

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



FACULTE GENIE DE LA CONSRUCTION  
DEPARTEMENT DU GENIE MECANIQUE

## **Mémoire de Fin d'Etudes**

### **MASTER 2**

Domaine : Science

Et Technologie

Filière :

Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

*Présenté par :*

*HAMRIOUI Salim*

*dirigé par :*

*M. BELAID Kamel*

Thème :

**Diagnostic des défauts d'engrenages en utilisant la  
méthode des paquets d'ondelettes.**

Membres du jury :

M.HOCINI Farid (président)

M.SI AHMED Hamid (examineur)

M.BELAID Kamel (encadreur)

Année universitaire : 2020/2021.

# *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce travail*

*A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ce dure label.*

*A mes frères, mes cousins, et toute ma famille, pour leurs encouragements et leurs réconforts envers moi.*

*A mon promoteur Mr Belaid pour sa patience et sa disponibilité avec moi, qui m'a énormément aidé à réaliser ce travail.*

*A une amie que je considère comme une sœur, qui tient à rester anonyme, qui m'a beaucoup aidé et encouragé durant toute cette période.*

*A tous ceux que j'aime.*

*A la mémoire de mon oncle Rachid. M et mes grands-parents.*

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a donné tant de force, de courage et patience pour mener le présent travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur, Mr **Belaid Kamel**, pour son accueil, ses conseils, ses critiques constructives, et sa disponibilité durant toute la période de mise en œuvre de ce mémoire. Ses connaissances et son esprit d'analyse m'ont permis de bien mener à terme ce travail.

Un grand merci à tous ceux qui, par leur soutien sous une forme ou une autre, m'ont aidé à réaliser ce travail. Je tiens aussi à remercier mon ami et camarade TEMAR Mohand Achour qui contribué d'une certaine façon à la réalisation de ce projet.

Par ailleurs, je souhaite aussi remercier également tous mes enseignants, mes camarades, mes amis qui m'ont fourni un support exceptionnel, je ne peux pas les citer par peur d'en oublier.

## Résumé

La surveillance et le diagnostic des machines tournantes sont devenus des moyens inévitables et efficaces qui nous permettent de détecter les défauts de façon précoce avant même qu'ils n'engendrent d'autres pannes, et aussi ça nous permet d'en suivre l'évolution en temps réel. La maintenance de ces machines a besoin d'une parfaite compréhension des phénomènes liés à l'apparition de ces défauts-là. Détecter l'apparition d'un défaut à un stade précoce et suivre son évolution présente un grand intérêt industriel et économique, d'où la favorisation des programmes de recherche dans ce domaine qui donnent naissance à beaucoup de techniques de diagnostic notamment le traitement de signal dans **l'analyse vibratoire** ou encore les techniques de contrôle non destructif (CND)...

Ces techniques de traitement de signal dans le domaine temporel et fréquentiel peuvent être utilisées pour identifier et isoler les types de défauts dans une machine tournante. L'analyse du spectre d'un signal nous permettra de détecter l'apparition d'un défaut tandis que la décomposition de ce signal dans le domaine fréquentiel nous donnera la nature et la position de ce défaut. Ces techniques permettent de poser un pré-diagnostic rapidement, néanmoins elles présentent un certain nombre d'inconvénients qui pourraient conduire à la formulation de diagnostics erronés.

**Mots-clés :** maintenance, surveillance, vibration, diagnostic, signal, analyse fréquentielle, paquet d'ondelettes.

## **Abstract**

The monitoring and diagnosis of rotating machines have become inevitable and effective means that allow us to detect faults early before they even lead to other breakdowns, and also it allows us to follow their evolution in real time. The maintenance of these machines requires a perfect understanding of the phenomena linked to the appearance of these faults. Detecting the appearance of a fault at an early stage and monitoring its development is of great industrial and economic interest, hence the promotion of research programs in this field which give rise to many diagnostic techniques, in particular signal processing. in vibration analysis non-destructive control.

these time and frequency domain signal processing techniques can be used to identify and isolate types of faults in a rotating machine. The analysis of the spectrum of a signal will allow us to detect the appearance of a defect while the decomposition of this signal in the frequency domain will give us the nature and the position of this defect. These techniques make it possible to make a pre-diagnosis quickly, nevertheless they present a certain number of drawbacks which could lead to the formulation of erroneous diagnoses.

key words: maintenance, monitoring, vibration, diagnosis, signal, frequency analysis, packet of wavelets.

