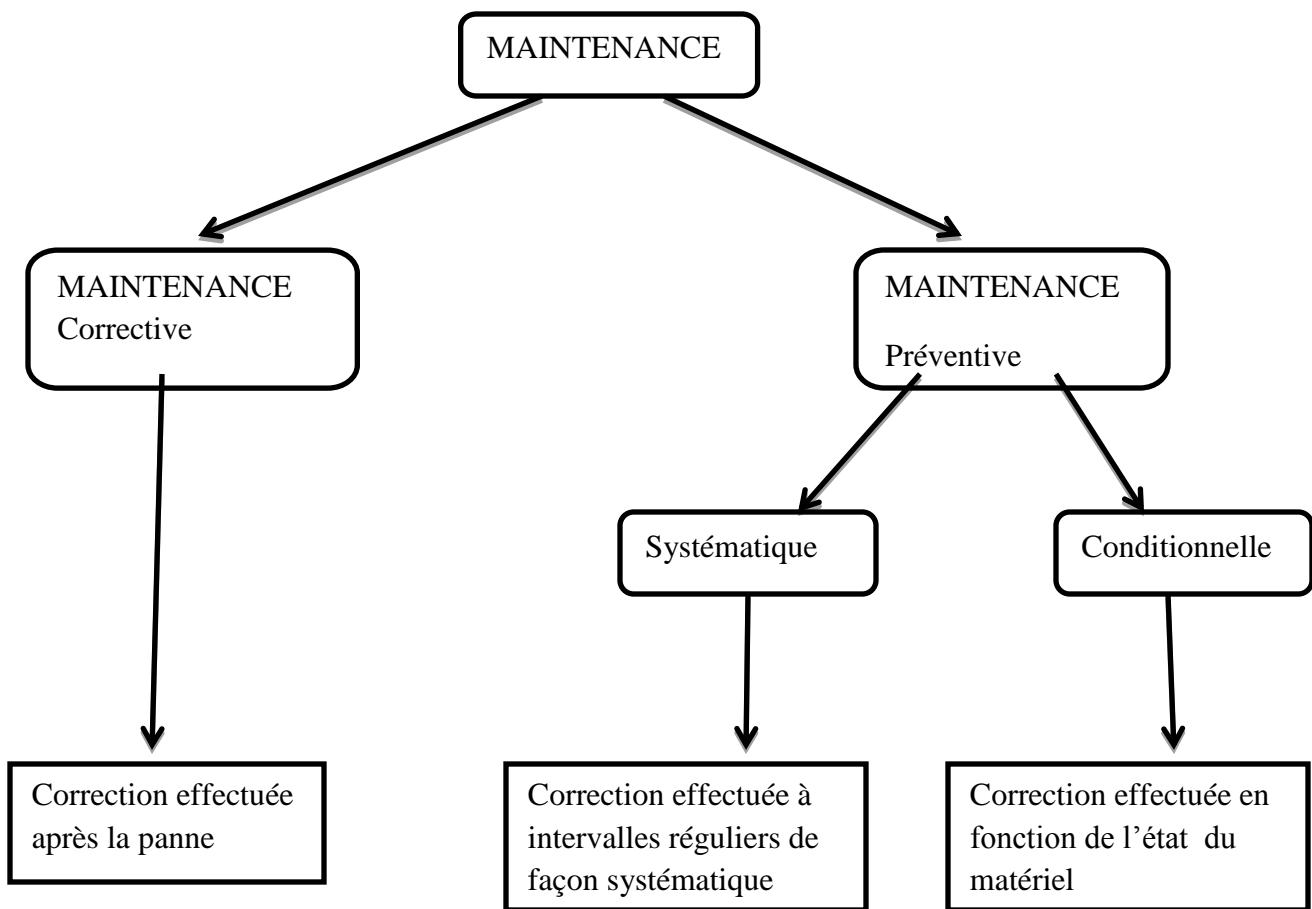


Fig. I. 1. Les différents types de maintenance [2]

Le principe de la maintenance conditionnelle est d'estimer l'état des éléments mécaniques en effectuant différents types de mesures. La nature de ces mesures dépend de la machine ou l'équipement à suivre. Cela peut être des mesures de vibration, des analyses d'huile, des thermographies infrarouges, etc ... [2]. Quand la limite admissible de ces défauts est dépassée, il est recommandé de programmer l'arrêt de la machine. Cela entraînera la perturbation minimale du cycle de production.

Ce type de maintenance est caractérisé par :

- l'emplacement et le nombre de points de mesure
- la collecte et le traitement des informations
- la nécessité d'obtenir un diagnostic précis
- un investissement important

Parmi les méthodes employées en maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire qui est la technique la plus adoptée pour le suivi des machines tournantes. En effet, un ensemble de pièces en mouvement, quel que soit la forme de la structure porteuse, génère des vibrations, et ce, même si les machines analysées sont en bon état de fonctionnement. Les vibrations dans les bâtis de machine peuvent avoir plusieurs origines, telles que les arbres mal équilibrés, mais aussi des roulements à billes, des engrenages ou des courroies en parfaite état de marche qui viennent exciter les bâtis. Le comportement non-linéaire de certains composants modifie les rigidités de ces organes et par voie de conséquence, les efforts induits.

Les vibrations obtenues pendant les mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine à analyser. Grâce à l'analyse de ces vibrations, il est possible de détecter et localiser les éléments défectueux. Quand une certaine limite (correspondant à un niveau de vibration) fixée est atteinte, il est possible d'évaluer la durée de vie de l'élément dans les conditions de fonctionnement connues à partir de la connaissance de lois d'endommagement [2].

I.2.1.1. La maintenance corrective

La maintenance corrective est définie par la norme [NF EN 13306] comme exécution d'une opération après détection d'une panne d'un équipement et le remettre dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction demander [3].

Dans ce type de maintenance, l'intervention vient après l'apparition de la panne. On distingue deux types de maintenance : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- Maintenance palliative est définie par l'opération de dépannage dans le cas d'une panne partielle, son objectif est d'éliminer les effets de la panne et permettre au matériel de fonctionner jusqu'à l'arrêt préventif.
- Maintenance curative est définie par l'opération de réparation dans le cas d'une panne totale, le but de cette maintenance est de remettre le matériel en marche [3].

I.2.1.2. La maintenance préventive

L'objectif de la maintenance préventive est de réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'une machine [4]. Les opérations de cette maintenance sont effectuées par des interventions prévues, préparées et programmées selon des critères différents pour éviter une défaillance possible. Les opérations de la maintenance préventive [5] sont nombreuses et on peut les résumer comme suit :

- Le nettoyage,
- Lubrification des endroits de frottement,
- Le contrôle et l'inspection des équipements sont réalisés à l'arrêt et en marche,
- La révision partielle ou globale,
- L'analyse des signaux vibrations (mesure) et des huiles.

Dans ce genre de maintenance on peut observer ce qui suit :

a- La maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est définie par la norme AFNOR X 60-010 [6] comme un ensemble d'activités correspondantes exécuté selon un programme établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage. Les changements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, qui se déroulent d'une façon périodique.

b- La maintenance préventive conditionnelle

Ce type de maintenance est réalisée par une surveillance des endroits sensibles des équipements et définit par la norme AFNOR X 60-010 [6] comme un ensemble d'activités de maintenance

réalisées en fonction des critères prédéterminés et propres à l'état de dégradation de l'équipements.

c- La maintenance prédictive (prévisionnelle)

La maintenance prédictive est la dernière étape de l'entretien de l'équipement, effectuée en fonction des prévisions planifiées de l'analyse et de l'évaluation des critères de la dégradation de l'équipement ou du bien [norme NF EN 13306] [6].

I.2.2. Le principe de la maintenance conditionnelle

La Figure. I.2, résume le principe de la maintenance conditionnelle. Dans ce type de maintenance une intervention préventive conditionnelle (IPC) est planifiée, s'il y une mesure périodique d'une dégradation touchant le seuil d'alarme (un arrêt préventif) [6].

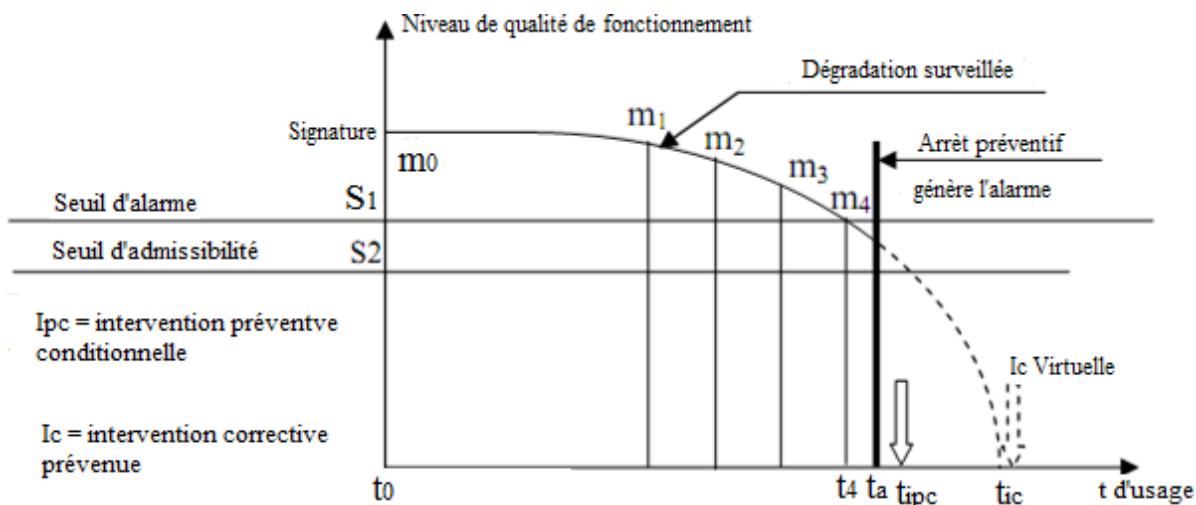


Fig. I. 2. L'intervention de la maintenance conditionnelle [6]

I.2.2.1. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle

Les méthodes ou techniques de la maintenance préventive conditionnelle sont utilisées pour suivre et surveiller les installations industrielles, parmi ces techniques on peut citer ce qui suit :

I.2.2.1.1. L'analyse des signaux vibrations

La surveillance par l'analyse vibratoire des installations industrielles est l'outil préventif de la maintenance. Cette méthode est habituellement utilisée dans la plupart des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies qui peuvent apparaître dans les machines tournantes. Un défaut causé par un roulement, un jeu usé ou un défaut d'alignement, se manifeste par un changement des efforts internes que subit la machine, cela provoque une variation dans son comportement vibratoire [7].

Généralement, on surveille l'état d'un équipement par la fixation des capteurs de vibration (accéléromètres) aux endroits où les efforts sont transmis (sur les paliers des machines). L'avantage principal de l'analyse vibratoire est la facilité de prendre les mesures, la détection des défauts à un stade précoce et la possibilité de réaliser un diagnostic détaillé pour déterminer l'origine du défaut [7].

I.2.2.1.2. L'analyse des huiles

Cette méthode de surveillance est basée sur l'analyse des huiles dans le but de déterminer l'état d'huile ou de graisse utilisée comme lubrifiant. La méthode analyse les particules d'usure drainées par le lubrifiant, afin de connaître d'une manière précise l'état de l'installation [8].

I.2.2.1.3. La technique de la thermographie

La thermographie infrarouge est une technique importante employée dans le domaine de la maintenance industrielle. Elle est utilisée pour le contrôle d'installations électriques et la surveillance des machines tournantes. Pour déterminer la condition de fonctionnement, elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface). En repérant des anomalies thermiques (les endroits qui sont plus chauds ou plus froids), un expert peut identifier et expliquer les problèmes de l'installation.

Les éléments de base d'un appareil infrarouge industriel sont le système optique, les capteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur. Le système optique collecte l'énergie sur un capteur et la transformer ensuite en signal électrique, puis un dispositif électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en mode affichable.

La thermographie permet de réaliser des mesures à distances, et assurer instantanément une représentation thermique de la zone contrôlée [8].

I.2.2.1.4. L'analyse acoustique

L'analyse acoustique est une technique de la maintenance préventive conditionnelle qui permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générés par les systèmes électromécaniques. La mesure de son ou de bruit effectuée à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB(A), effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée.

I.2.2.2. Comparaison des techniques de maintenance préventive conditionnelle

La comparaison des différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle [8] est présentée dans le tableau I.1.

Tableau. I.1.Comparaison des outils de maintenance préventive conditionnelle

	Avantages	Limitations	Domaines d'applications
Analyse de vibration	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts à une étape précoce. - Un diagnostic détaillé est réalisable -Permet une surveillance continue - Permet le contrôle de l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> -Spectres de fréquence parfois difficiles à analyser -Dans le cas de la surveillance continue, équipements utilisés est relativement cher 	<ul style="list-style-type: none"> -Découverte des défauts de tous les éléments cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> -Reconnaissance d'une pollution anomale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou une défaillance 	<ul style="list-style-type: none"> -N'autorise pas la localisation régulière des défauts. - De nombreuses précautions sont obligatoires pendant le prélèvement de l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> -Examen des propriétés physico-chimiques du lubrifiant - Découverte d'un manque de lubrification

	-On peut identifier l'origine de la défaillance par l'analyse des particules		
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'effectuer un contrôle rapide des équipements - Interprétation souvent rapide des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire -Contrôle limité à ce que visualise la caméra (échauffements de surface) -Ne permet pas d'accomplir un diagnostic détaillé 	<ul style="list-style-type: none"> - Localisation et identification de tous les défauts donnant naissance à un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse Acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de déceler l'apparition de défauts audible - Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à réaliser - Problème de répétition des mesures 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'un bruit inhabituel qui peut être expliqué par l'analyse vibratoire

I.2.2.3. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle

L'avantage major de la maintenance préventive conditionnelle est d'éviter les arrêts des machines tournantes et des systèmes électromécaniques. Il faut utiliser des outils de ce type de maintenance pour contrôler l'état de la machine pour réduire sa probabilité de défaillance. Il existe quatre outils principaux utilisés en maintenance préventive conditionnelle [8]:

- La thermographie infrarouge
- L'analyse des huiles
- L'analyse vibratoire et l'analyse acoustique

L'inconvénient principal de la maintenance préventive conditionnelle est les difficultés rencontrées pendant la réalisation pratique de ces techniques.

I.2.2.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle

Un nombre important des objectifs sont réalisés avec l'application de la maintenance préventive conditionnelle qu'on peut résumer comme suit [9, 10 et 11].

1.2.2.4.1. Amélioration de la fiabilité des éléments du système

L'application de la maintenance préventive conditionnelle nécessite des analyses techniques du comportement du système. Cela permet d'éliminer un nombre de défauts et adopter une maintenance préventive optimale.

1.2.2.4.2. Assurer la qualité des produits

La surveillance habituelle facilite la détection des défaillances. On ajuste les paramètres tout en respectant le fonctionnement des systèmes électromécaniques. Dans ce cas, la qualité des produits est assurée et le rendement est élevé.

1.2.2.4.3. Améliorer l'organisation des tâches

La surveillance continue des machines de production assure la réduction de risque d'avarie grave et la garantie de fonctionnement sans arrêt. Cela nécessite une bonne coordination entre les services de production et de maintenance pour la planification des interventions et le respect du programme de maintenance.

1.2.2.4.4. Garantir la sûreté de fonctionnement

L'assurance de la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement sont basés sur les interventions de la maintenance préventive et les critères de la sécurité pour éviter les risques dangereux.

1.2.2.4.5. Amélioration de la gestion des stocks

Le fonctionnement d'organe et éléments d'un système au maximum de leur durée de vie nécessite une surveillance très rapprochée. Le besoin en pièce de rechange peut être limité, avec la provision des pièces de rechange selon les nécessités réelles. Une amélioration de la gestion des stocks est nécessaire pour réduire les coûts des pièces de rechange.

I.2.2.4.6. Moderniser le climat de relation humaine

L'intervention rapide par les opérations de la maintenance minimise le temps d'arrêt et évite la perte de production. Certaines difficultés, tel que l'absence de pièces de rechange, entraînent un arrêt de la machine pendant un temps important, ce qui provoque un déséquilibre entre la production et la maintenance. La maintenance préventive conditionnelle nécessite un personnel qualifié et expérimenté surtout pour les interventions ciblées et organisées.

I.2.2.4.7. Minimisation du coût global de la maintenance

L'amélioration et renforcement de la disponibilité des équipements est le but principal de la maintenance préventive conditionnelle. Ce type de maintenance minimise les arrêts systématiques et permet d'élever le rendement du système. Le cout total de la maintenance est réduit car la surveillance permet de découvrir les petits défauts de la conception ou du fonctionnement, et aussi le control de l'évolution d'une dégradation évite la rupture d'organes. Cela permet d'éloigner le risque de rupture importante de la machine, ce qui conduit à la prolongation de la durée de vie de l'installation.

I.2.3. Les techniques de détection

Les principales techniques de détection selon les défauts potentiels [8] sont résumées et illustrées dans le tableau présenté ci-dessous :

Tableau. I.2. Les défauts en fonction des techniques de détection

Types de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Oui (s'il y a une résonance)

Défauts spécifiques aux roulements	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts spécifiques aux engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Non
Défauts liés à la lubrification - dégradation de la qualité d'huile	Non (sauf paliers Fluides)	Oui	Non	Oui
Maque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

Dans le domaine de la maintenance, les recherches ont pour but de mettre une stratégie de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils appropriés et adaptée à un système électromécanique. Cette stratégie de maintenance permettra de surveiller, de localiser et d'identifier les défauts qui apparaissent sur le système en fonctionnement, et d'établir les opérations de maintenance correctives soit le dépannage ou la réparation Figure. I.3 [12].

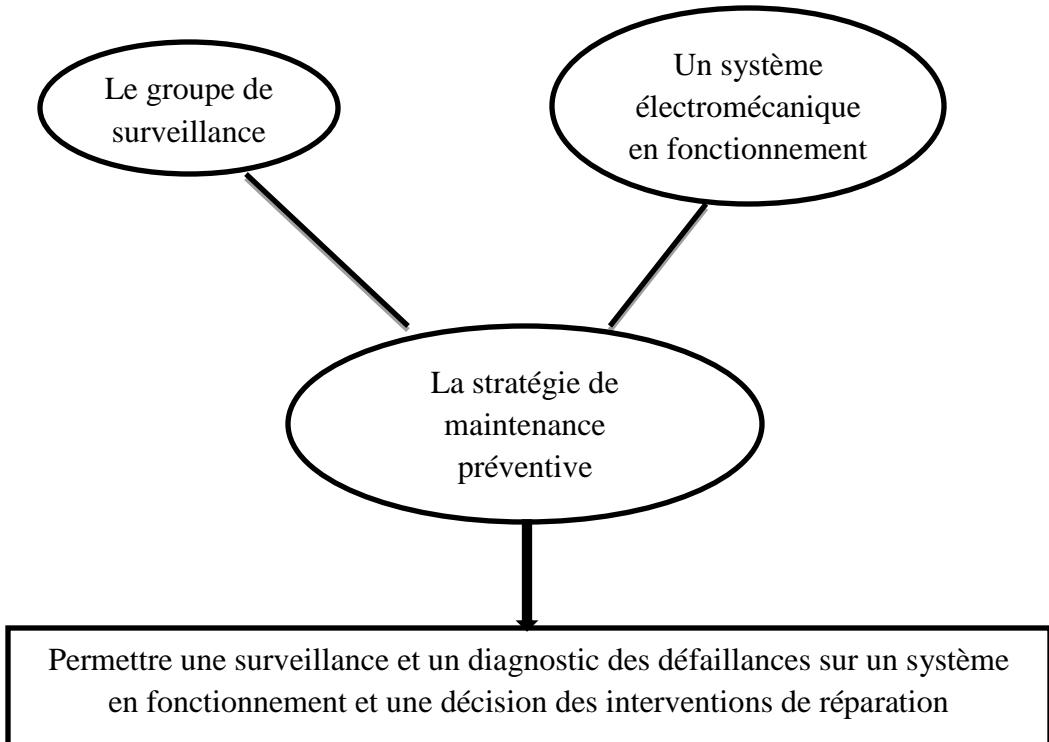


Fig. I.3. La fonction d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle

I.3. Surveillance et diagnostic

La comparaison des mesures vibratoires réalisées à des intervalles de temps déterminés dans des conditions identiques permet de suivre la progression d'un défaut en exploitant le signal vibratoire [13]. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de la progression du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO 10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle 10-1000 Hz sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes restent imprécises et ne permettent pas d'identifier la cause de la progression du niveau vibratoire.

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire de faire appel à des outils mathématiques relativement élaborés. Ces outils aident l'opérateur et lui permettre de déterminer les origines des défauts. Généralement, les signaux vibratoires sont insuffisants pour établir un diagnostic. C'est pourquoi il est plus que nécessaire de connaître la cinématique de la machine, et

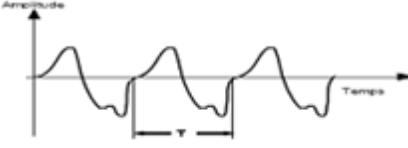
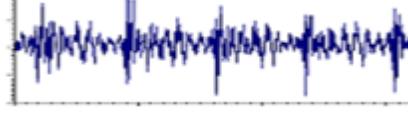
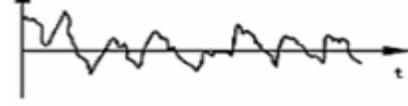
également les caractéristiques de ses éléments ainsi que leurs différents modes de dégradation. La connaissance de ces modes de défaillance et de leurs influences sur le niveau de vibration conduise à un diagnostic et une surveillance fiable.