### Liste des abréviations :

- ODM : ordre de maintenance.
- LCC : Life Cycle Cost.
- MTBF : Mean Time Between Failures.
- $f_r$  : fréquence de rotation.
- $f_c$  : fréquence de passage.
- $L_h$  : durée de vie d'un roulement.
- $B_{ext}$  : bague extérieure.
- $B_{int}$  : bague intérieure.
- $f_e$  : fréquence d'engrènement.
- $f_{c0}$  : fréquence de coïncidence.
- TF : Transformée de Fourier.
- TFD : Transformée de Fourier Discrète.
- $F_e$  : fréquence d'échantillonnage.
- TFCT : Transformée de Fourier à Court Terme.
- $\Psi_{a,b}$  : ondelette mère.
- TOC : Transformée en ondelette continue.
- DWT : Transformée en ondelette discrète.
- PO : paquet d'ondelettes

# Sommaire

Introduction générale.....	6
----------------------------	---

## Chapitre I Notions générales sur la maintenance

I.1	Introduction .....	9
I.2	Définitions normatives de la maintenance. ....	9
I.2.1	La dégradation.....	9
I.2.2	La rénovation.....	9
I.2.3	La fiabilité .....	10
I.2.4	La maintenabilité.....	10
I.2.5	La disponibilité.....	10
I.3	Plans de maintenance .....	11
I.3.1	Maintenance corrective .....	11
I.3.1.1	Maintenance corrective palliative.....	11
I.3.1.2	Maintenance corrective curative.....	11
I.3.1.3	But de la maintenance corrective .....	11
I.3.2	Maintenance préventive.....	11
I.3.2.1	Maintenance préventive conditionnelle.....	11
I.3.2.2	Approche de maintenance conditionnelle.....	12
I.3.2.3	Maintenance prévisionnelle (prédictive) .....	13
I.3.2.4	Maintenance systématique.....	13
I.3.2.5	But de la maintenance préventive.....	13
I.3.3	Maintenance d'amélioration .....	14
I.4	Politiques et stratégies de maintenance .....	14
I.4.1	La gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO).....	15
I.4.2	Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC).....	16
I.4.3	Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM) .....	16
I.4.4	Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) .....	17
I.5	Les outils de la maintenance.....	17
I.5.1	Le PDCA .....	17
I.5.2	Le diagramme d'Ishikawa .....	18
I.5.3	Le QOQCCP.....	18
I.5.4	Diagramme de Pareto .....	19
I.5.5	AMDEC.....	20
I.6	L'importance de la maintenance industrielle dans l'entreprise .....	20
I.7	Les principales techniques de diagnostic.....	21
I.7.1	Analyse vibratoire .....	21

I.7.2	Analyse d'huile et de lubrifiants.....	21
I.7.3	Contrôle non destructif (CND) .....	21
I.7.4	Analyse acoustique.....	22
I.8	L'importance de l'analyse vibratoire dans le diagnostic de défaillances .....	22
I.9	Activités de l'analyse vibratoire.....	23
I.9.1	La surveillance.....	23
I.9.2	La détection .....	24
I.9.3	Le diagnostic .....	24
I.9.4	Indicateurs de surveillance .....	24
I.10	Conclusion.....	24

## Chapitre II Défauts rencontrés sur une machine tournante

II.1	Introduction .....	26
II.2	Définitions .....	26
II.2.1	La défaillance .....	26
II.2.2	Analyse vibratoire .....	26
II.3	Principaux défauts rencontrés sur les machines tournantes.....	26
II.3.1	Déséquilibre.....	27
II.3.1.1	Défaut de balourd .....	27
II.3.1.2	Signature vibratoire .....	28
II.3.2	Défaut d'alignement .....	29
II.3.2.1	Définition.....	29
II.3.2.2	Désalignement d'arbre accouplés.....	29
II.3.2.3	Désalignement des paliers .....	31
II.3.3	Défaut de serrage.....	32
II.3.4	Défaut de transmission par courroie.....	32
II.3.4.1	Définition.....	32
II.3.4.2	Fréquence caractéristique .....	34
II.3.4.3	Signature vibratoire .....	34
II.3.5	Défaut de roulements.....	35
II.3.5.1	Définition.....	35
II.3.5.2	Principaux types de roulements.....	36
II.3.5.3	Choix d'un roulement.....	38
II.3.5.4	Durée de vie d'un roulement (Lh).....	38
II.3.5.5	Principaux défaut de roulement.....	38
II.3.5.6	Fréquences caractéristique d'un défaut de roulement .....	40
II.3.5.7	Signature vibratoire .....	42
II.3.6	Défauts d'engrenages .....	44