I.4. Surveillance analyse vibratoire de l'évolution d'un défaut

I.4.1. La nature de vibration

Chaque type de vibration connaît par sa représentation temporelle, plus de détails dans les références [10, 14], le tableau I.3. Illustre ces natures.

Tableau. I.3. La représentation temporelle de chaque nature de vibration

Nature de vibration	La représentation temporelle de vibration	Les causes
Périodique de type sinusoïdal Simple		balourd
Périodique de type sinusoïdal Complex		Engrènement
Périodique de type impulsionnel		Ecaillage des Roulements
Aléatoire de type impulsionnel		Défauts de lubrification sur des roulements

I.4.2. Le dépistage des défauts

Pour éviter toute dégradation intempestive de la machine, il est nécessaire de programmer le plus tôt possible une intervention de maintenance dès l'apparition d'un défaut. Cette démarche est basée sur un choix d'indicateurs significatifs caractérisant la sévérité du défaut avec quantification d'un seuil limite admissible. Concernant les roulements, les indicateurs de dépistage sont la valeur efficace, les indicateurs crêtes ou encore le Kurtosis définis dans une bande de fréquences précise afin de réduire l'effet de masque.

I.4.3. Le diagnostic des défauts

Connaître l'existence d'un défaut n'est pas suffisant, il est aussi important de déterminer la nature et la gravité du défaut. Établir un diagnostic consiste à rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter la machine. Cette démarche est rendue possible en s'appuyant sur une analyse automatique du signal. L'analyse spectrale par transformée de Fourier et les outils d'analyse qui lui sont associés, sont les moyens les plus efficaces pour diagnostiquer un défaut dans un matériel de production [13]. Il existe plusieurs types de vibration, l'organigramme ci-dessous illustre les différents types de vibration.

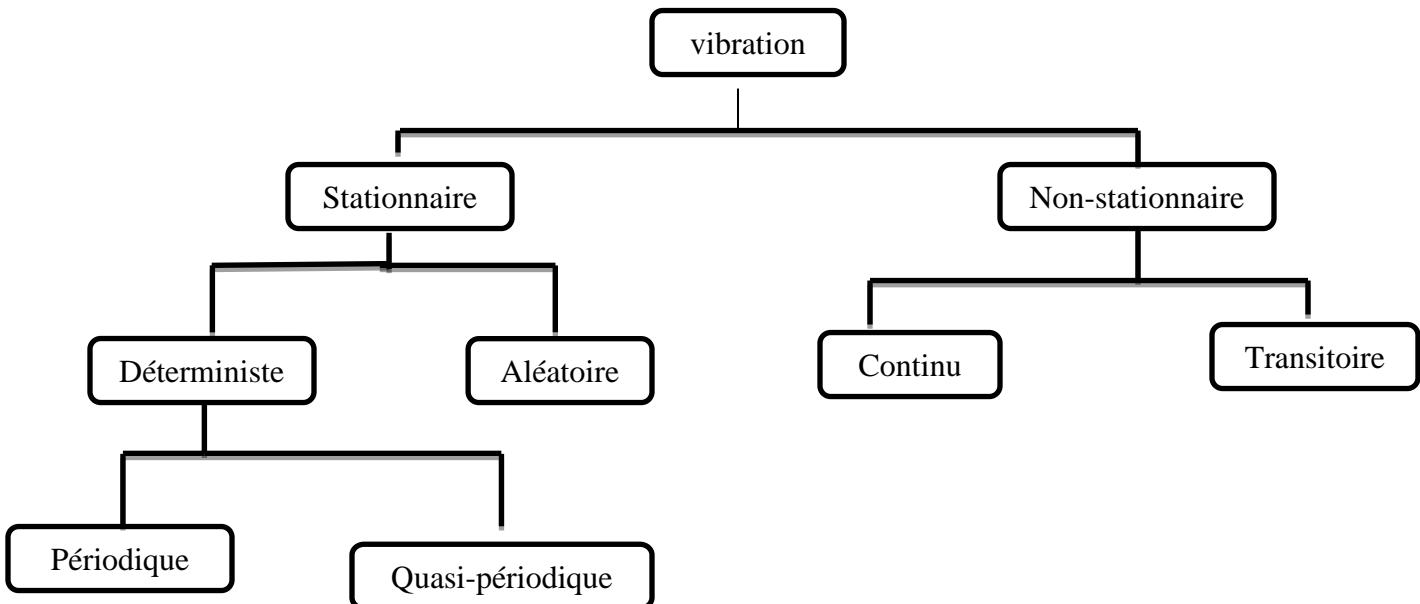


Fig. I.4. Organigramme des types de vibration [12]

I.4.4. Suivi de l'évolution d'un défaut

Quand le défaut est détecté et la sévérité est déterminée, il faut suivre son changement dans le temps. Ce suivi permet de modéliser son évolution et de définir une durée de vie résiduelle [15].

I.5. Les outils de l'analyse vibratoire

I.5.1. La chaîne d'acquisition

La chaîne de mesure est l'élément essentiel de l'analyse vibratoire pour l'acquisition des signaux à étudier. Le capteur d'accélération a pour rôle de transformer les vibrations mécaniques en signaux électriques. L'amplificateur va ensuite augmenter son intensité afin de pouvoir traiter le signal. Les limitations dans la gamme de fréquences sont faites grâce à des filtres « passe haut » et « passe bas » comme le montre la Fig. I.5 [2].

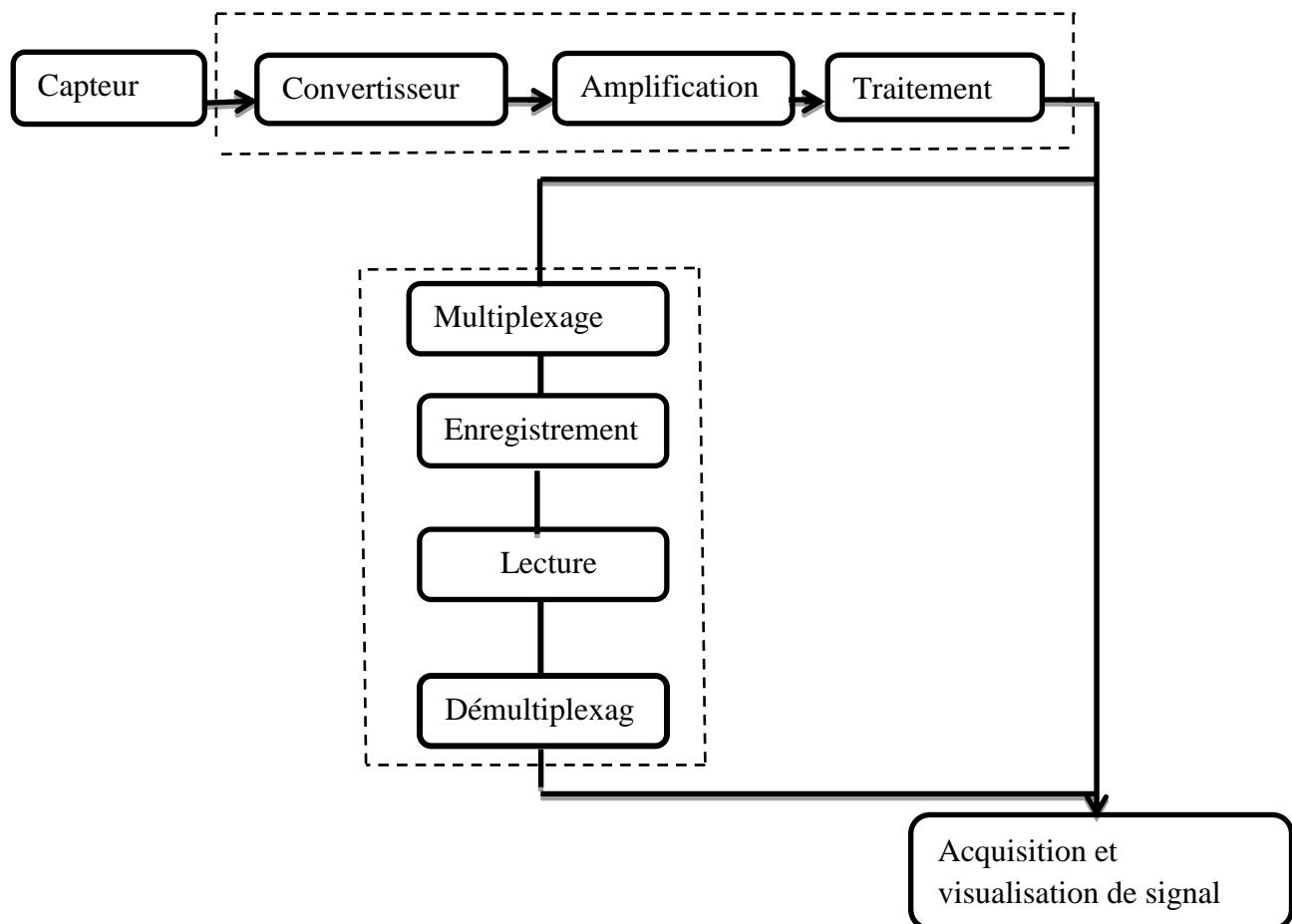


Fig. I.5. Acquisition et visualisation du signal [2]

I.5.2. Le capteur de vibrations

Le capteur de vibration le plus utilisé est l'accéléromètre piézo-électrique. Il est constitué d'une masselotte placée sur un cristal piézo-électrique dont les deux faces opposées ont été rendues conductrices par dépôt métallique Fig. I.6. Il possède une très bonne linéarité et une large bande passante. Un capteur monodirectionnel collé sur la paroi d'un bâti mesure les accélérations normales à celle-ci. Sa masse, bien que légère (environ 20 g), influence les mesures, car sur des parois de grandes dimensions et relativement peu épaisses, une masselotte ajoutée peut réduire les fréquences propres de quelques pour cent.

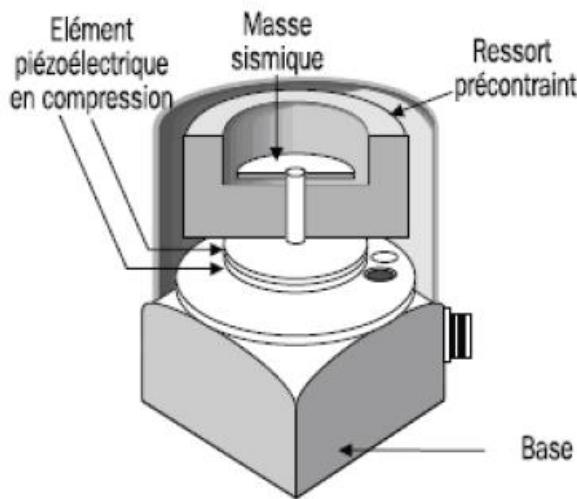


Fig. I.6. Accéléromètre piézoélectrique

La fixation du capteur sur la structure a une grande influence sur la qualité du signal mesuré. Il peut être fixé de différentes manières sur la machine, cette fixation joue un rôle important sur le résultat des mesures, et la largeur de bande peut être affectée [17]. Afin que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient efficaces même en basses fréquences, il reste préférable d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle) [18]. L'accéléromètre doit être placé dans des endroits de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée [19]. La tendance aujourd'hui est de placer le capteur près de l'élément à suivre, ainsi en limitant les distances et les contacts, le signal sera moins perturbé.

I.5.3. Le matériel d'analyse

L'outil de base de traitement du signal utilisé pour le diagnostic est l'analyseur de spectres «multivoies ». On trouve encore d'autres types de matériel tels que les collecteurs de données destinés à la surveillance des machines dans les installations industrielles. Ceci se justifie par l'importance de l'analyse des mouvements de paliers et de leurs réponses impulsionales [20]. La représentation des déformées modales et des déformées en fonctionnement sont aussi un élément essentiel qui peut faciliter le diagnostic. La difficulté majeure demeure dans le choix des outils à mettre en œuvre qui sont conditionnés par :

- La cinématique de la machine
- Sa dynamique
- La structure de la machine
- Les niveaux de criticité de la machine.

I.6. Mesure de signal vibratoire

I.6.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal.

Le nombre d'échantillons pris en compte dans le domaine doit être suffisamment élevé pour éliminer le signal individuel de tout ce qui n'est pas lié cinématiquement à la rotation de l'arbre considéré.

Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts.

I.6.2 Analyse spectrale

Le signal mesuré est considéré comme une combinaison des réponses des composants constituant le système. La plupart des fréquences caractéristiques sont proportionnelles à la fréquence de

rotation des arbres. Un signal quelconque $S(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires. L'analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinus, ce qui permet de tracer la représentation amplitude/fréquence de $S(t)$. Ainsi cette analyse permet de mettre en évidence les différentes périodicités dans le signal original. Pour obtenir le spectre $S(f)$ de $S(t)$ (I.1), on applique la fonction mathématique Transformée de Fourier :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (I.1)$$

$$S(K) = \sum_{j=1}^N s(j) \omega_N^{(j-1)(K-1)} \quad (I.2)$$

Avec $\omega_N = e^{\frac{-2\pi i}{N}}$

La technique de l'analyse spectrale se concentre sur le contenu des vibrations des bandes latérales de la fondamentale de fréquence d'engrènement. La fréquence de 10825 Hz a été identifiée comme La fréquence d'engrènement de la boîte de vitesses.

Les bandes latérales de la fréquence d'engrènement sont causées par des modulations d'amplitude et peut être très utile pour l'évaluation des dommages de l'engrenage. Les modulations peuvent être causées par des désalignements de l'engrenage, excentricités, l'usure des surfaces de l'engrènement ou tout autre problème qui causerait des profils de dents d'engrènement à s'écartez de leur géométrie idéale ou erreurs de l'espacement des dents. Ces erreurs provoquent le point d'engrènement entre la roue menant et la roue mené de se promener pendant le fonctionnement, ce qui provoque la vitesse des engrenages et des arbres en vue d'accélérer et de moduler.

Cela provoque une augmentation ou diminution de l'énergie d'engrènement pendant la rotation.

Habituellement, l'amplitude à la fréquence d'engrènement n'est pas utilisée pour détecter un défaut d'un dommage des engrenages, car les autres paramètres d'exploitation tels que les charges peuvent affecter cette amplitude.

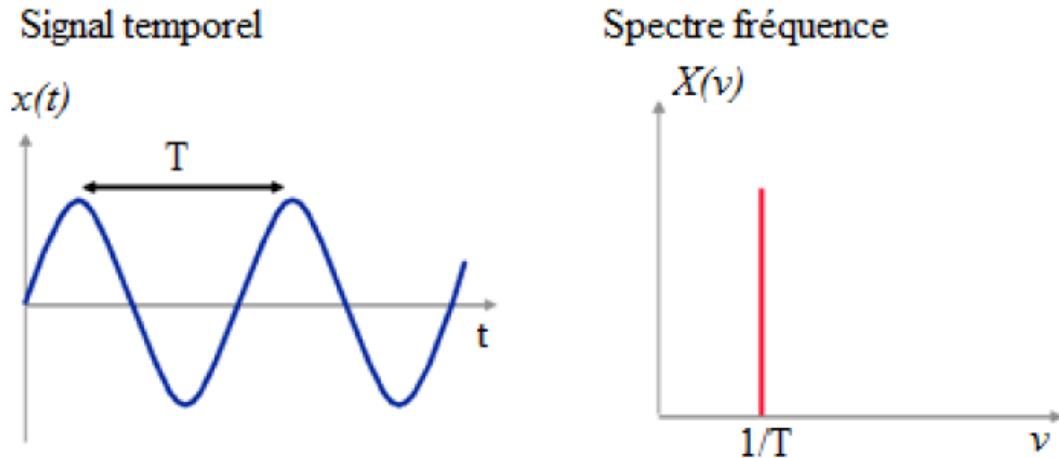


Fig. I.7. Transformation du signal dans le domaine temporelle au fréquentielle

I.6.3. Analyse cepstral

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier [21] :

$$C[s(t)] = \text{TF}^{-1} \log | \text{TF}[s(t)] |^2 \quad (\text{I.3})$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements. [17]

I.6.3.1. Notion de cepstre

Le cepstre d'énergie introduit par Bogert et al. en 1963 [22] fût d'abord utilisé pour la détection ou la suppression d'échos [23], [25] et pour résoudre certains problèmes de déconvolution [25], [26]. Dans le contexte du diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire (roulement à

billles, réducteur à engrenage, moteur thermique ou électrique etc...), le cepstre a été utilisé car la présence de défauts donne lieu, dans les signaux accélérométriques, à des motifs récurrents (échos) [7].

Le cepstre est en quelque sorte le spectre d'un spectre logarithmique et il permet de trouver les périodicités dans le spectre original [23]. Le cepstre est défini comme étant la Transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance :

$$c(\tau) = F^{-1}[\log_{10}(S(f))] \quad (I.4)$$

La variable τ , qui a la dimension d'un temps, est appelée fréquence. Une petite fréquence représente des espacements grands entre les fluctuations dans le spectre et une haute fréquence des espacements petits.

Le Cepstre permet de détecter des périodicités dans le domaine fréquentiel en général que les résultats de la modulation.

La technique du spectre des fréquences ne sera pas disposer d'informations si des changements provenant de la source ou le chemin de transmission.

Les Harmoniques et bandes latérales dans le cepstre représentent concentration de l'énergie d'excitation provoquée par la composante de rotation et qu'ils sont généralement utilisés pour détecter toute anomalie dans le fonctionnement.

L'avantages de l'utilisation du cepstre à l'identification des dommages de l'engrenage dans la situation des effets combinés des harmoniques et de bandes latérales dans le spectre apparaît dans le cepstre comme un petit nombre de pics clairs (harmoniques) définis, il est donc plus facile d'identifier les changements dans le système. Il est capable de détecter la présence et la croissance de bande latérale et d'extraire la périodicité du spectre.

I.7. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la maintenance par l'analyse vibratoire. Plusieurs outils peuvent être utilisés comme l'analyse d'huile, thermographie et l'analyse vibratoire pour assurer une maintenance conditionnelle efficace.

Cependant, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Cette méthode présente plusieurs avantages comme les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine.

Le chapitre qui suit sera consacré à l'étude générale d'un élément de transmission mécanique qui est le réducteur.

Chapitre II

Source de vibrations dans les engrenages

II.1. Introduction

II.2. Les sources de vibration dans les engrenages

II.3. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages

II.4. L'engrènement des dents

II.5. Techniques d'identification des défauts

II.6. Fréquences caractéristiques de défauts

II.7. Les défauts dans les engrenages

II.8. Conclusion

Chapitre II

Source de vibrations dans les engrenages

II .I. Introduction

L'engrenage dans une boite de vitesse génère des vibrations normalement, et le signal de vibration correspondant pourrait être utilisé comme caractéristique de référence lorsque le train est en bon état mécanique. Si des défauts se produisent à l'un des engrenages en cours de fonctionnement, la boîte de vitesses défectueuse entraînerait un préjudice grave. Les changements dans les signaux de vibration sont souvent une indication que l'un des engrenages est en mutation. Par conséquent, la surveillance de l'état du système de la boîte de vitesses lors de son fonctionnement est cruciale, car elle a pour but d'empêcher le disfonctionnement du système qui pourrait causer l'arrêt de celui-ci, voire même des dommages matériels ou humains. Jusqu'à maintenant la surveillance de l'état et l'identification de dommages des réducteurs industriels a reçu une grande attention par les chercheurs.

II.2. Les sources de vibration dans les engrenages

Dans le domaine fréquentiel, l'apport de l'utilisation de l'analyse spectrale et cepstral a été démontré dans plusieurs travaux. En effet, l'amplitude de la fréquence d'engrenement augmente progressivement avec l'augmentation de la taille de la fissure. En plus dans le cas d'un écaillage, des bandes latérales apparaissent autour de la fréquence d'engrenement et dont l'espacement correspond à la fréquence de rotation de la roue portant la dent défectueuse. Dans certains cas, ces bandes ne sont pas toujours visibles sur le spectre, et c'est la raison pour laquelle on utilise un autre outil de traitement de signal appelé cepstre, qui a la particularité de séparer les familles de raies permettant une détection claire du défaut. Les engrenages sont largement utilisés dans les machines à transmission de puissance d'un arbre à un autre ; Ils sont généralement liés à un changement de vitesse et de couple.

II.3. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages

On distingue principalement deux catégories de défauts [26,27]. Les défauts affectant toutes les dents, usure, piqûres, et ceux localisés sur des dents particulières, fissuration, écaillage. Les défauts localisés sur des dents particulières conduisent rapidement à la rupture de celles-ci, contrairement aux défauts tels que l'usure normale.

II.3.1. Défauts répartis sur toutes les dents

II.3.1.1. L'usure

L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives ou lorsque le lubrifiant est corrosif. Elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage, voire à sa mise hors service.



Fig. II.1.L'usure [26,27]

II.3.1.2. Les piqûres (Pitting)

Il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. Le pitting est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.



Fig. II.2.Les piqûres [26,27]

II .3.2.Défauts localisés sur certaines dents

II.3.2.1. L’Écaillage

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L’écaillage se trouve dans les engrenages cémentés, qui sont les plus répandus à l’heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles. Ce type d’engrenage ne présente pratiquement pas de phénomène d’usure, l’écaillage, qui est le principal défaut, évolue rapidement vers la rupture. La cause est connue : la pression superficielle est trop importante.

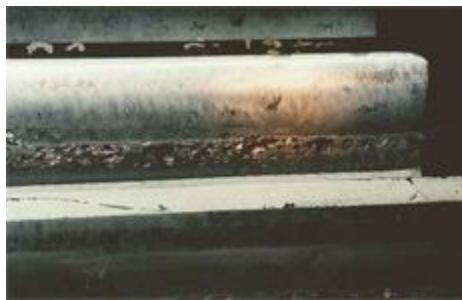


Fig. II.3.L ’écaillage [26,27]

II.3.2.2. Le grippage

Il est la conséquence directe de la destruction brutale du film d’huile, sous l’effet de la température résultant d’un frottement sous charge. Le grippage est favorisé essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact. La probabilité de grippage est influencée par l’état physico-chimique du lubrifiant et par les conditions de mise en service.



Fig. II.4. Le grippage [26,27]

II.3.2.3. La fissuration

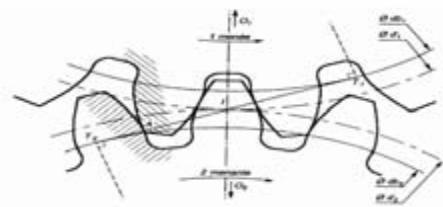
Elle progresse à chaque mise en charge, à partir d'un point initial situé presque toujours au pied de la dent. Elle apparaît surtout sur des aciers fins, durcis par traitement thermique, qui sont très sensibles aux concentrations de contraintes. L'apparition de ces fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau, et est en général située du côté de la dent sollicitée en traction.



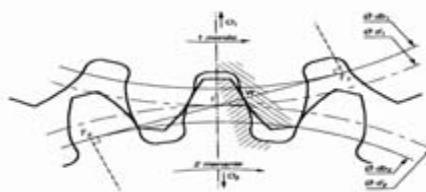
Fig. II.5. La fissuration [26,27]

II.4. L'engrènement des dents

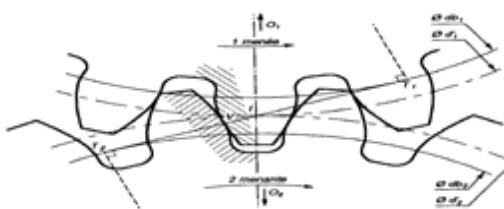
L'engrènement est principalement causé par les chocs entre les dents des roues qui composent le réducteur (Fig. II.6). L'importance du choc dépend des dents forme au cours de l'opération bien et la nature de défaut pendant le fonctionnement dégradé [28, 29].



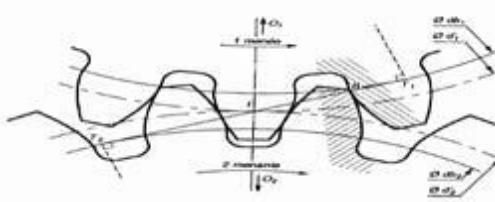
debut de dent engrenant



debut de contact unique



la fin de contact



La fin de l'engrenement

Fig. II.6. Évolution des dents engrenant [28, 29]

II.5. Techniques d'identification des défauts

La plupart des techniques modernes pour la détection des dommages des engrenages sont basées sur l'analyse de signaux vibratoires acquises à partir de la boîte de vitesses. L'objectif commun est

de détecter la présence d'un défaut, rarement le type de défaut à un stade précoce de développement et de suivre son évolution, afin d'estimer la durée résiduelle de la machine. Il est bien connu que les éléments les plus importants dans les spectres de vibration sont la fréquence d'engrènement et leurs harmoniques, ainsi que les bandes latérales de modulation. Les modulations d'amplitude sont présentes quand un engrenage entraîne un autre excentrique ou un engrenage monté sur un arbre tordu ou mal alignés.

S'il ya un défaut d'engrenage local, la vitesse angulaire pourrait changer en fonction de la rotation. À la suite de la variation de vitesse, des modulations de fréquence peuvent se produire. Dans de nombreux cas, l'amplitude et la modulation de fréquence sont présentes. L'augmentation dans le nombre et l'amplitude des bandes latérales. Depuis des fréquences de modulation résultent de défauts de certains composants de la machine y compris engrenage, roulement, et l'arbre, la détection du signal de modulation est utile pour détecter la faute du réducteur [30].

L'apparition de bandes latérales autour des harmoniques d'engrènement peut aussi être le résultat de l'usure des roulements accompagnés par le mouvement de l'arbre de transmission. Le diagnostic de vibration des Machines est basée sur le principe que la fonction "forçage" provoquant une machine à vibrer est trouvée en mesurant les fréquences de pics dominants en multiples de la vitesse de l'arbre. Néanmoins, des défauts de machines diverses, telles que le désalignement et le relâchement, générer des modèles similaires spectrales, et peut facilement être confondu par un analyse expérimenté le modèle spectral.

Ces types de modèles spectraux présenter une situation typique dans laquelle l'examen de la forme d'onde temporelle est souvent utile pour déterminer le problème spécifique réellement de la cause de vibration [31] de la machine. L'évaluation de forme d'onde de temps en corrélation avec le spectre peut souvent l'accent sur les problèmes dans les données recueillies, les amplitudes d'accélération élevées, sources d'impact répétitives, sources de basses fréquences et formes d'ondes anormales. Ces problèmes pourraient être présents dans les signaux de vibration recueillies, mais les anomalies dans la forme d'onde peut souvent être si évidente, qu'une enquête plus approfondie des données de vibration spectrales est ouverte à la suite de remarquer la forme d'onde temporelle anormale.

L'Analyse de cepstre a été largement appliquée à la surveillance d'engrenage. Le cepstre est bien adapté pour la détection des bandes latérales dans les spectres de vibration et pour l'estimation de

leur évolution au cours de la vie d'un engrenage. En outre, depuis le cepstre estime la distance moyenne sur une bande latérale large gamme de fréquences, il permet une mesure très précise de la périodicité latérale. Il est donc applicable à la fois à la détection et à la diagnostic des défauts des engrenages [30, 32 et 45]. L'étalement temporel synchrone est une technique de traitement de signal qui est utilisé pour extraire les signaux répétitifs de bruit additif [29].

II.6. Fréquences caractéristiques de défauts

Engrenages et roulements sont des organes de transmission d'efforts et de mouvement par contact physique entre pièces. Ce type de transmission émet naturellement bruit et vibrations. Ainsi les vibrations principales sont produites par les chocs d'entrée en contact des dents d'engrenages. La fréquence d'apparition de ce phénomène est la fréquence d'engrènement. Les types de défauts choisis sont des avaries liées à des enlèvements de matière se produisant par usure par frottement de glissement pour le défaut réparti d'engrenages et par transmission de charge par contact quasi ponctuel pour l'écaillage. Chaque fois qu'une avarie participe à un contact, elle modifie les caractéristiques vibratoires, sonores et cinématiques (erreur de transmission pour l'engrenage) du système. En analysant les mesures d'accélérations et d'erreur de transmission, nous allons identifier et quantifier ces modifications afin d'établir une relation entre les mesures, le type et la géométrie du défaut. Chaque défaut participe régulièrement à la transmission d'efforts et de mouvement. La fréquence d'apparition peut alors être connue à partir de la géométrie et de la cinématique du système. Dans un système de transmission de puissance à engrenages, il est possible de connaître la vitesse de rotation de chaque arbre ainsi que la géométrie des roulements et engrenages. L'écaillage situé sur une dent d'engrenage est sollicité à chaque tour d'arbre ; sa fréquence caractéristique est la fréquence de rotation de l'arbre sur lequel est montée la roue dentée. L'usure répartie sur l'ensemble de la denture de l'engrenage se manifeste en continu, à chaque mise en contact de profils conjugués. La fréquence de ce type d'avarie est la fréquence d'engrènement : le produit de la fréquence de rotation d'arbre par le nombre de dents de la roue solidaire de cet arbre.

II.7. Les défauts dans les engrenages

II.7.1. Définition

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages [Fig. II.7] [45]:



Fig. II.7. Différents types d'engrenage [45]

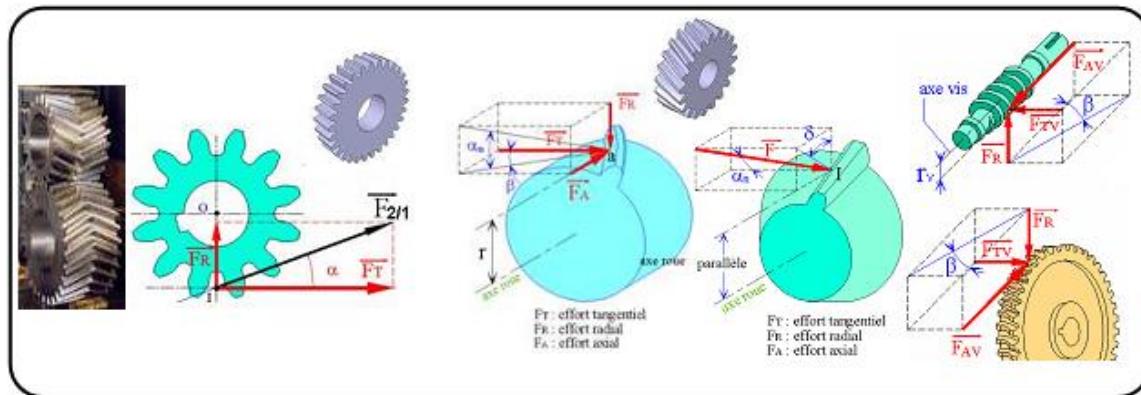


Fig. II.8. Effort sur les dents d'engrenage selon le type de denture [45]

- Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles)
- Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque).

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons Fig. II.8, illustre les efforts, d'engrenage selon le type de denture qui sont:

- Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons,
- Mixtes (radiaux et axiaux) sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin [45].

II.7.2. Fréquence d'engrènement

Observons un engrenage, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant Z_1 et Z_2 dents et tournant aux fréquences F_1 et F_2 . Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents [45].

$$F_e = F_1 \cdot Z_1 = F_2 \cdot Z_2 \quad (\text{II.I})$$

F_e : Fréquence d'engrènement

F_1 et F_2 : fréquences de rotations des roues 1 et 2

Z_1 et Z_2 : Nombre des dents des roues 1 et 2.

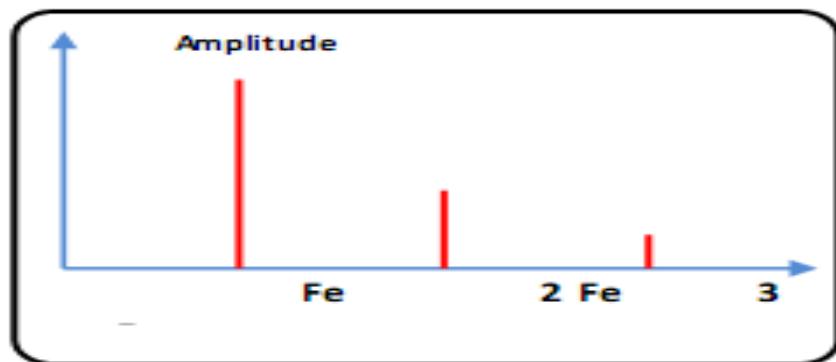


Fig. II.9. Image vibratoire d'un engrenage sain [45]

Si la denture est correcte, le spectre [Figure. II.9], est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques [45].

II.7.3. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

II.7.3.1. Détérioration d'une dent

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant Figure. II.10 montre un peigne de raies dont le pas correspond

à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences. La Fig. II.11, montre l'exemple d'un spectre réel de ce type de défaut [45].

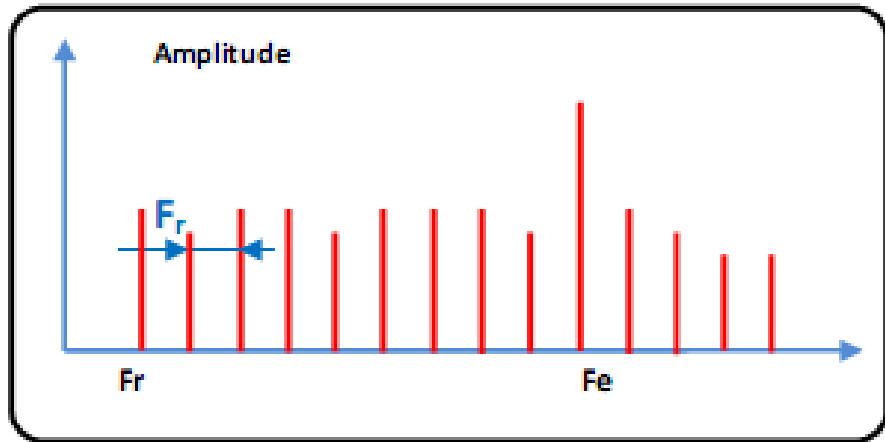


Fig. II.10. Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée [45]

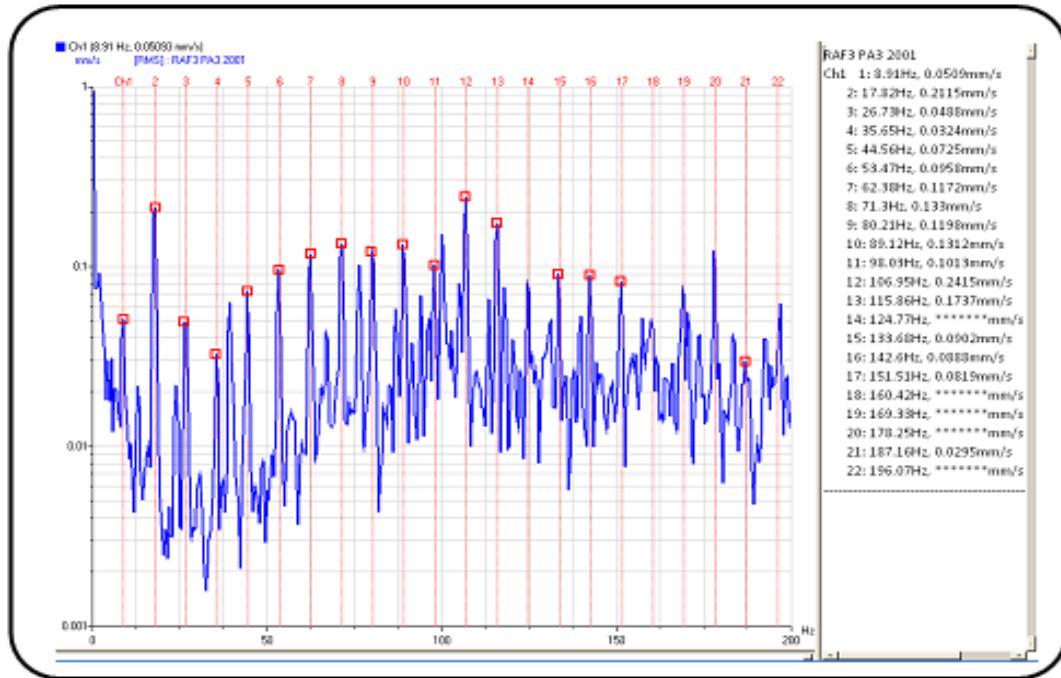


Fig. II.11. Spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage la fréquence de rotation du pignon est de 8.9HZ [45]

II.7.3.2. Détérioration de deux dents sur les deux roues

Si les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, les chocs peuvent être importants lorsque les deux défauts se rencontrent «coïncidence ». La rencontre s'effectue à la fréquence F_{co} , appelée fréquence de coïncidence donnée par l'expression suivante:

$$F_{co} = \frac{Fe}{PPCM(Z_1, Z_2)}$$

(II.2)

Avec **Fe** : fréquence d'engrènement

PPCM : plus petit commun multiple Z_1, Z_2

La fréquence de coïncidence F_{co} est inférieure aux fréquences de rotation F_1 et F_2 . Le spectre montre non seulement les deux peignes correspondant aux fréquences de rotation de chaque roue, mais aussi un peigne de raies de pas correspondant à la fréquence de coïncidence (F_{co}) [45].

II.7.3.3. Détérioration de l'ensemble de dentures

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée [Figure. II.12]. Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits [45].

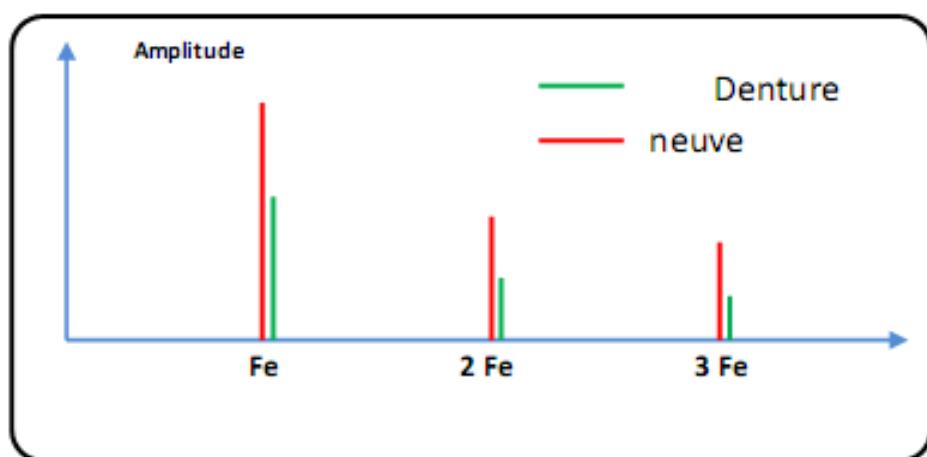
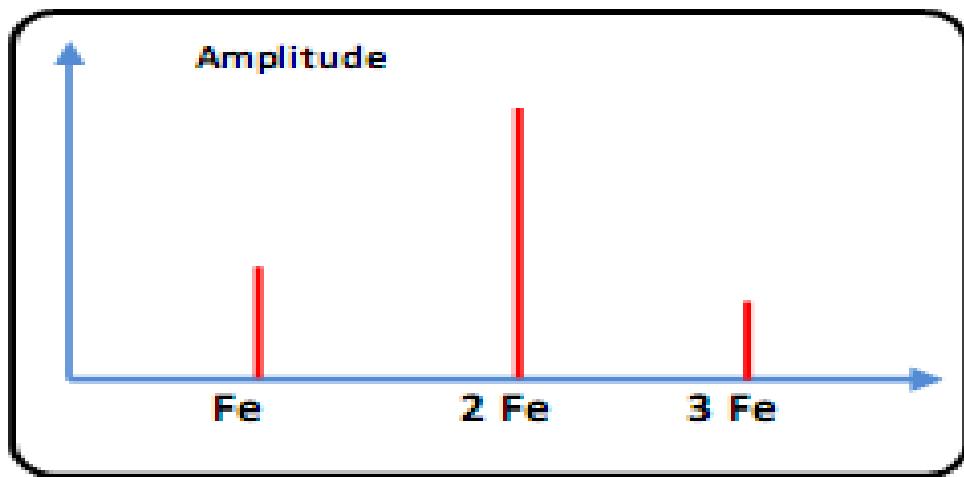


Fig. II.12. Image vibratoire théorique d'une denture [45]

II.7.3.4. Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrènement en fond de denture. La dent menant force à l'engagement et au dégagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture.

En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement Fe et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence [Fig. II.13] [45].



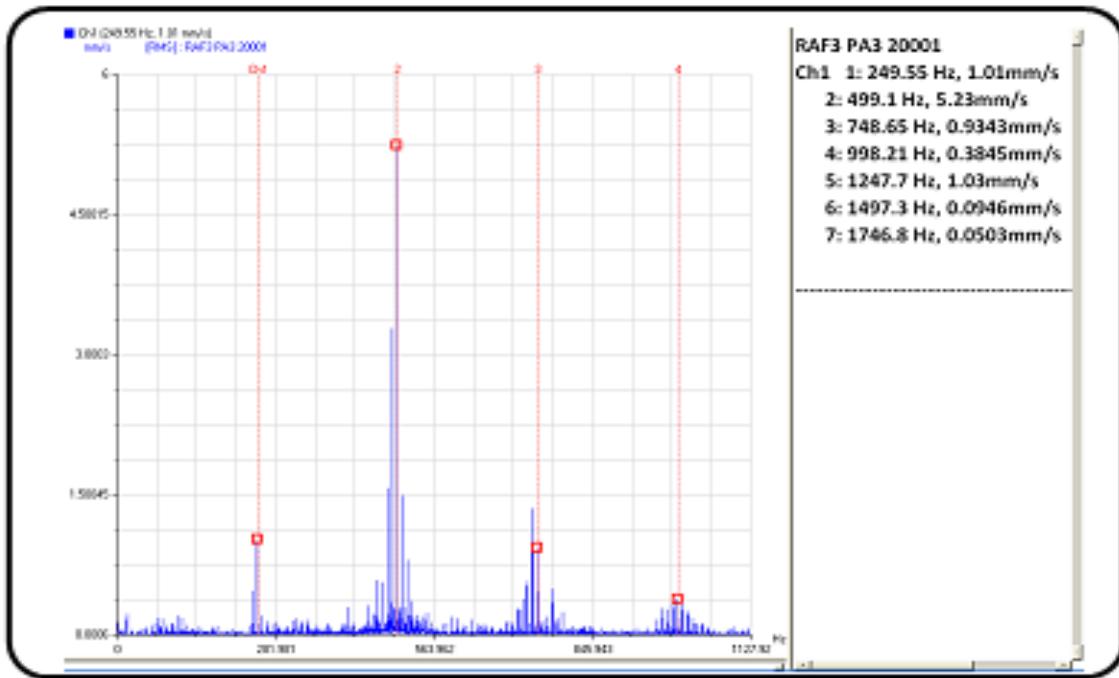


Fig. II.13. Image théorique et spectre réel d'un engrènement fond de denture sur un réducteur la fréquence d'engrènement est $Fe=249,48\text{Hz}$ [45]

L'identification de ce phénomène nécessite de s'assurer que les harmoniques d'ordre supérieur ne sont pas présentes à un niveau élevé [45].