II.3.6.1	Définition.....	44
II.3.6.2	Principaux types d'engrenages .....	44
II.3.6.3	Principaux défauts d'engrenages .....	46
II.3.6.4	Fréquence d'engrènement .....	47
II.3.6.5	Signatures vibratoires des défauts d'engrènement .....	48
II.4	Conclusion.....	51
<b>Chapitre III Traitement du signal et transformée en ondelettes</b>		
III.1	Introduction .....	53
III.2	Représentation fréquentielle (analyse de Fourier).....	53
III.2.1	Définition 1.....	54
III.2.2	Transformée de Fourier .....	54
III.2.2.1	Définition 2.....	54
III.2.2.2	Rappel sur la série de Fourier .....	54
III.2.2.3	Propriétés de la TF.....	55
III.2.3	Produit de convolution .....	56
III.2.4	Transformée de Fourier discrète.....	57
III.2.4.1	Effet échantillonnage.....	58
III.2.4.2	Effet fenêtrage .....	58
III.2.4.3	Les limites de la transformée de Fourier .....	59
III.2.5	Transformée de Fourier à fenêtre glissante (à court terme).....	60
III.2.6	Principe d'incertitude de Heisenberg .....	62
III.2.7	Inconvénient de l'analyse de Fourier.....	62
III.3	Transformée en ondelettes.....	63
III.3.1	Définition 1 : .....	63
III.3.2	Définition 2.....	63
III.3.3	Principe de la transformée en ondelettes .....	63
III.3.4	Les propriétés générales des ondelettes .....	65
III.3.5	Transformée en ondelette continue.....	66
III.3.6	Transformée en ondelette discrète.....	68
III.3.6.1	Indice de détection.....	70
III.3.6.2	Notions de détails et d'approximation.....	70
III.3.6.3	Nombre de niveaux.....	71
III.3.7	Famille des ondelettes .....	72
III.3.7.1	Ondelette de Haar .....	73
III.3.7.2	Ondelette de Daubechies .....	73
III.3.7.3	Ondelette de Meyer .....	74
III.3.7.4	Ondelette de Morlet.....	74

III.3.8	Décomposition en paquets d'ondelettes .....	75
III.3.8.1	Généralités .....	75
III.3.8.2	Construction des paquets d'ondelette : .....	76
III.3.8.3	Principe d'un paquet d'ondelettes .....	77
III.3.8.4	La transformée en paquet d'ondelettes .....	77
III.3.8.5	Localisation des paquets d'ondelettes .....	78
III.3.8.6	Optimisation des paquets d'ondelettes .....	80
III.4	Conclusion.....	82
<b>Chapitre IV Analyse expérimentale</b>		
IV.1	Introduction .....	84
IV.2	Description du matériel .....	84
IV.2.1	Le banc d'essai .....	84
IV.2.2	Le matériel de prise de mesures et de traitement de signal .....	86
IV.3	Les défauts d'engrenages .....	86
IV.3.1	Cas test 1 .....	87
IV.3.2	Cas test 2 .....	89
IV.3.3	Cas test 3 .....	92
IV.3.4	Cas test 4 .....	94
IV.4	Conclusion.....	96
Conclusion générale.....		98
Bibliographie.....		99

## Liste des figures et tableaux

Figure I-1 intervalle d'une intervention .....	12
Figure I-2 les stratégies de maintenance .....	14
Figure I-3 optimisation de la politique de maintenance.....	15
Figure I-4 période de vie d'un équipement .....	16
Figure I-5 diagramme PDCA « Karn G. Bulsuk .....	18
Figure I-6 diagramme d'Ishikawa .....	18
Figure I-7 exemple de diagramme de Pareto.....	20
Figure I-8 importance des technique de diagnostic vibratoire .....	22
Figure II-1: tolérance d'usinage sur un rotor [24] .....	27
Figure II-2 : Exemples de défauts induisant un balourd .....	28
Figure II-3: signal vibratoire généré par un balourd.....	28
Figure II-4 spectre théorique d'un défaut de balourd [25].....	29
Figure II-5: défaut d'alignement d'arbre. [25] .....	29
Figure II-6: Signal temporel d'un défaut d'alignement [25] .....	30
Figure II-7: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial [25] .....	30
Figure II-8: Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire [24] [25].....	31
Figure II-9: Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre [25] .....	31
Figure II-10: Défaut d'usure d'accouplement [25].....	32
Figure II-11: schéma représentatif d'un défaut de courroie .....	34
Figure II-12: Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroie .....	34
Figure II-13: spectre réel d'un défaut de transmission par courroies (la fréquence de passage est de 8,17 Hz) [25].....	35
Figure II-14: éléments et caractéristiques qui constituent un roulement à billes. ....	36
Figure II-15: roulement a une rangée de billes à contact oblique. ....	36
Figure II-16: roulement a rotule sur deux rangées de billes.....	37
Figure II-17: roulement à une rangée de rouleaux cylindriques.....	37
Figure II-18: roulement a aiguilles .....	37
Figure II-19: roulement à rouleaux coniques .....	38
Figure II-20: Phénomène de piquetage observé sur une piste de roulement .....	39
Figure II-21: Grippage d'une bague.....	40
Figure II-22: Rupture des éléments d'un roulement.....	40
Figure II-23: Caractéristiques géométriques d'un roulement. ....	41
Figure II-24: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur la bague extérieure . ....	42
Figure II-25: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	43
Figure II-26: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant. ....	43
Figure II-27: engrenage droit à dentures droite. ....	44
Figure II-28: Engrenages droits à dentures hélicoïdales pour arbres parallèles. ....	45
Figure II-29: Engrenage conique à denture droite pour arbres concourants.....	45
Figure II-30: Engrenages roues et vis entre arbres orthogonaux .....	46