II.7.3.5. Jeu de fond de denture trop grand

Un jeu de fond de denture trop grand a pour conséquence un choc dur à chaque Passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient alors un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveau du même ordre de grandeur) [Fig. II.14] [45].

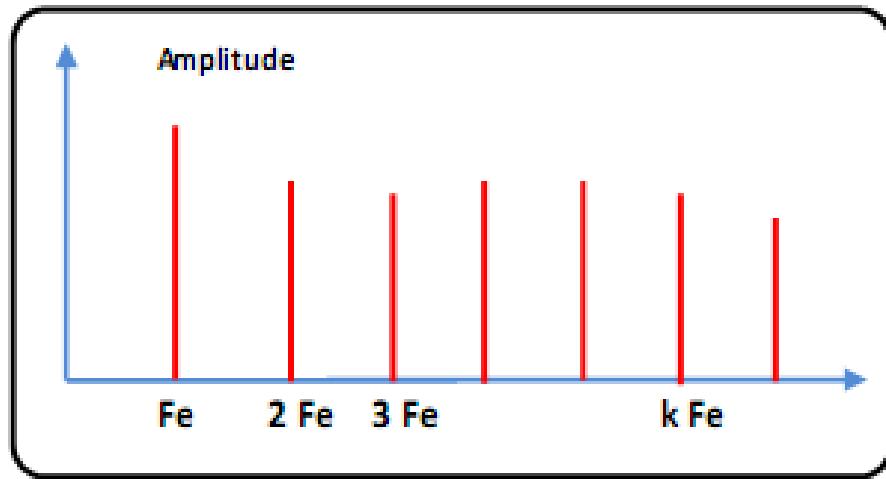


Fig.II.14. Image vibratoire theorique d'un engrenage presentant une dent deteriorée [45]

Ce jeu trop grand peut être :

- Une conséquence de l'usure de la surface de denture, le spectre est alors une "suite logique" de celui [Fig. II.14] ; (nombre et niveau des harmoniques élevées).
- Dû au montage, le spectre apparaît dès l'origine [45]

II.7.3.6. Défauts induisant une modulation d'amplitude

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal vibratoire par la fréquence de rotation due à la modélisation de l'effort d'engrènement Fig. II.15 [45].

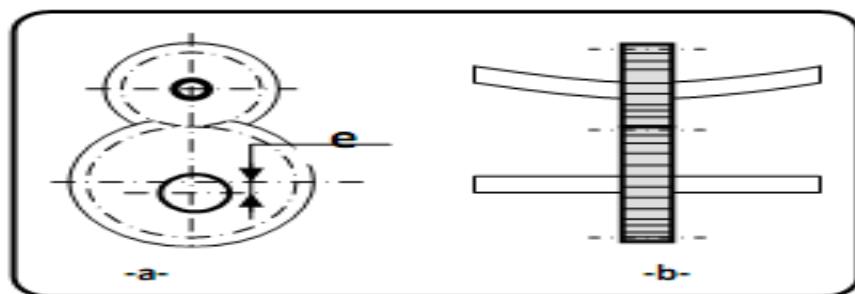


Fig. II.15. Exemple de défaut d'engrènement a) faut rond d'un pignon [45]

II.7.3.7. Déformation d'arbre

L'image vibratoire théorique [Fig. II.16], présente autour de la fréquence d'engrènement (fréquence porteuse) ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le pas correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut. C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Il faut noter que les amplitudes de ces bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence porteuse (entre 2 et 20 fois inférieures) et ne sont visibles que dans des spectres exprimés en décibel [45].

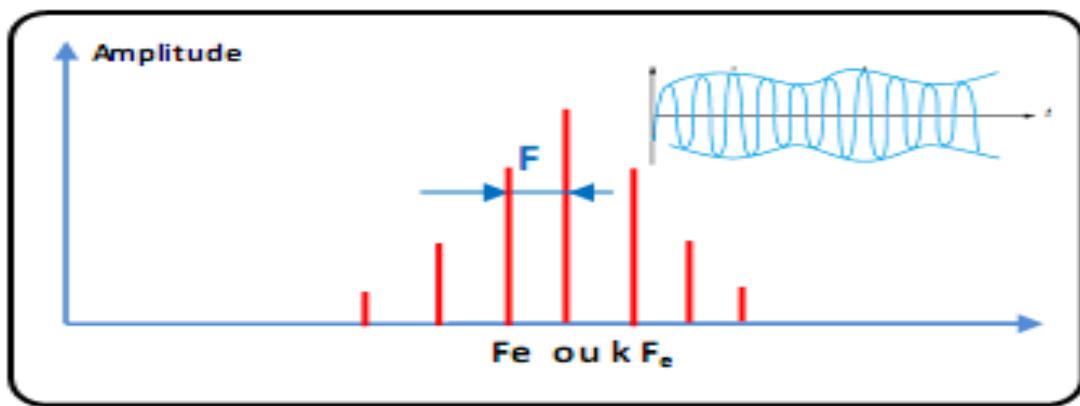


Fig. II.16. Image théorique de la modulation d'amplitude de F_e par F_r [45]

La Fig. II.17, montre le spectre d'un engrenage où l'engrènement ($F_e = 199,6$ Hz) est modulée par la fréquence de rotation de la roue tournante à 9 Hz [45].

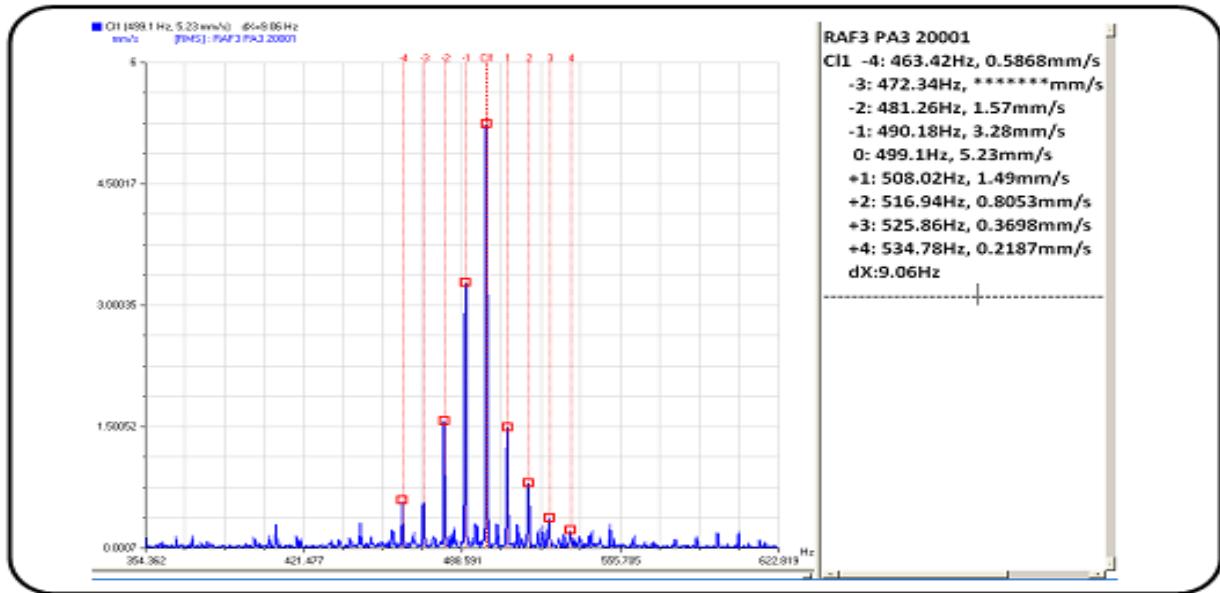


Fig. II.17. Spectre réel d'une modulation d'amplitude [45]

II.8. Conclusion

En tenant compte du mécanisme réducteur, les sources de vibration les plus importantes sont: les variations de temps dans la raideur de masse, causées par la variation du nombre de dents en contact, et la variation de la raideur des dents individuelles; effets dynamiques causés par la déviation de profil de la dent idéale. Dans la réalité, tous les engrenages contiennent des erreurs de fabrication des dents, comme des erreurs dues à la découpe de l'engrenage, l'écart dans l'angle d'engrènement, les écarts par rapport au profil en développante, la rugosité de surface des engrenages...etc.

En raison de ces mécanismes, l'amplitude de modulation du signal ou la fréquence de vibration peuvent être affectées, résultant dans des structures à bande latérale autour de la fréquence d'engrènement de l'engrenage et ses harmoniques. Le fait que l'amplitude du signal vibratoire varie en fonction de la charge moyenne implique que les mesures de vibration doivent être comparées à des études vibratoires de la même charge à la fois.

Dans le chapitre suivant on va expliquer la technique des ondelettes et on l'appliquera sur un banc expérimental.

Chapitre III

Application de l'analyse ondelette sur un banc d'essai

III.1. Introduction

III.2. Transformée en ondelettes

III.3. Types de la transformée en ondelette

III.4. Choix de l'ondelette et du nombre de niveaux de calcul pour la
décomposition

III.5. Étude expérimentale sur un banc d'essai

III.6. Résultat et discussion

III.7. Conclusion

Chapitre III

L'application de la technique d'ondelette au diagnostic des défauts dans un réducteur

III.1. Introduction

La plupart des signaux sont non stationnaires, ce qui empêche l'emploi de la méthode de la transformée de Fourier (FT) et la transformée de Fourier à court terme (TFCT) à cause de leurs limitations dans l'analyse de ce type de signaux. [47, 48]

Dans le présent chapitre, on va présenter une étude préliminaire sur les méthodes destinées à ce type de signaux. Elles sont les méthodes de transformée en l'ondelette (TO) ou (WT en anglais).

Dans la première partie, la méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur cette méthode, son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la manière de calcul de la transformation des signaux analysés. Ainsi que l'état de l'art de quelques travaux utilisant la méthode (TO) dans le domaine du diagnostic mécanique [47,48].

La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude expérimentale sur un banc d'essais composés d'un réducteur à plusieurs étages entraînés par un moteur asynchrone.

III.2 .Transformée en ondelettes

III.2.1. Historique des ondelettes

Les ondelettes ont vu le jour lorsque les chercheurs ont eu besoin d'une analyse en fréquence et en temps. Au XIXème siècle, l'analyse de Fourier était la seule technique permettant la décomposition d'un signal et sa reconstruction sans perte d'information. Malheureusement, elle fournit une analyse en fréquence mais ne permet pas la localisation temporelle de changements abrupts, comme par exemple l'apparition d'un deuxième choc après le premier choc [47,48].

Alfréd Haar définissait une fonction composée d'une courte impulsion négative suivie d'une courte impulsion positive, connue pour être la première ondelette (Ondelette de Haar). Dennis Gabor, inventa une transformation de fonction analogue à celle de Fourier, appliquée sur une

fenêtre temporelle exprimée par une fonction gaussienne [47,48]. Après, le terme d'ondelette a été introduit dans le langage mathématique par Jean Morlet et Alex Grossmann en 1984. Tandis, que Yves Meyer, rassembla toutes les découvertes précédentes, il en a dénombré 16, puis définit les ondelettes orthogonales [47,48]. Ensuite, Stéphane Mallat fit le lien entre les ondelettes et l'analyse multi résolution. Enfin, en 1987, Ingrid Daubechies mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies, facilement implémentables et utilisées dans le standard JPEG 2000 [47,48].

III.2.2. Définition d'une ondelette

Une ondelette est une fonction élémentaire et doit répondre à deux critères [34, 47,48] :

- 1- Elle se localise sur un petit intervalle de temps.
- 2- Elle doit être de moyenne nulle.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

(III.1)

La transformée en ondelettes d'un signal $s(t)$ est définie par la formule :

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt$$

(III.2)

La transformée en ondelettes d'un signal $S(t)$ est la famille $C(a, b)$ des coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b . Les paramètres (a, b) peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD) selon les besoins de l'analyse du signal $S(t)$.

Le coefficient d'ondelette $C(a, b)$ d'un signal $s(t)$ dépend de la forme de celui-ci au voisinage du temps b . Quand $S(t)$ est à peu près constant (1) Figure (III.1) autour d'un temps b Figure (III.1), le produit de $S(t)$ par l'ondelette ψ (d'aire nulle) a une aire très petite, autrement dit $C(a, b)$ est très petit.

Quant au contraire, le fragment du signal autour d'un temps b' est irrégulier (2) et que ses variations sont de « fréquence » comparable à celle de l'ondelette, l'aire du produit signal-ondelette (donc $C(a, b)$) est généralement beaucoup plus grand [35, 47,48].

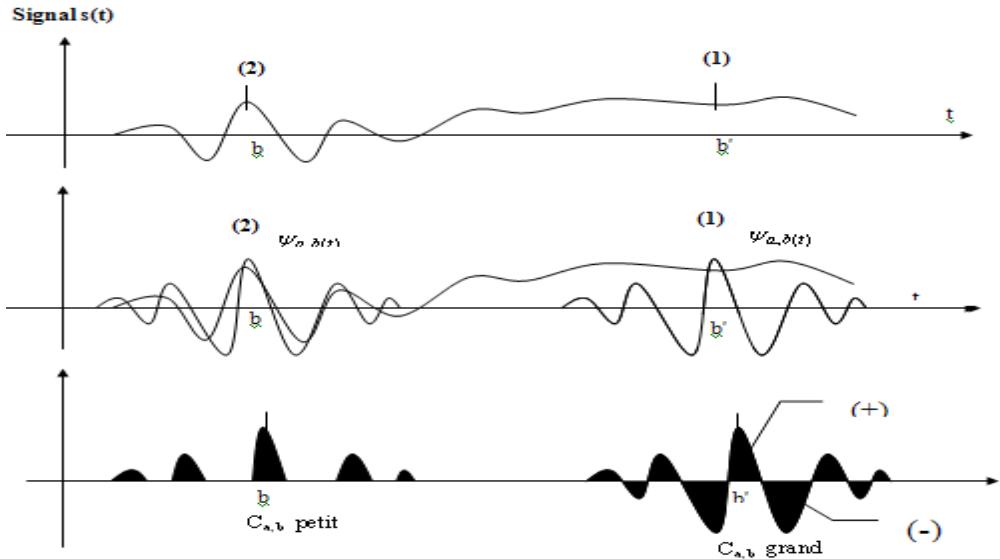


Fig. III.1. Projection de l'ondelette sur le signal [47,48]

III.2.3. Ondelettes et résolution temps-échelle

Si l'on souhaite analyser un signal non stationnaire, on peut produire sa représentation temps échelle en utilisant des vecteurs de facteurs d'échelle « a » et de décalage « b » très longs et varient selon un pas faible. La représentation obtenue contient alors beaucoup d'information redondante. Mis à part le problème du temps de calcul, cette redondance facilite souvent l'interprétation.

Plus le facteur de dilatation « a » est élevé, plus l'ondelette est étendue selon l'axe du temps, et plus elle est concentrée selon l'axe des fréquences. Par conséquent, la précision en temps et en fréquence est variable en fonction du facteur d'échelle [47,48].

Tableau.III.1. Variation de la précision, le temps et la fréquence en fonction du facteur d'échelle et de fréquence [47,48]

Facteur d'échelle	Fréquence	Précision en temps	Précision en fréquence
Faible	Haute	Elevée	Faible
Elevée	Basse	Faible	Elevée

En analysant avec la transformée de Fourier à court terme « TFCT », la taille de la fenêtre est toujours la même figure(III.2), elle ne dépend pas de la fréquence. Autrement dit, la précision en temps et en fréquence est identique pour les hautes et les basses fréquences [47,48].

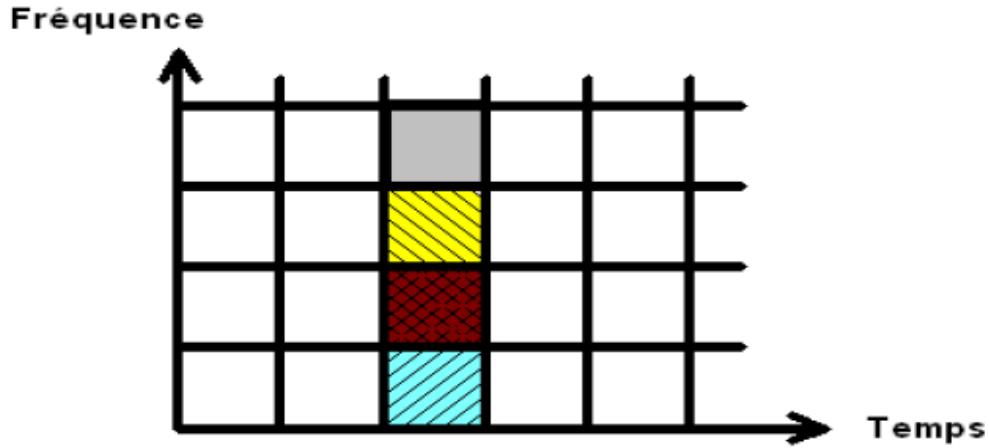


Fig. III.2. Résolution temps-fréquence de la TFCT [35, 47,48]

L'avantage de faire varier ces largeurs devient alors évident : on minimise le nombre de translations en temps et en fréquences de la fenêtre en optimisant la largeur de celle-ci. Ainsi, pour les basses fréquences, une grande largeur en fréquences n'est pas nécessaire; on peut donc utiliser des rectangles plus larges en temps. Tandis que pour hautes fréquences, on va utiliser des rectangles plus larges en fréquences et plus localisés en temps [47,48].

Chaque case correspond à une valeur de la TO dans le plan temps-fréquence.

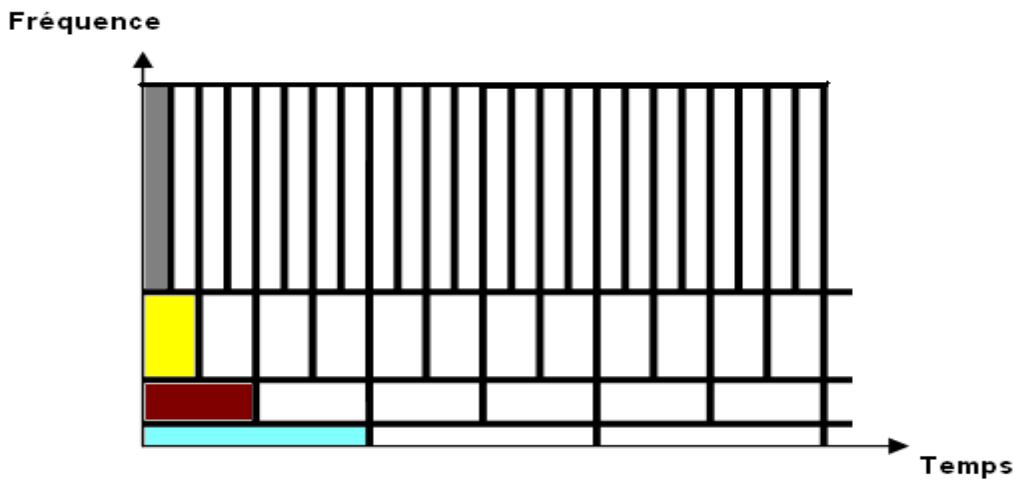


Fig. III.3. Résolution temps fréquence de TO [35, 47,48]

Les tailles des cases sont plus courtes, pour les basses fréquences, (ce qui correspond à de meilleures résolutions de fréquence, puisqu'il y a moins d'ambiguïté concernant la valeur exacte de la fréquence), mais leurs largeurs sont plus grandes (ce qui correspond à la résolution faible de temps, puisqu'il y a plus d'ambiguïté concernant la valeur exacte du temps) [47,48].

Pour des fréquences plus élevées la largeur des cases diminue, la résolution de temps est meilleure, et les tailles des cases augmentent, la résolution de fréquence devient plus faible. Donc, la résolution temporelle est donc plus importante pour les hautes fréquences que pour les basses fréquences. Inversement, la résolution fréquentielle est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences. Les ondelettes permettent de pallier donc à l'inconvénient de la TFCT en adaptant la précision en fonction de la fréquence. Une résolution simultanée est obtenue par la transformée en ondelettes dans laquelle la fenêtre d'analyse peut avoir des durées différentes.

III.2.4. La famille d'ondelettes

Plusieurs ondelettes mères sont utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Chacune d'entre elles a un domaine d'application défini de la forme du signal étudié. Le tableau [III.2] contient les familles les plus usuelles [36,47].

Tableau III.2. Les familles d'ondelette les plus usuelles [47,48]

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	db
Symlet	Sym
Coiflets	Coif
Ondelette biortogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	Dmey
Ondelette de Batte et lemarié	Btlm
Ondelette de gaussiennes	Gaus
Ondelette de mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl

Ondelette de gaussiennes complexes	Sgau
Ondelette de Shannon complexes	Shan
Ondelette de B-spline fréquentielles complexes	Fbsp
Ondelette de Morlet complexes	Cmor

III.2.4.1. Ondelette de Haar

Alfred Haar qui a mis des bases considérées aujourd’hui comme le fondement de la théorie des ondelettes. Haar a défini une fonction $h(t)$ qui correspond à l’ondelette de Haar [47,48] comme suit :

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 1 & \text{pour } \frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

(III.3)

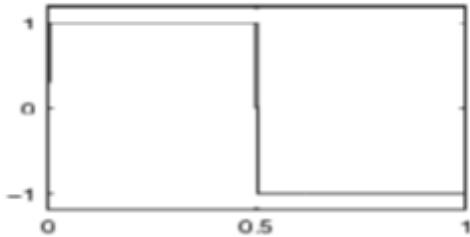


Fig. III.4. Forme de l’ondelette Haar [47,48]

III.2.4.2. Ondelettes de Daubechies

La figure (III.5) montre les formes des ondelettes Daubechies pour différents ordres. Cette famille d’ondelettes à un paramètre permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire. Pour N , c’est l’ordre de l’ondelette dbN [47,48].

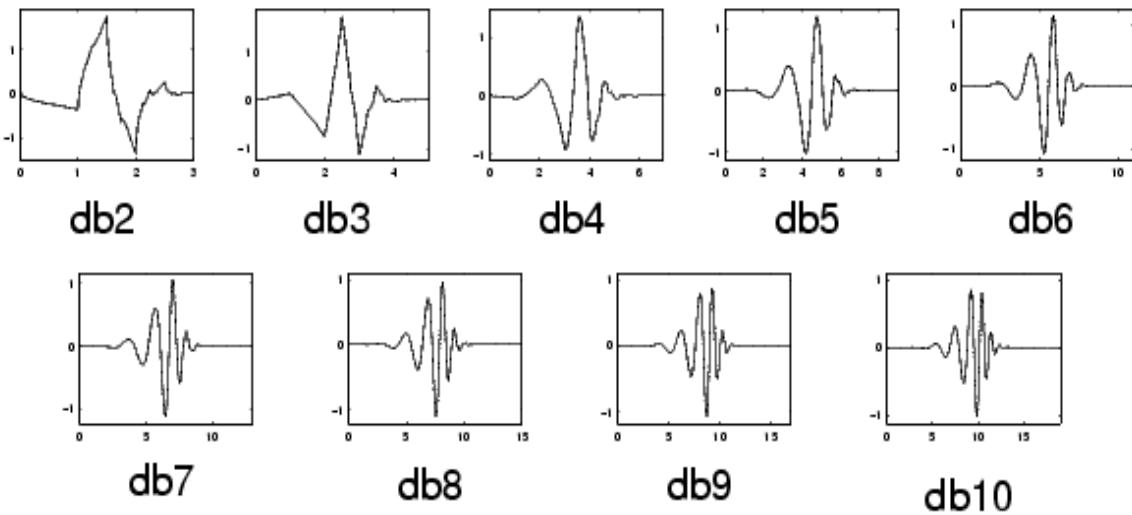


Fig. III.5. Forme des ondelettes Daubechies [47,48]

III.2.4.3 *Ondelette de Morlet*

Elle est définie par :

$$\psi(x) = C e^{-\frac{x^2}{2}} \cos(5x) \quad (\text{III.4})$$

Ou « C » est une constante de normalisation de reconstruction. La Fig. (III.6) montre la forme de cette ondelette [47,48].

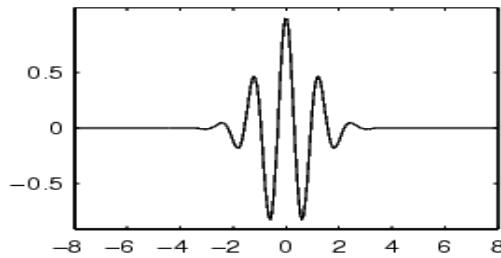


Fig. III.6. Ondelette de Morlet [47,48].

III.2.4.4. *Ondelette chapeau mexicain*

Ce type présente la fonction qui est proportionnelle à la dérivée seconde de la fonction de densité de probabilité gaussienne comme l'indique la Fig. (III.7).

$$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-\frac{1}{4}}\right)(1-x^2)e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{III.5})$$

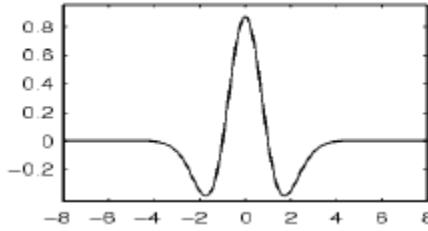


Fig. III.7. Ondelette chapeau mexicain [47].

III.2.4.5. Ondelettes de Meyer

Elle a été construite par Y.Meyer, c'est une ondelette orthogonale qui n'a pas un support compact [47,48]. La forme de cette ondelette est donnée par la Fig. (III.8):

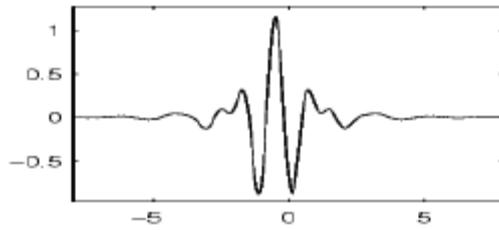


Fig. III.8. Ondelettes de Meyer [47,48]

La fonction psi est définie dans le domaine fréquentiel, sachant que :

$$\psi(\omega) = \begin{cases} (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{i\omega}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu \left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right) & \text{si } \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{i\omega}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu \left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right) & \text{si } \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & \text{si } |\omega| \notin [\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

III.3. Types de la transformée en ondelette

On construit par translation et dilatation une famille de fonctions $\psi_{a,b}(t)$; à partir de l'ondelette mère $\psi(t)$. L'utilité de l'ondelette est de faire varier les largeurs en temps et en fréquences d'une fonction tout en la translatant le long du signal comme dans la transformée de Fourier fenêtrée.

Ces fonctions de $\psi_{a,b}(t)$ sont données par la relation (III.3) [47,48].

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.7})$$

Le paramètre (b) de l'ondelette représente sa translation sur l'axe du temps, par contre le paramètre (a) donne le contrôle de la fréquence de l'ondelette, sachant que, $a = 1/f$, « f » étant la fréquence [47,48].

Si $a < 1$, l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ devient très concentrée par rapport à l'ondelette mère $\psi(t)$ et son contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.

Si $a > 1$, l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ est très large, et le contenu fréquentiel penchera vers les basses fréquences du plan d'analyse [47,48].

Il existe plusieurs types de transformée en ondelette ; les principaux sont :

III.3.1. La transformée en ondelette continue (TOC)

La transformée en ondelette continue est une fonction de deux paramètres « a » pour les paramètres d'échelle, et « b » pour les paramètres de translation.

Elle est semblable à la transformée de Fourier à courte terme (TFCT), seulement la fenêtre glissante utilisée pour l'analyse est variable en fonction du temps [47,48].

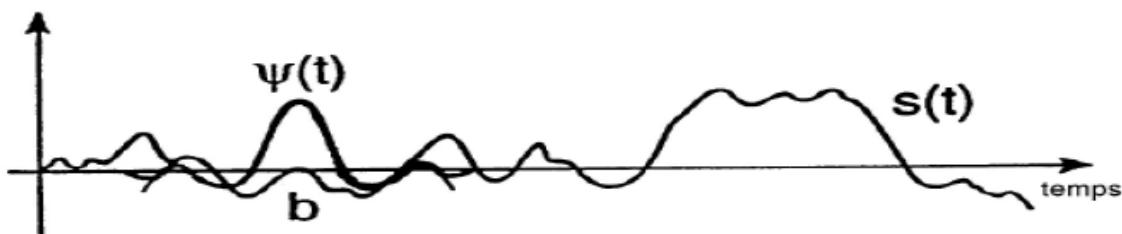


Fig. III.9. Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer « TOC » [47,48]

La transformée en ondelette continue d'une fonction $x(t)$ $\text{HL}2(\mathbb{R})$ est définie dans le domaine temporel par le produit scalaire suivant [47,48].

$$X_{TO}(a,b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle \quad (\text{III.8})$$

Alors,

$$XTO(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \psi^*(\frac{t-b}{a}) d(t) \quad (III.9)$$

En effectuant le changement de variable $t_1 = t/a$ on aura :

$$XTO(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} X(at_1) \psi^*(t_1 - \frac{b}{a}) dt_1 \quad (III.10)$$

Avec,

b : est le paramètre de localisation temporelle.

a : est le paramètre de localisation fréquentielle.

\sqrt{a} : permet d'assurer la même énergie pour l'ondelette dilatée.

III.3.2. La transformée en ondelette discrète (TOD)

La TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue. Dans ce cas les paramètres a et b deviennent [38,47,48]:

$$a = a_0^m \quad \text{et} \quad b = nb_0 a_0^m \quad n, m \in \mathbf{Z}$$

Avec,

a_0 : est un paramètre de dilatation.

b_0 : est un paramètre de translation.

On appelle transformée en ondelette discrète toute base d'ondelette travaillant avec un facteur d'échelle $a = 2^n$. [47,48].

III.3.3. La transformée en paquet d'ondelettes

L'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes est leur représentation dans la figure (III.10).

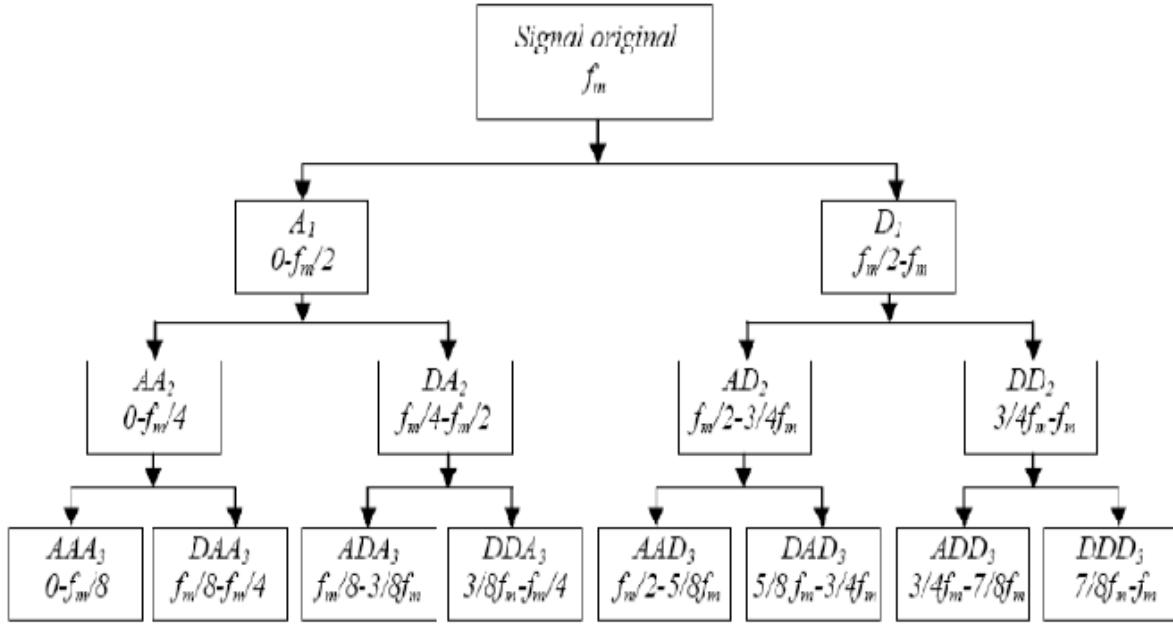


Fig. III.10. Transformée en paquet d'ondelette [47,48]

Dans l'analyse en paquets d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de $(2n+1)$ de différentes décompositions du signal.

La méthode de paquets d'ondelettes est une généralisation de la décomposition en ondelettes qui offre une gamme plus riche de possibilités pour l'analyse du signal. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de « n »niveau, il y a $(n+1)$ manières possibles de décomposition ou coder le signal [47,48].

III.4. Choix de l'ondelette et du nombre de niveaux de calcul pour la décomposition

Pour chacune des approches de diagnostic basées sur la décomposition en ondelettes, le nombre de niveau doit être choisi judicieusement afin de permettre aux signaux à niveau élevé (approximation et détails) de couvrir toute la gamme des fréquences le long desquelles le composant dû aux défauts change pendant tous les régimes de fonctionnement. À partir de la condition (III.11), on peut calculer le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation de sorte que la limite supérieure de sa bande de fréquence associée soit sous ou au voisinage de la fréquence fondamentale [47,48]:

$$2^{-(n_{ls}+1)}f_s < f \quad (\text{III.11})$$

En effet, le niveau de décomposition du signal d'approximation qui inclut les harmoniques autour du fondamental, est le nombre entier (n_{ls}) exprimé par l'équation (III.12) :

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{f_s}{f}\right)}{\log(2)}\right) \quad (\text{III.12})$$

Avec «int» pour les entiers, f_s : fréquence d'échantillonnage, f : fréquence principale.

Donc pour une fréquence d'échantillonnage de 20KHz, et pour la fréquence de rotation de 16.67 Hz, en appliquant l'équation (III.12), le nombre de décomposition recommandé est :

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{\log\left(2 * \frac{10^4}{16.67}\right)}{\log(2)}\right) = 10$$

(III.13)

Le choix de l'ondelette (type et ordre) adaptée à l'analyse des signaux comme ceux des engrenages et des roulements n'est pas une chose aisée pour atteindre l'objectif escompté. Dans le souci de répondre au choix délicat du type d'ondelette et de son ordre, et afin de mettre plus en relief l'analyse de ces types de signaux en fonction de l'importance de leurs souffles surajoutés, Le nombre approprié de niveaux de la décomposition (n_{ls}) dépend de la fréquence d'échantillonnage (f_s) du signal à analyser [47,48].

III.5. Etude expérimentale sur un banc d'essai

Le dispositif expérimental est constitué d'un moteur à deux pôles à induction triphasé relié à une boîte de vitesses 4 étages. L'arbre de sortie du réducteur est relié à un générateur de courant continu à excitation séparée par un joint homocinétique. L'induit de la génératrice à courant continu est connecté à une charge à résistance variable 5.625kW. En faisant varier la résistance de charge à l'aide d'interrupteurs électriques. La boîte de transmission à quatre vitesses est illustrée dans la Fig. III.11 [40,41].

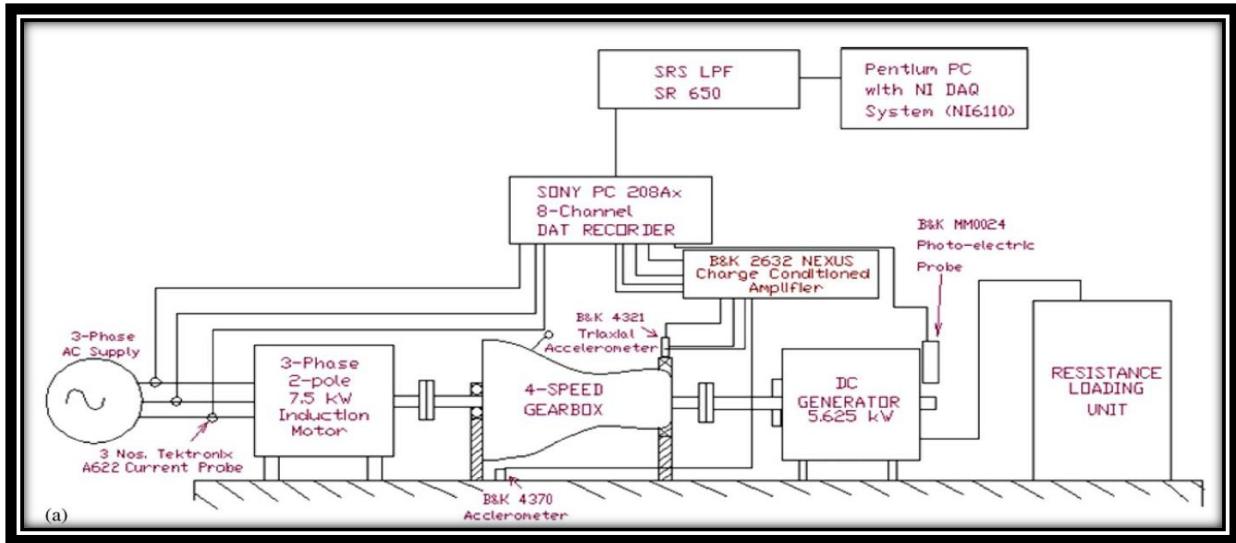


Fig. III.11. Schéma du banc d'essai [41]

La spécification particulière de la boîte de transmission est indiquée dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Les paramètres du réducteur

première étage	deuxième étage	troisième étage	
Nombre des dents	19/31	24/26	
Vitesse de rotation	2946 rpm (entré) 49.1 Hz	1806 rpm (milieu) 30.1 Hz	1302 rpm (Sortie) 21.7 Hz
Fréquence	933 Hz	782 Hz	632 Hz

La vitesse d'entrée de boîte de vitesses mécanique est la vitesse de moteur à induction (fréquence f_1). La vitesse de l'arbre intermédiaire (f_2). Le schéma unifilaire de l'engrènement est montré dans la Fig.III.12 [41].

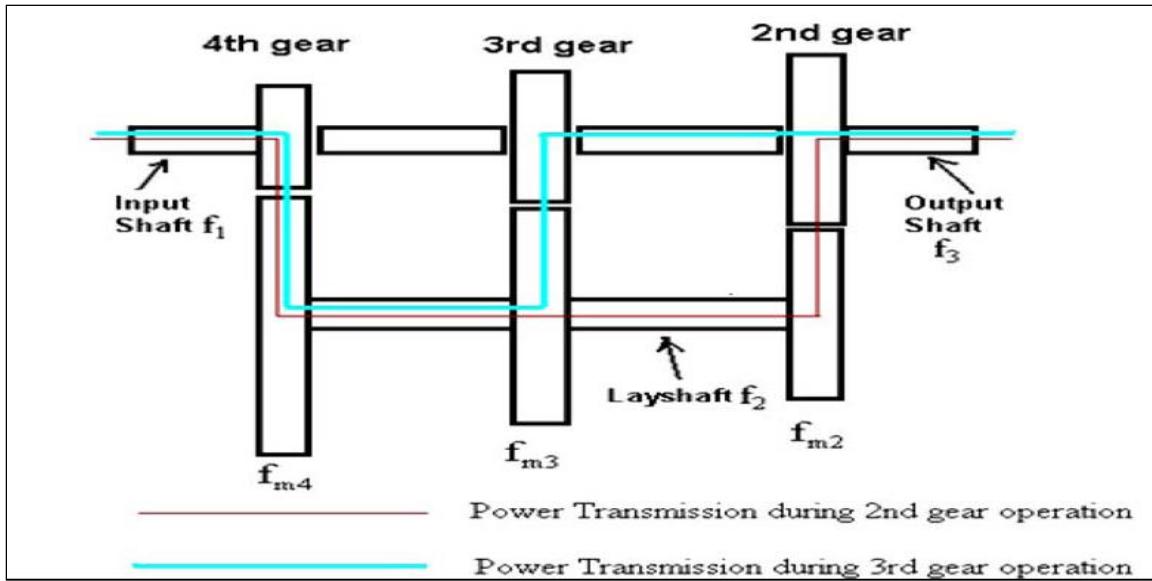


Fig.III.12. Le schéma unifilaire de l'engrènement [41]

Où f_{m2} ; f_{m3} et f_{m4} sont les fréquences d'engrènement des fréquences correspondant à la 2^{ème} vitesse, 3^{ème} et 4^{ème} vitesse, respectivement. L'arbre de sortie est de fréquence (f_3) (Fig.III.13).

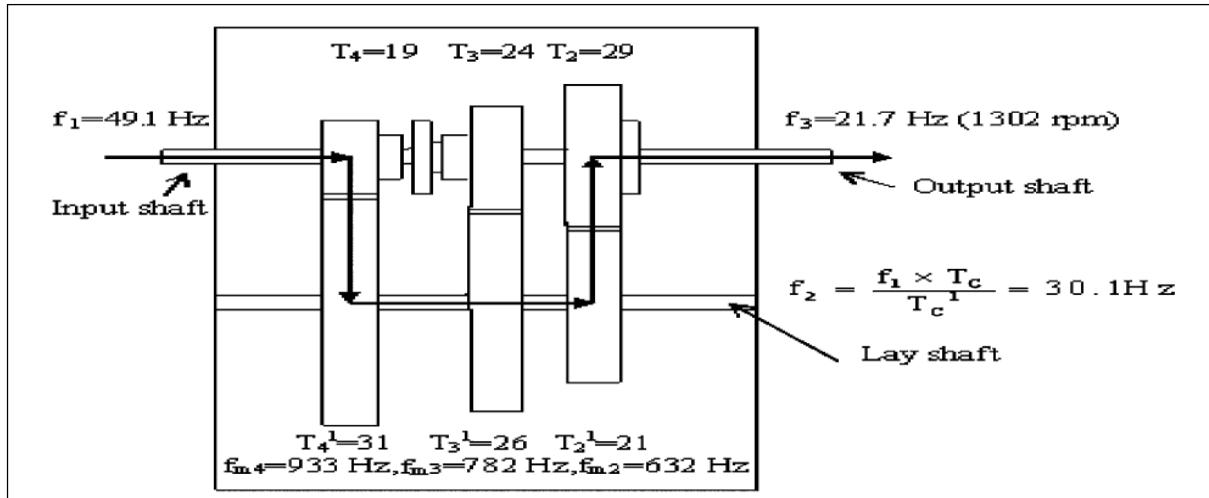


Fig.III.13. Démonstration de différentes fréquences de rotation correspond à chaque arbre [41]

III.6. Résultats et discussions

III.6.1. L'analyse spectrale (FFT)

Nous avons examiné le spectre relatif au défaut de cassure d'une dent de pignon.

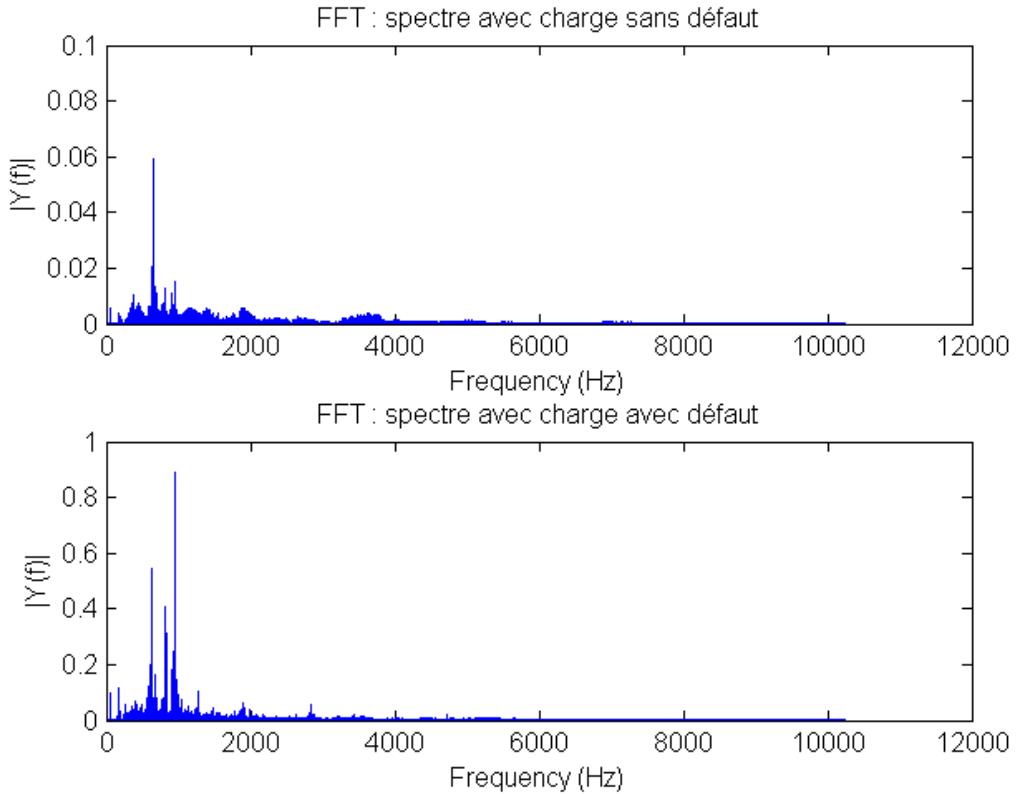


Fig. III.14. Comparaison des deux spectres du singal à engrenage (sans défaut et avec défaut)

La Fig. III.14. a) montre l'allure du spectre ou la FFT du signal de vibration sans défaut d'une boite de vitesse expérimentale, cette figure nous montre un pic de 945 Hz qui correspond à la fréquence d'engrènement de l'ensemble pignon/roue de 19 /31 dents.

La Fig. III. 14. b) représente l'allure de spectre du même signal vibratoire de boite de vitesse comportant un défaut de cassure de dent sur la roue de 19 dent. Il apparait une augmentation dans l'amplitude de la raie de fréquence de l'engrènement à 945 Hz. Ainsi que l'augmentation de l'amplitude de la raie de fréquence de rotation de pignon qui porte la dent cassé de fréquence de rotation de 50 Hz.

III.6.2. L'analyse cepstral

L'analyse cepstral du signal avec et sans défaut nous a permis d'obtenir les cepstres présentés dans les Fig. III.15 et Fig. III.16.

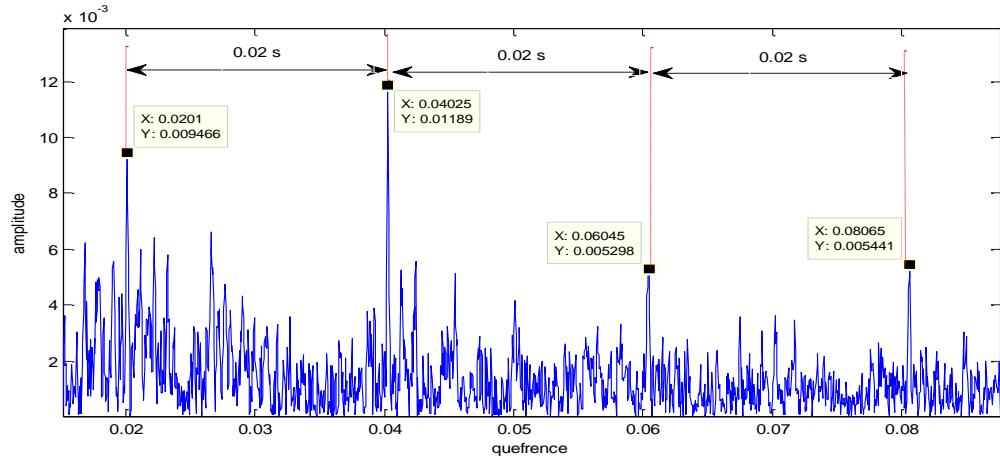


Fig. III.15. Cepstres du singal avec défaut

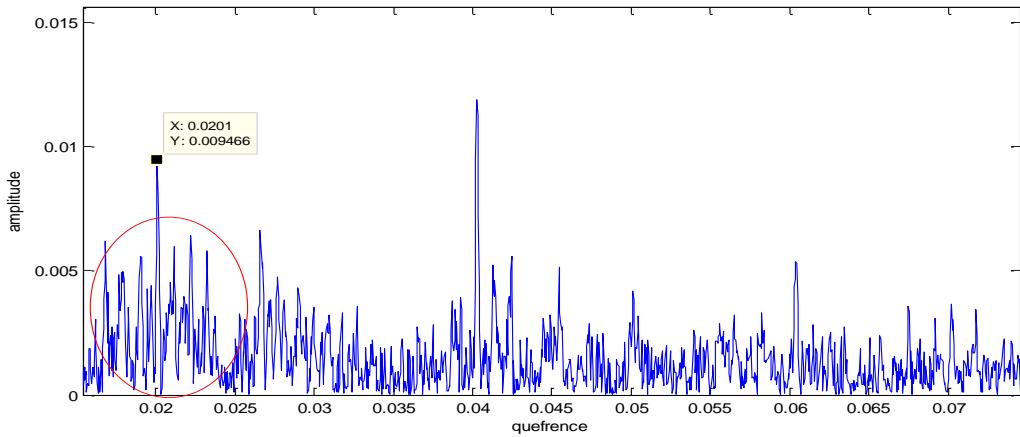


Fig. III.16. Bande latérale autour de quéfrence de rotation du pignon dans cepstre du signal avec défaut

On observe la présence d'un pic à 923 Hz qui correspond à la valeur de la fréquence d'engrènement de l'ensemble pignon/roue de 19 /31 dents, dans le premier étage, le première harmonique est aussi présent à l'amplitude 0,009. Avec ces seules informations, la présence du défaut est détectée dans le premier étage.

III.6.3. Analyse d'ondelette

En général, les dysfonctionnements sur les machines soit des paliers roulements, soit des engrenages, les défauts se manifestent souvent par des chocs. Il ressort que pour un système

constitué de plusieurs organes mécaniques, les méthodes classiques d'analyse vibratoire montrent leurs limites. Ceci s'explique par l'existence d'éléments pouvant se coupler dans le spectre. Il est alors difficile de distinguer les apparitions et les évolutions des différentes composantes fréquentielles suite à des défauts. Il s'est avéré que celle basée sur la transformation en ondelettes possède encore les meilleurs atouts. Il est confirmé qu'elle se prête bien à l'analyse de signaux comportant des singularités telles que des impulsions périodiques.

III.6.3.1.Cas du signal sans défaut

Pour le signal sans défaut les résultats suivant sont obtenus :

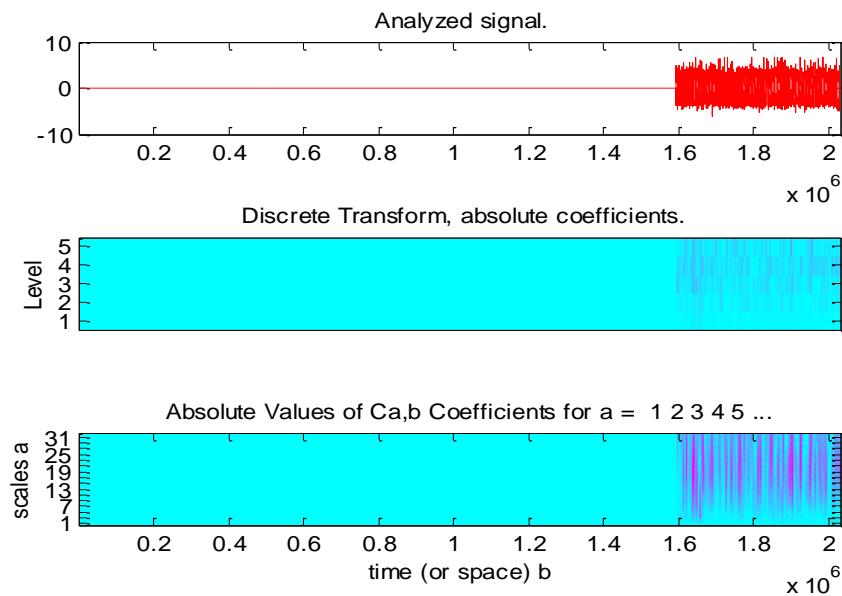


Fig. III.17.a. La forme ondelette du signal sans défaut

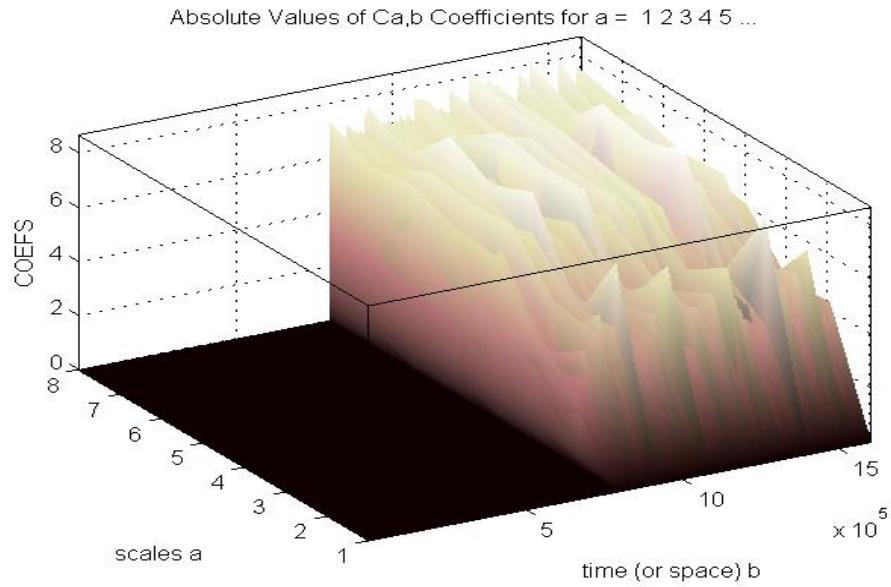


Fig.III.17.b. Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW sans défaut

Dans les Fig. (III.17. a, b) on a présenté le signal d'un engrenage avec charge et sans défaut ; dans les courbes de figure(III.17.a) le traitement du signal dans le domaine temporel ne montre pas des anomalies sur le signal ainsi que la transformé discret d'ondelette a 5 niveau montre que les résultats sont bonne. La Fig. III.17. b) montre une portion de l'espace {temps - fréquence-coefficients}.

III.6.3.2. Cas du signal avec défaut

Pour le signal sans défaut les résultats suivant sont obtenus :

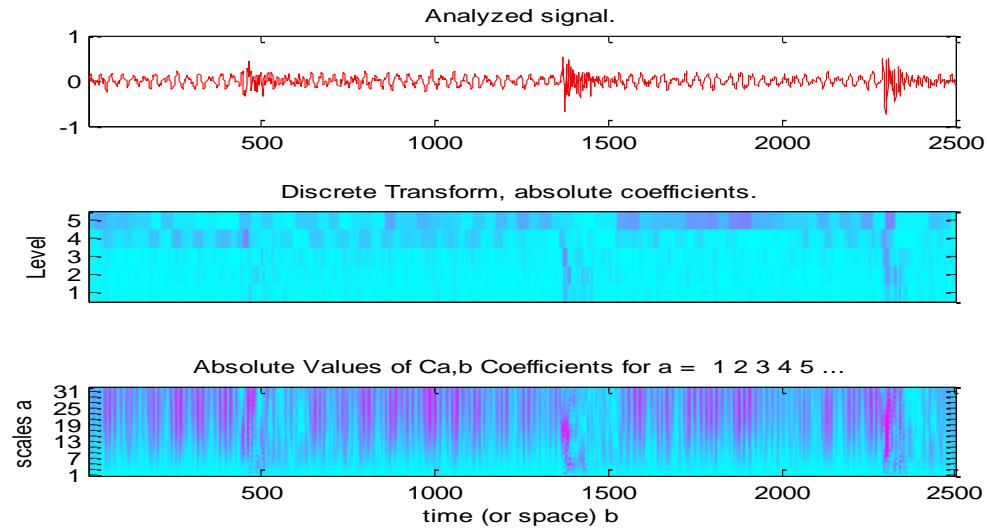


Fig. III.18.a. Forme d'ondelette du signal avec défaut

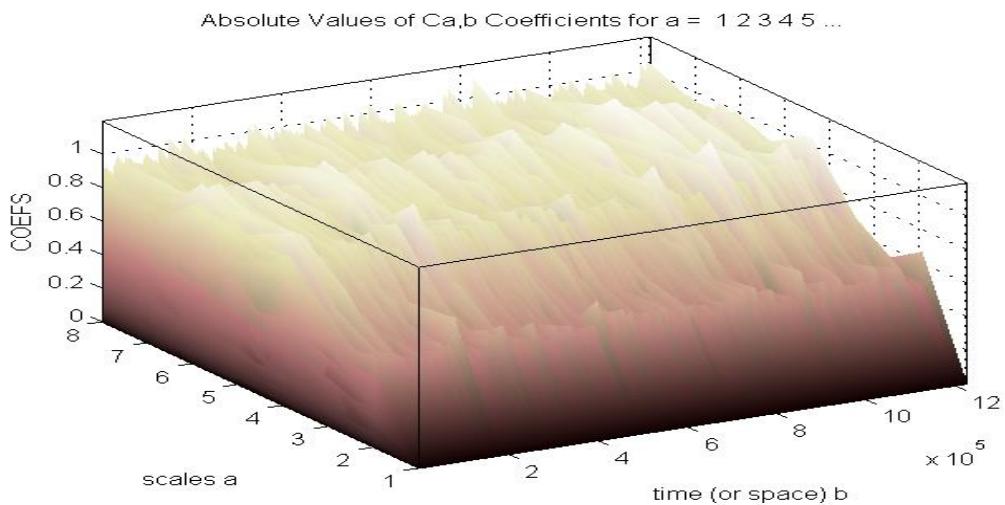


Fig. III.18.b. Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW et un défaut de cassure de dent

Dans le cas des dents défectueuses qui viennent en prise une fois l'évolution est clairement visible sur le graphique en ondelettes avec l'intensité de taches brillantes dans tracé 2D se répètent à chaque tour. Toutefois, l'analyse par ondelettes est supérieure parce qu'elle peut capturer le temps caractéristiques liés à une signature qui peut être utilisé pour la dent identité spécifique défectueux dans un engrenage.

Dans la Fig. III.18.b. Nous avons représenté une portion de l'espace {temps - fréquence-coefficients}. Nous pouvons voir assez clairement les crêtes de couleur très clair (presque blanc) dans ce domaine : soit un choc se répète qui correspond à la fréquence de 933 Hz est y la fréquence d'engrènement de l'ensemble roue pignon (31/19).

III.7. Conclusion

En maintenance préventive, la détection précoce d'un défaut constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques d'analyse vibratoire des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. L'application est réalisée dans le cas du diagnostic des réducteurs, après un bref rappel des théories de la transformée discontinue en ondelettes, les caractéristiques du dispositif expérimental sont présentées; notamment les fréquences de défauts. Chaque technique est appliquée et les résultats sont discutés en termes d'efficacité et de précision. A travers tous les résultats, il ressort que pour un système constitué de plusieurs organes mécaniques; les méthodes classiques d'analyse vibratoire ont montré leurs limites. Ceci s'explique par l'existence d'éléments pouvant se coupler dans le spectre. Il est alors difficile de distinguer les apparitions et les évolutions des différentes composantes fréquentielles suite à des défauts. Il ressort que parmi tous; la transformée discontinue en ondelette présente des avantages dans ce contexte. Parce qu'elle se prête bien à l'analyse de signaux comportant des singularités telles que des impulsions périodiques.

Chapitre IV

Étude comparative de diagnostic sur un réducteur d'un hélicoptère

IV.1. Introduction

IV.2. Résultats et discussions

IV.3. Diagnostic par moyennage synchrone

IV.4. Identification des harmoniques redondant

IV.5. Conclusion

Chapitre IV

Étude comparative de diagnostic du réducteur d'un hélicoptère

IV.I. Introduction

La surveillance des hélicoptères est un problème crucial en termes de sécurité. En effet un défaut non détecté à temps peut s'aggraver et se propager et conduire à des dommages matériels importants, voire des pertes en vies humaines. C'est pour cela que d'importants moyens sont déployés pour la détection précoce des défauts des hélicoptères. La maintenance peut être réalisée d'une manière périodique, mais cette dernière a montré ses limites puisque certains défauts peuvent apparaître de manière aléatoire. On a alors recours aux méthodes de surveillance conditionnelle basées sur différents tests réalisés de manière régulière. L'analyse de signaux vibratoires issus d'accéléromètres est l'une des méthodes les plus adaptées à ces tests.

L'objectif de cette étude est d'implémenter des méthodes de diagnostic de pannes, basées sur l'analyse vibratoire pour la surveillance boîtes de vitesse des hélicoptères illustrée sur la Figure IV.I. Nous allons donc mettre en œuvre une de ces méthodes fréquentielles basées sur la transformée de Fourier discrète pour la surveillance des hélicoptères. Aussi, l'amplitude de la fréquence d'engrènement augmente progressivement avec l'augmentation de la taille de la fissure. En plus dans le cas d'un écaillage, des bandes latérales apparaissent autour de la fréquence d'engrènement et dont l'espacement correspond à la fréquence de rotation de la roue portant la dent défectueuse.

Dans certains cas, ces bandes ne sont pas toujours visibles sur le spectre, la raison pour laquelle on utilise un autre outil de traitement de signal appelé cepstre qui a la particularité de séparer les familles de raies permettant une détection claire du défaut. Dans le cas des défauts mixtes le spectre montre non seulement les deux peignes de raies correspondant aux fréquences de rotation de chaque arbre, mais aussi un peigne correspondant à une fréquence très basse nommée fréquence de coïncidence (F_{co}), qui peut traduire le choc des deux dents défectueuses entre elles (roue/pignon) [18].

Ce travail a pour but de localiser les défauts sur la partie mécanique de l'hélicoptère, en l'occurrence les engrenages, et ce à l'aide de leurs signatures fréquentielles. Afin de tester ces méthodes, sous MATLAB, des données enregistrées en vols ont été mises à notre disposition.

Nous visualisons et comparons par la suite les différents signaux avec et sans défauts, et à travers une étude concrète de ceux-ci, nous emploierons des méthodes adéquates pour visualiser le défaut d'une façon clair pour pouvoir le reconnaître rapidement et le corriger par la suite.

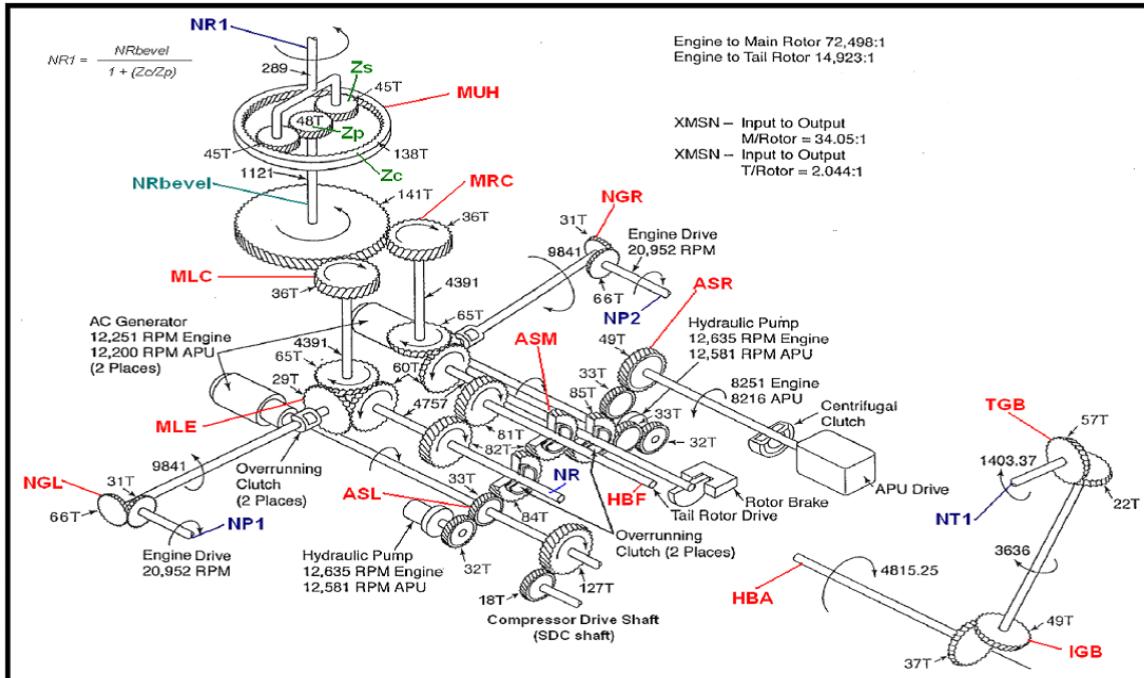


Fig.VI.1. Boite de vitesse d'un hélicoptère

IV.2. Résultats et discussions

Les caractéristiques du système sont les suivants :

POUR LE SYSTEME NGR (right noise gear)

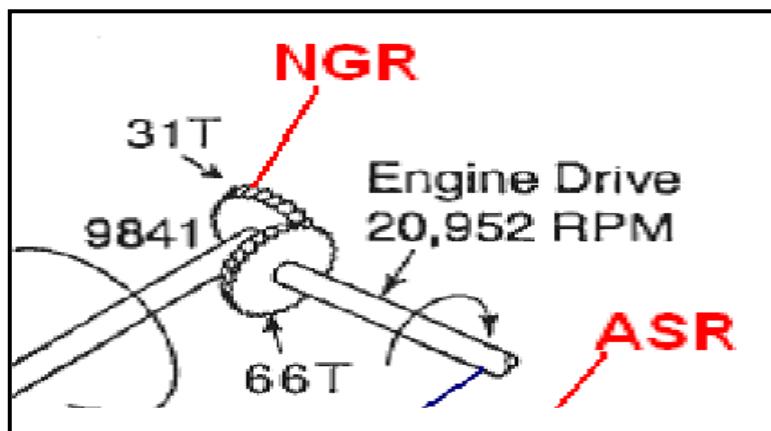


Fig. IV.2. Partie étudiée de la boîte de vitesse d'un hélicoptère

Tableau .IV.1. Calcul des différentes fréquences pendant l'engrenement

Arbre	Vitesse	Dents d'engrenage
S 1 Fe= 10825 Hz	20952 RPM	N ₁ =66
	F _{r1} =349 Hz	
S 2 Fe= 10825 Hz	9840 RPM	N ₂ =31
	F _{r2} =164 Hz	

IV.2.1. L'analyse temporelle de forme d'onde

L'analyse des formes d'onde dans le domaine temporelle est très complexe, mais peut souvent déceler les problèmes qui ne peuvent pas être détecté par d'autres techniques. Des problèmes particuliers peuvent générer des spectres de vibration très similaire, mais peut générer des signaux qui ont l'air très différent et ayant différentes amplitudes. Comme un argument majeur pour l'utilisation des formes d'onde temporelle est la période de temps associée à une certaine forme de dommages ou d'irrégularités. Forme d'onde temporelle est également la principale source pour toute autre analyse et la bonne utilisation de celui-ci peut donner des résultats fiables.

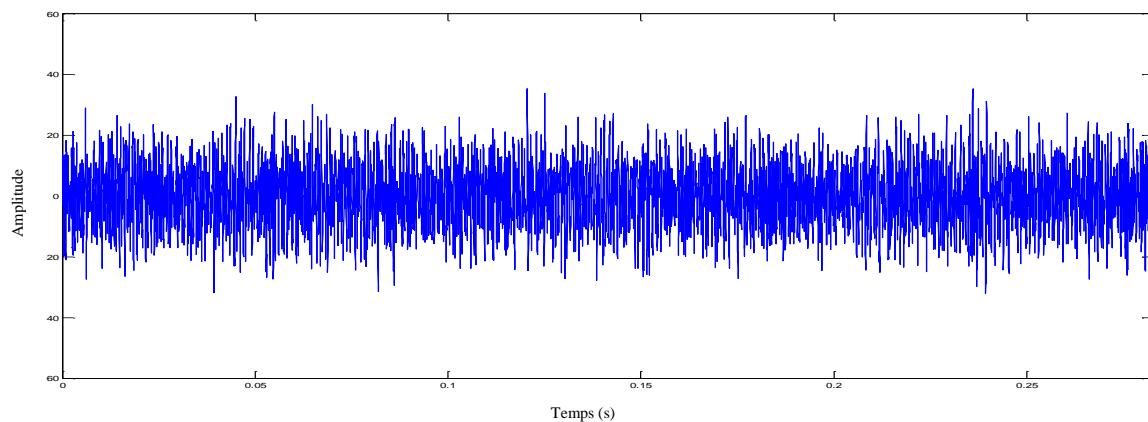


Fig. IV.3.a. Le signal original des données réelles dans le domaine temporel avec défaut

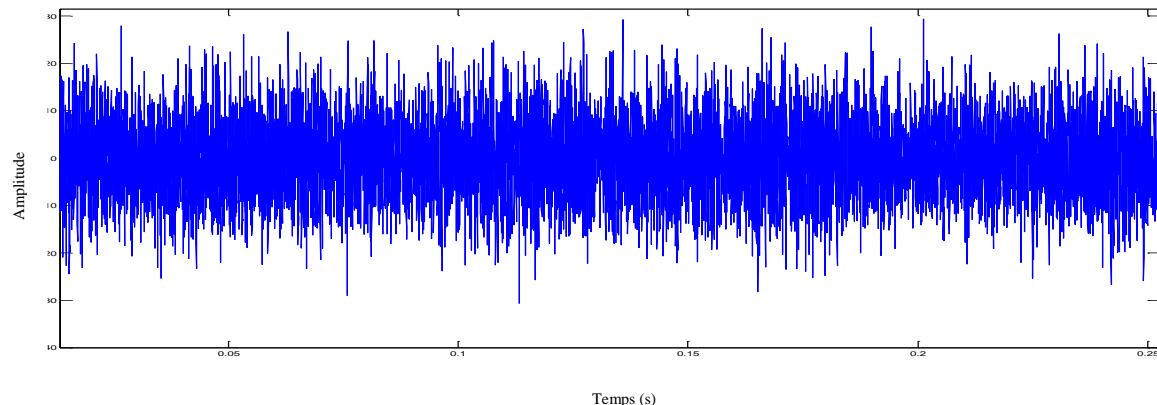


Fig. IV.3.b. Le signal original des données réelles dans le domaine temporel sans défaut

IV.2.2. Analyse de modulation d'amplitude

La technique d'analyse suivante est focalisée sur le contenu des vibrations des bandes latérales du fondamental de la fréquence d'engrènement. La fréquence de 10825 Hz a été identifiée comme la fréquence d'engrènement de la boîte de vitesses.

Les bandes latérales de la fréquence d'engrènement sont causées par des modulations d'amplitude et peuvent être très utile pour l'évaluation des dommages de l'engrenage. Les modulations peuvent être causées par des désalignements de l'engrenage, excentricités, l'usure des surfaces de l'engrènement ou tout autre problème qui

causerait des profils de dents d'engrènement à s'écartez de leur géométrie idéale ou défaut de l'espacement des dents.

Ces erreurs ou défauts provoquent des perturbations dans le point d'engrènement entre la roue menant et la roue mené pendant le fonctionnement. Cela provoque aussi une augmentation ou diminution de l'énergie d'engrènement pendant la rotation.

Habituellement, l'amplitude à la fréquence d'engrènement n'est pas utilisée pour détecter un défaut d'un dommage des engrenages, car les autres paramètres d'exploitation tels que les charges peuvent affecter cette amplitude.

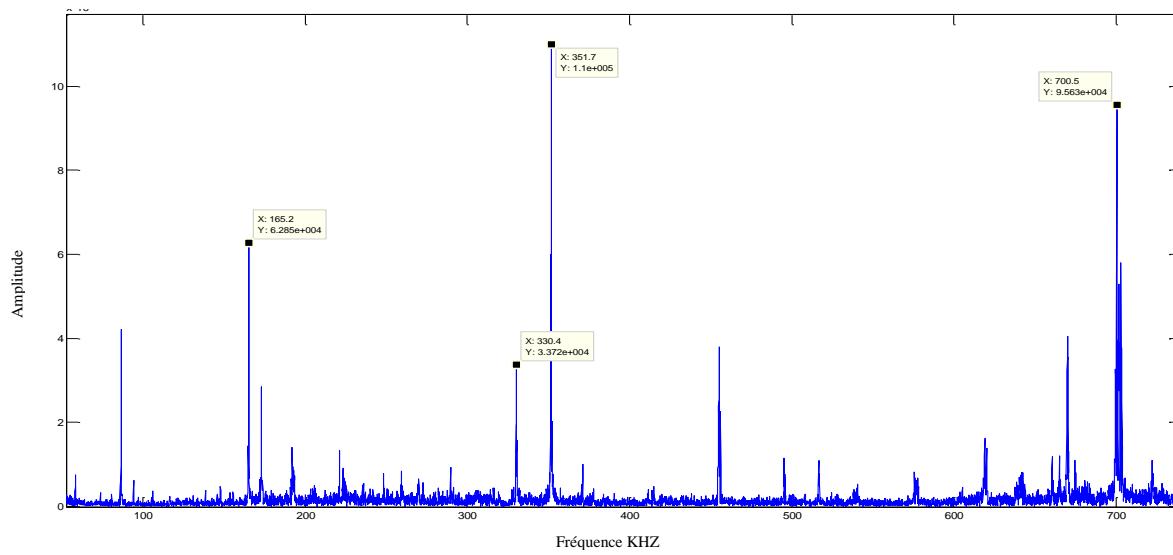


Fig. IV.4.a. Spectre de signal des événements vibratoire de modulation d'amplitude de l'engrenage avec défaut

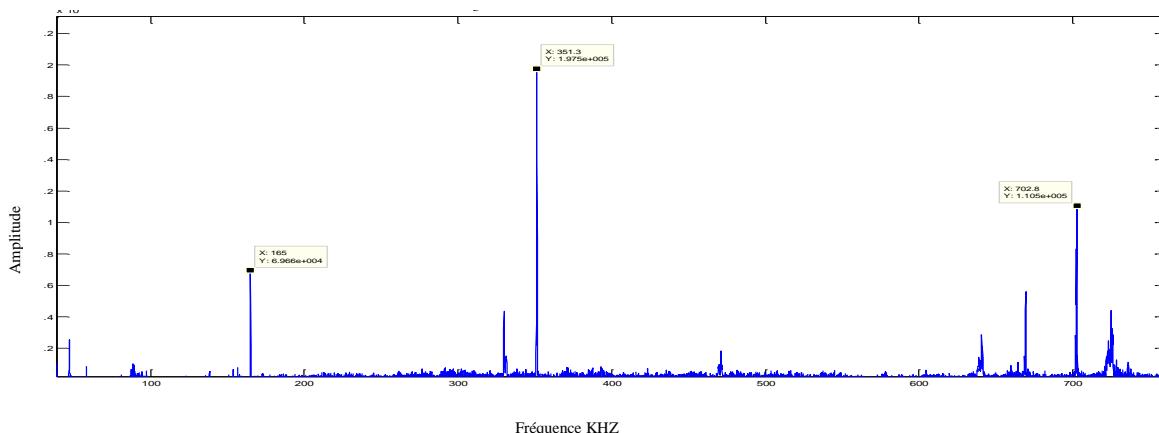


Fig. IV.4.b. Spectre de signal des événements vibratoire de modulation d'amplitude de l'engrenage sans défaut

Les Fig. IV.4.a et b, représentent le spectre du signal, qui montre l'apparition des fondamentales et les harmoniques de deuxièmes ordre qui correspondent aux fréquences de rotation de la roue et du pignon (boîte de vitesse d'un hélicoptère) et une augmentation de l'amplitude du pignon qui tourne à une vitesse de **349.2 Hz** par rapport à la roue qui tourne à **164.01 Hz**.

On peut observer dans le spectre avec défaut Fig. IV.4 (a) la présence des bandes latérales autour de la fréquence de rotation de chaque arbre et la diminution d'amplitude (fondamental et harmoniques) dans le spectre avec défauts par rapport au spectre sans défauts. Cette diminution d'amplitude du fondamental et des harmoniques impliquent la présence de défaut. Avec l'analyse Cepstral on peut détecter le défaut au niveau de ces engrenages.

IV.2.3. Analyse Cepstral

Le cepstre permet de détecter des périodicités dans le domaine fréquentiel en général que les résultats de la modulation. La technique du spectre des fréquences ne sera pas disposer d'informations si des changements proviennent de la source ou le chemin de transmission. Les harmoniques et bandes latérales dans le cepstre représentent la concentration de l'énergie d'excitation provoquée par la composante de rotation et qu'ils sont généralement utilisés pour détecter toute anomalie dans le fonctionnement.

L'avantages de l'utilisation du cepstre dans l'identification des dommages d'engrenage dans la situation des effets combinés des harmoniques et des bandes latérales dans le spectre apparaît dans le cepstre comme un petit nombre de pics clairs (harmoniques) définis, il est donc plus facile d'identifier les changements dans le système. Il est capable de détecter la présence et la croissance de bande latérale et d'extraire la périodicité du spectre [10].

La Fig. IV.5.a montré comment les dommages graves de roue menant provoquent la présence de nombreux harmoniques de fréquence de 2 fois et 3 fois la fréquence de rotation de l'arbre du moteur et changement dans l'amplitude des harmoniques. La valeur de 0.0028 s correspond à la fréquence de rotation de l'arbre du moteur 349 Hz.

En raison de vitesse élevée (fréquence d'engrènement très élevée), l'amplitude de fréquence des harmoniques de la bande latérale autour de la fréquence de rotation de la roue menant, est identifiée comme un problème d'usure des dents.

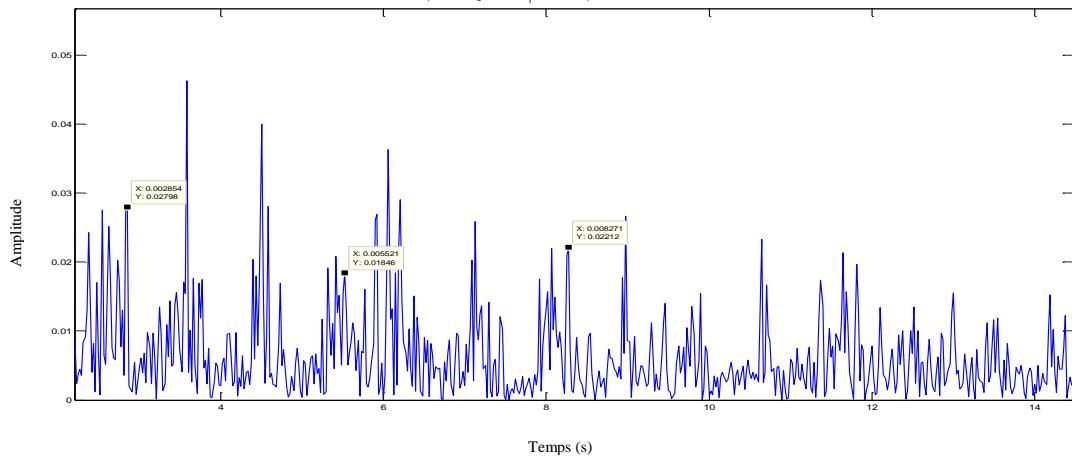


Fig. IV.5.a. Cepstre du signal présentant une fondamentale de 0,0028 s, qui est 349 Hz (vitesse de rotation du pignon) plus élevée par rapport au fondamentale de 0.006s qui correspond à 164 Hz (la vitesse de rotation de la roue) avec défaut

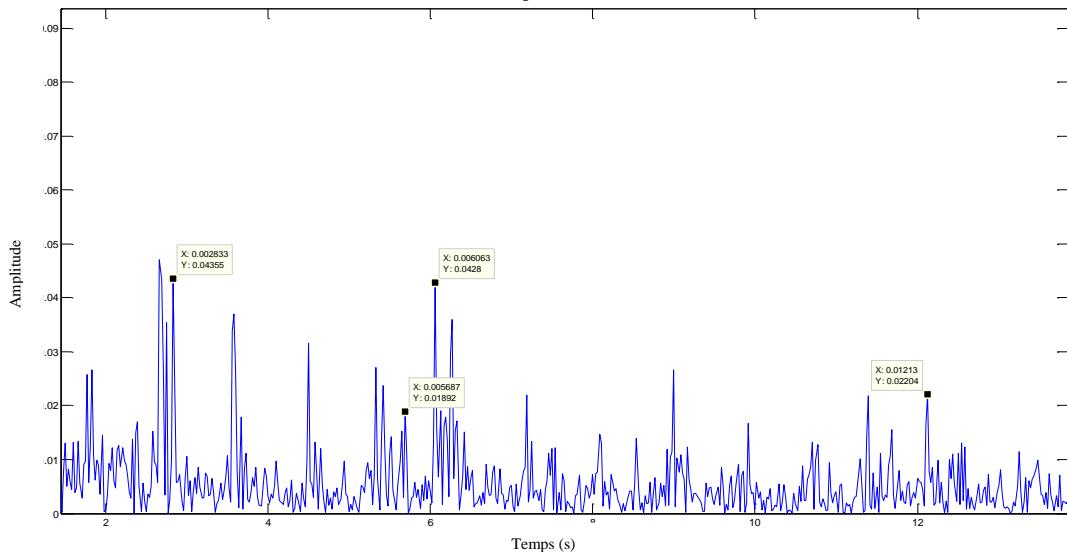


Fig. IV.5.b. Cepstre du signal présentant une fondamentale de 0,0028 s, qui est 349 Hz (vitesse de rotation du pignon) plus élevée par rapport au fondamentale de 0.006s qui correspond à 164 Hz (la vitesse de rotation de la roue) sans défaut

IV.3. Diagnostic par moyennage synchrone

Le diagnostic des réducteurs complexes à engrenage est rendu facile par l'utilisation du moyennage synchrone des signaux vibratoires obtenus sous échantillonnage angulaire. En effet, il permet de séparer de manière indépendante l'influence de chaque engrènement du réducteur, on

se ramène donc au cas d'un réducteur à train simple. Il est alors possible en utilisant des méthodes de diagnostic de mettre en évidence les organes mécaniques défectueux.

IV.3.1. Sans défauts

La Fig. IV.6, représente le cepstre d'énergie du signal accélérométrique moyené selon le PPCM d'un train simple constitué d'un pignon P (31 dents) et la roue R (66 dents), l'échantillonnage angulaire a été réalisé à raison de 137 pts/tr de l'arbre d'entrée. On y retrouve les peignes de période de rotation de pignon P et de la roue R. Aucune anomalie n'a été repérée sur ce train et aussi on constate la modulation d'amplitude du peigne de pignon.

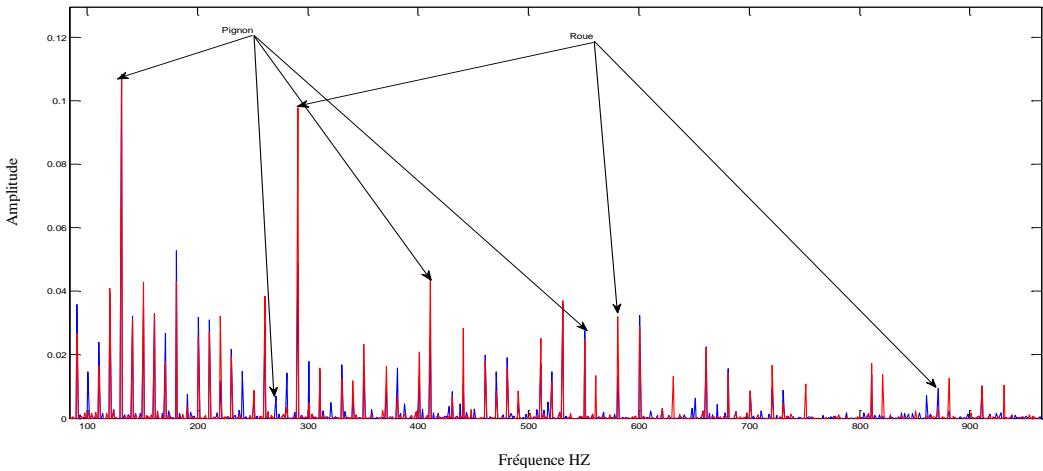


Fig. IV.6. Cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire moyené de manière synchrone selon le PPCM du pignon et la roue

IV.3.2. Avec défauts

La boite de vitesse est composée d'un pignon de 31 dents et d'une roue de 66 dents, la vitesse de rotation du moteur d'entrainement est de 20952 tr/mn soit environ 349.2 Hz et la vitesse de rotation de la roue est de 164.01 Hz avec une fréquence d'engrènement de l'ordre de 10825 Hz et la fréquence d'échantillonnage de 48000 Hz. Les signaux accélérométriques ont été obtenus sous échantillonnage angulaire à 137 points/tours de l'arbre moteur. Pour analyser l'état vibratoire de ce train d'engrenages, le cepstre d'énergie a été calculé à partir du même signal. Après moyenage synchrone selon leur période de coïncidence (plus petit commun multiple PPCM) [32].

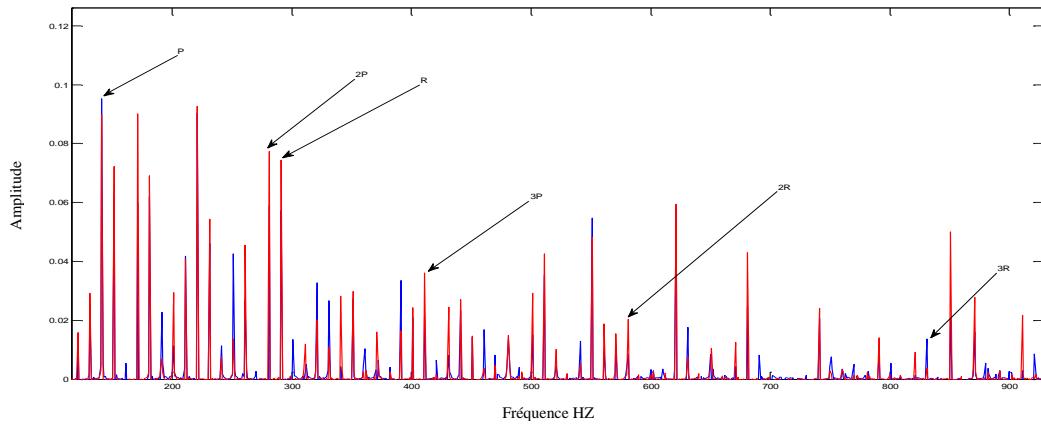


Fig. IV.7. Cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire moyen de manière synchrone selon le PPCM du pignon et la roue
(Le réducteur comporte un défaut au niveau du pignon)

La Fig.IV.7 représente le cepstre d'énergie du signal vibratoire moyen de manière synchrone selon le PPCM du nombre de dents du pignon et de la roue du premier engrènement. On fait apparaître ainsi les informations relatives à cet engrènement seulement. On reconnaît les deux peignes de pics associés au pignon **P** et la roue **R** respectivement de période **137** et **292** échantillons [32].

L'allure du cepstre montre qu'il y avait une décroissance en **1/n** pour tous les pics associés aux périodes de rotation du pignon et de la roue, on peut voir que l'amplitude de la roue est faible par rapport au pignon, donc le défaut existe au niveau du pignon qui tourne à 349.2 Hz

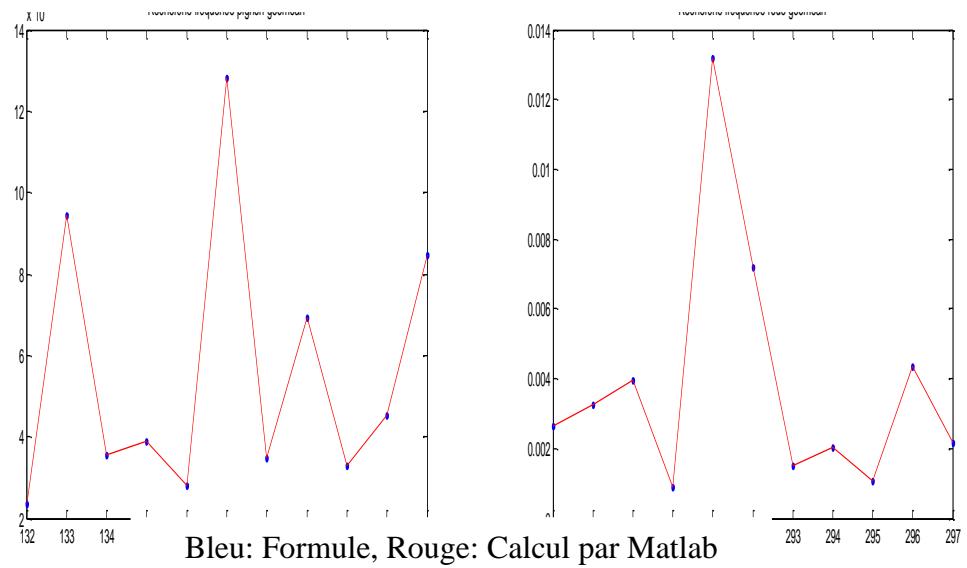
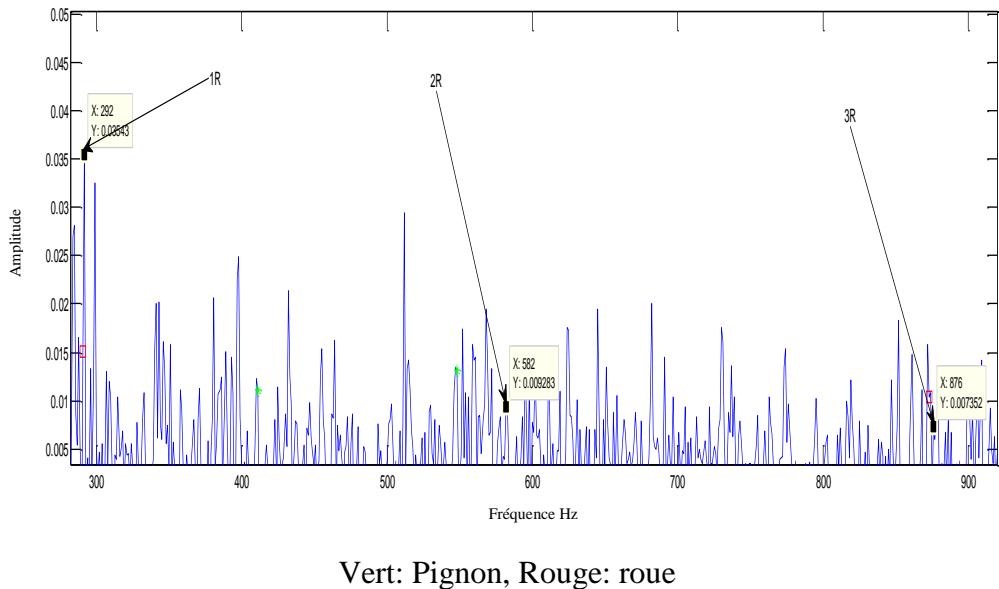
IV.4. Identification des harmoniques redondants

L'objectif de l'utilisation de la moyenne géométrique est de pénaliser les fréquences des harmoniques presque nulles. Il est alors un indicateur de redondance fréquentielle

$$\forall f \in I: \quad \prod(f) = \prod_{n=1}^N S(n, f)^{1/N} \quad (\text{IV.1})$$

D'après les résultats obtenus par le calcul géométrique du cepstre de vibration ; on peut voir que l'harmonique de défaut existe exactement dans la plage de [133-138] pour le pignon et [291-296] pour la roue. Pour la Fig. IV.8 l'allure de cepstre montre que les harmoniques qui correspondent à la roue sont décroissantes (1R) ;(2R) ;(3R) ; ce qui signifie la présence des défauts

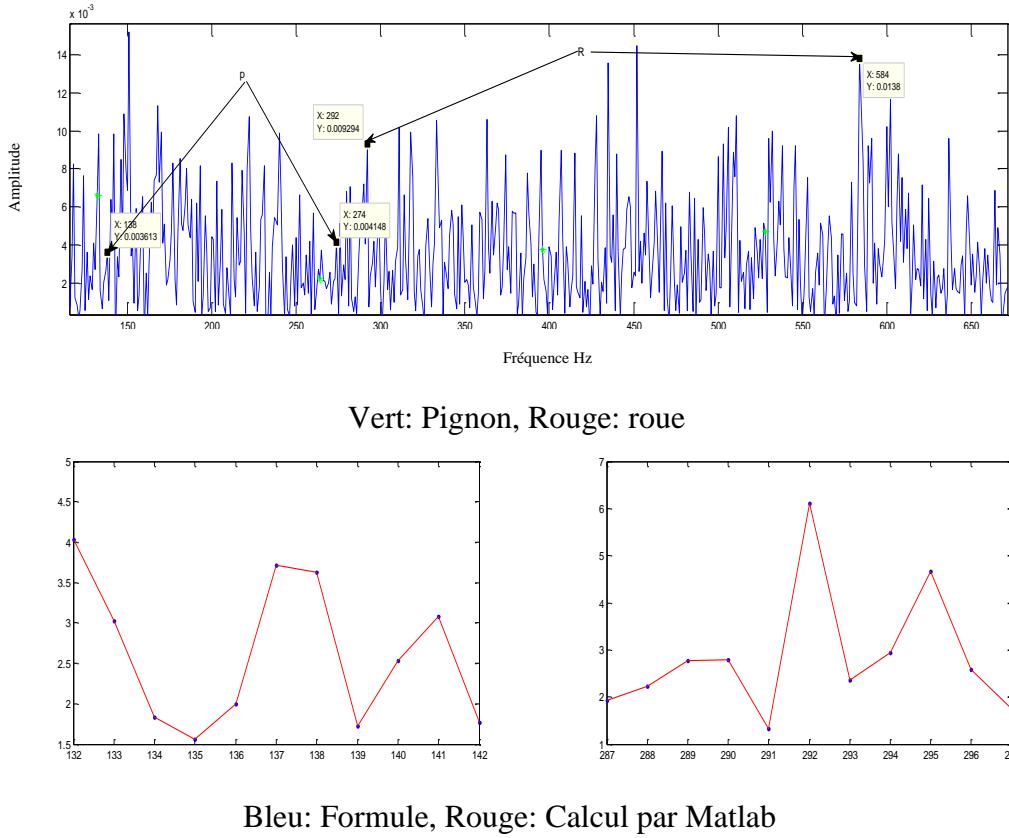
au niveau de la roue. Pour la Fig. IV.9, l'allure du cepstre montre qu'il y est une distribution aléatoire de l'harmonique qui signifie l'absence des défaillances dans ce train.



a) Recherche de la fréquence du pignon

b) Recherche de la fréquence de la roue

Fig. IV.8. Cepstre du train d'engrenage défaillant



a) Recherche de la fréquence du pignon b) Recherche de la fréquence de la roue
 Fig. IV.9. Cepstre du train d'engrenage sain

IV.5. CONCLUSION

Les signaux vibratoires jouent un rôle important dans le diagnostic des pannes des systèmes de transmission mécaniques, car ils sont souvent porteurs de l'information dynamique à partir d'élément mécaniques. Ces signaux mécaniques normalement constitués d'une combinaison de la fréquence fondamentale avec une composante de fréquence à bande étroite et les harmoniques. De nombreuses méthodes basées sur l'analyse du signal de vibration ont été développées. Ces méthodes comprennent l'estimation du spectre de puissance, transformée de Fourier rapide (FFT), analyse du spectre et de cepstre révélées efficaces dans la détection des défauts.

La méthode de moyennage synchrone a été l'objet d'une étude plus poussée dans le but d'automatiser des résultats, c'est-à-dire la création d'un programme automatique, capable de détecter les défauts sans la présence d'un spécialiste derrière chaque mécanisme. L'utilisation de

la moyenne géométrique est de pénaliser les fréquences des harmoniques presque nulles. Il est alors un indicateur de redondance fréquentielle.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En maintenance préventive, la détection précoce d'un défaut constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques d'analyses vibratoires des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs.

L'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la technique la plus connue et la plus utilisée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Cette méthode présente plusieurs avantages tels que les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine.

Les sources de vibration les plus importantes dans les réducteurs sont les variations de temps dans la raideur de masse, causées par la variation du nombre de dents en contact, et la variation de la raideur des dents individuelles; effets dynamiques causés par la déviation de profil de la dent idéale. Dans la réalité, tous les engrenages contiennent des erreurs de fabrication des dents, comme des erreurs dues à la découpe de l'engrenage, l'écart dans l'angle d'engrènement, les écarts par rapport au profil en développement, la rugosité de surface des engrenages ...etc.

En raison de ces mécanismes, l'amplitude de modulation du signal ou la fréquence de vibration peuvent être affectées, résultant dans des structures à bande latérale autour de la fréquence d'engrènement de l'engrenage et ses harmoniques. Le fait que l'amplitude du signal vibratoire varie en fonction de la charge moyenne implique que les mesures de vibration doivent être comparées à des études vibratoires de la même charge à la fois.

A travers tous les résultats, il ressort que pour un système constitué de plusieurs organes mécaniques; les méthodes classiques d'analyse vibratoire montrent leurs limites. Ceci s'explique par l'existence d'élément pouvant se coupler dans le spectre. Il est alors difficile de distinguer les apparitions et les évolutions des différentes composantes fréquentielles suite à des défauts. Il ressort que parmi tous; la transformée discontinue en ondelette constitue une technique d'analyse la plus performante dans ce contexte. Elle se prête bien à l'analyse de signaux comportant des singularités telles que des impulsions périodiques.

Bien que de nombreuses réalisations soient encore possibles, le travail est arrivé à un résultat intéressant, qui remplit les objectifs fixés dans le plan de travail initial de ce mémoire. Nous avons donc réussi à déployer plusieurs moyens pour la détection précoce des défauts des hélicoptères et donc la reconnaissance des défauts d'engrenages de type «Cassure de dent», en les visualisant sur MATLAB, et ce, en ayant recours aux méthodes de surveillance, basées sur l'analyse vibratoire des signatures fréquentielles issues des accéléromètres liés à ces engrenages. Notons que ces méthodes restent qualitatives dans la mesure où leurs résultats admettent une présence obligatoire d'une personne pour comparer à chaque vue des résultats les différences entre les signaux et en déduire l'existence ou non de l'erreur. Ces méthodes restent donc insuffisantes et peuvent être l'objet d'une étude plus poussée, qui a pour but l'automatisation des résultats, c'est-à-dire la création d'un programme automatique, capable de détecter les défauts sans l'indispensabilité de la présence d'un spécialiste derrière chaque hélicoptère.

Cette étude nous a permis de découvrir plusieurs outils MATLAB en mettant en œuvre des connaissances. Cela nous a permis notamment de les développer en utilisant plusieurs fonctions : FFT, spectre, cepstre, signaux temporels, moyenne synchrone et synchronisation de signaux, outils statistique et la technique d'ondelette qui ont pour but le diagnostic de ces pannes.

Les références

References bibliographiques

- [1] Sid Ahmed M, Early detection of defects in gears by vibration analysis, Journal of Mechanical French (1990) 4, 243-254.
- [2] G Diwakar, Detection of Gear fault using vibration analysis, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 9, September 2012).
- [3] Sait, A.S, Sharaf-Eldeen, Y.I , A review of gearbox condition monitoring based on vibration analysis techniques diagnostics and prognostics (Conference Paper), Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Volume 5, 2011, Pages 307-324.
- [4] Amit Aherwar, Md. Saifullah Khalid, Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: a review International Journal of Advanced Engineering Technology E-ISSN 0976-3945(2012).
- [5] Z. Ghemari, S. Saad, Development of measurement precision of sensor vibration, Journal of Vibration and Control, Published online before print May 30, 2012.
- [6] Samuel, P.D., Pines, D.J.Lewicki, D.G, Comparison of stationary and non-stationary metrics for detecting faults in helicopter gearboxes, Journal of the American Helicopter Society, Volume 45, Issue 2, April 2000, Pages 125-136.
- [7] D. R. Brillinger, John W. Tukey's work on time series and spectrum analysis, The Annals of Statistics (2002), Vol. 30, No. 6, 1595.1618.
- [8] Xiaohong Yuan, Lilong Cai, Variable amplitude Fourier series with its application in gearbox diagnosis—Part I: Principle and simulation, Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 1055–1066.
- [9] S. N. Engin, K. Gülez and Mr. Badi, Advanced signal processing techniques for faults diagnostics-a review, Mathematical and Computational Applications, Vol. 4 no. 2, p. 121-136, 1999.
- [10] X. Fan and J. Z. Ming, Gearbox Fault Detection Using Hilbert and Wavelet Packet Transform, Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) (4), pp. 966-982.
- [11] H. Zheng, Z. Li and X. Chen, Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform mechanical systems and signal processing (2002), 16 (2-3) ,447.
- [12] Lin J. and Zuo M. J (2003), Gear box fault diagnosis using adaptive wavelet filter, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17(6), pp.1259-1269.

- [13] Hiram Firpi, George Vachtsevanos, Genetically programmed-based artificial features extraction applied to fault detection, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21 (2008) 558–568.
- [14] Roberto Ricci, Paolo Pennacchi, Diagnostics of gear faults based on EMD and automatic selection of intrinsic mode functions, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (2011) 821–838.
- [15] Galati, F.A., Forrester, B.D. Dey, S., Application of the generalized likelihood ratio algorithm to the detection of a bearing fault in a helicopter transmission (Conference Paper), *Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2006*, 2006, Pages 400-405
- [16] Ai, Y. , Wang, Y , Liu, W, The application of the diagnoses technique of vibration on the failure analysis of gear and bearing in gearbox (Conference Paper), *Applied Mechanics and Materials*, Volume 86, 2011, Pages 143-147.
- [17] Lei, Y, Zuo, M.J, Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 23, Issue 5, July 2009, Pages 1535-1547.
- [18] Zhao, X., Zuo, M.J. , Liu, Z., Hoseini, M.R., Diagnosis of artificially created surface damage levels of planet gear teeth using ordinal ranking, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Volume 46, Issue 1, January 2013, Pages 132-144.
- [19] R.B. Randall, Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes, *Engineering Failure Analysis* 11 (2004) 177–190.
- [20] V. Girondin, Vibration-based fault detection of sharp bearing faults in helicopters, published in, *SAFEPROCESS*, Mexico City, Mexico (2012).
- [21] Bolander, N.W, Baker, C, .Remaining useful life prediction of helicopter gearbox bearings via vibration diagnostics and physics-based prognostic modeling (Conference Paper), *Failure Prevention: Implementation, Success Stories and Lessons Learned - Proceedings of the 2009 Conference of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, 2009, 43p.
- [22] Ai, Y, Wang, Y , Liu, W, The application of the diagnoses technique of vibration on the failure analysis of gear and bearing in gearbox (Conference Paper), *Applied Mechanics and Materials*, Volume 86, 2011, Pages 143-147.
- [23] Samuel, P.D. , Pines, D.J. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics (Review), *Journal of Sound and Vibration*, Volume 282, Issue 1-2, 6 April 2005, Pages 475-508.
- [24] Samuel, P.D, Pines, D.J., Constrained adaptive lifting and the CAL4 metric for helicopter transmission diagnostics, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 319, Issue 1-2, 9 January 2009, Pages 698-718.

- [25] Hood, A, Pines, D, Sun gear fault detection on an OH-58C helicopter transmission (Conference Paper), Annual Forum Proceedings - AHS International , Volume 3, 2011, Pages 1664-1690.
- [26] Liu. J, Wang. S , Wang. Y, Helicopter transmission system technology readiness assessment (Conference Paper), Applied Mechanics and Materials, Volume 86, 2011, Pages 389-393.
- [27] Yanxue Wang, Zhengjia He, Jiawei Xiang, Yanyang Zi, Application of local mean decomposition to the surveillance and diagnostics of low-speed helical gearbox, Mechanism and Machine Theory 47 (2012) 62–73.
- [28] Byington, C. , Watson, M., Lee, H., Hollins, M., Sensor-level fusion to enhance health and usage monitoring systems (Conference Paper), Annual Forum Proceedings - AHS International, Volume 2, 2008, Pages 1476-1485.
- [29] Samanta, B. , Nataraj, C., Prognostics of machine condition using energy based monitoring index and computational intelligence, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Volume 9, Issue 4, December 2009, Pages 1-6.
- [30] N. Haloui, D. Chikouche and M. Benidir, Diagnosis of Gear Systems by Spectral Analysis of Vibration Signals, IJCSNS, International Journal of Computer Science and Network Security (October 2007), Vol.7, No.10.
- [31] M. El-Badaoui, Contribution to the Diagnosis of Vibration Reducing Complex Gear by Cepstral Analysis, PhD thesis (1999).
- [32] A. Kraker, Cepstrum Analysis as a Useful Supplement to Spectrum Analysis for Monitoring Gear-box Experimental Stress Analysis, Proceedings of the 8th International Conference, Amsterdam, Netherlands (1986), May 12-16, pp 181-190.
- [33] P. D. Mc Fadden, Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration, Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design 108 (1986) pp. 165-170.
- [34] J. Hong Suh, S. Arcep Kumara, S. P. Mysore, Machinery fault diagnosis and prognosis: application of advanced signal processing techniques, CIRP Annals-manufacturing technology, (1999) volume 48, issue 1, pp. 317-320.
- [35] V.V. Polyshchuk et al, Gear fault detection with time frequency based parameter NP4, International Journal of Rotating Machinery (2002) 8(1), pp 57-30.

[36] B. D. Forrester, Analysis of gear vibration in the time-frequency domain, in current practices and trends in mechanical failure prevention, edited by HC and SC Pussy (vibration institute, willow brook) (1990), pp. 225 to 234.

[37] Samuel, P.D., Pines, D.J. Lewicki, D.G, A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics (review), *Journal of sound and vibration*, Volume 282, Issue 1-2, 6 April 2005, Pages 475-508.

[38] B. D. Forrester, Advanced vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in geared transmission systems, Ph.D Thesis, Swinburne University of technology, Australia, (1996).

[39] H. Endo, R. B. Randall, C. Gosselin, Differential diagnosis of pall vs. cracks in the gear tooth fillet region: Experimental validation, *Mechanical Systems and Signal Processing* 23(2009) 636–651.

[40] Xiaomin Zhao, Zuo, M.J, Zhiliang Liu, Diagnosis of pitting damage levels of planet gears based on ordinal ranking (Conference Paper), 2011 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM 2011 - Conference Proceedings, 2011, Article number 6024357.

[41] Chinmaya Kar and all, Monitoring gear vibration through motor current signature analysis and wavelet transform, , *Mechanical Systems and SignalProcessing* 20 (2006) 158–187.

[42] T. Barszcz, R. B. Randall, Application of spectral kurtosis or detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine, *Mechanical Systems andSignalProcessing* 23(2009)1352–1365.

[43] Decker Harry. J, Gear Crack detection using tooth analysis, at NASA Research Center, 56th Meeting sponsored by the Society for Machinery Failure Prevention Technology Virginia Beach, Virginia, April 15-19, 2002.

[44] Cheng, Z., Hu, N., Zhang, X, Crack level estimation approach for planetary gearbox based on simulation signal and GRA, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 331, Issue 26, 17 December 2012, Pages 5853-5863.

[45] Landolsi Foued « partie I, surveillance des machines par analyse vibratoire » cours de techniques de surveillance.

[46] Z. Ghemari, Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre) thèse de doctorat en électromécanique université Badji mokhtar Annaba (2013).

[47] TOUAFEK Ishak Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT), mémoire de magistère Sétif.

[48] Misti, Michel les ondelettes et leurs applications édité par hermès science publications, 2003; ISBN: 978-1-905209-31-6.