Figure II-31: représentation du Pitting .....	47
Figure II-32: : Image vibratoire d'un engrenage sain .....	48
Figure II-33: image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	49
Figure II-34: Image vibratoire théorique d'une denture.....	50
Figure II-35: Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture sur un réducteur.....	50
Figure II-36: Jeu de fond de denture trop grand .....	51
Figure III-1 signal sinusoïdal .....	53
Figure III-2 signal « carré » .....	55
Figure III-3 signal sinus redressé double alternance .....	56
Figure III-4 produit de convolution d'une fonction par Dirac .....	57
Figure -III-5: Effet de la largeur de la fenêtre (rectangulaire) d'observation $N =$ nombre d'échantillons temporel.....	59
Figure III-6: transformée de Fourier d'un signal cosinus .....	60
Figure III-7: : Fenêtre de la transformée de Fourier a court terme pour deux fréquences différente .....	61
Figure III-8: Pavage temps-fréquence pour la TF à court terme .....	62
Figure III-9: générations d'ondelettes par dilatation et translation .....	64
Figure III-10: Décomposition d'un signal en ondelettes .....	66
- Figure III-11: : Balayage de signal par l'ondelette avec $a$ et $b$ donnés .....	67
Figure III-12: Balayage de signal par une autre ondelette fille.....	67
Figure III-13: Quelques formes d'ondelettes.....	68
Figure III-14: Décomposition de signal par deux filtres passe bas et passe haut .....	69
Figure III-15: décomposition d'un signal à $n=2$ (niveau2).....	70
Figure III-16: analyse multirésolution .....	71
Figure III-17: décomposition d'un signal à $n=4$ (4niveaux).....	71
Figure III-18: décomposition d'un signal en 4.....	72
Figure III-19: ondelette de Haar.....	73
Figure III-20: ondelette de Daubechies .....	73
Figure III-21: ondelette de Meyer.....	74
Figure III-22: ondelette de Morlet.....	74
Figure III-23: Décomposition en paquets d'ondelettes à l'ordre $J$ .....	75
Figure III-24:: Coefficients d'ondelettes pour une base d'ondelettes de niveau 5.....	76
Figure III-25: Transformée en paquet d'ondelette .....	78
Figure III-26: Suivi des déférentes bandes de fréquences au cours des décompositions avec les filtres $h$ et $g$ .....	79
Figure III-27 Les positions probables d'une résonance dans une sous-bande. ....	80
Figure III-28 : détection d'une résonance avec le Kurtosis.....	81
Figure III-29 Le spectre d'enveloppe des coefficients de la bande $\Delta f_{fin}$ .....	82
Figure IV-1 Le banc d'essai.....	84
Figure IV-2 chaine cinématique du banc d'essai.....	85
Figure IV-3 défaut d'engrenage.....	86

Figure IV-4 (a) Signal temporel à 3000 tr/min et (b) le spectre correspondant.....	87
Figure IV-5 L'arbre de la décomposition en paquets d'ondelette du signal de la figure 3(a) .....	88
Figure IV-6 (a) l'ondelette biorthogonale et (b) sa fonction d'échelle .....	88
Figure IV-7 (a) le Kurtosis des 16 bandes de la décomposition, (b) le spectre d'enveloppe de la bande 6, (c) le spectre d'enveloppe de la bande 12 et (d) le spectre d'enveloppe de la bande 11 plus la bande 12.	89
Figure IV-8 signal temporel du signal à 1200tr/min .....	89
Figure IV-9 densité spectrale du signal .....	90
Figure IV-10 arbre de décomposition du signal. ....	90
Figure IV-11 le Kurtosis des 16 bandes de la décomposition .....	91
Figure IV-12 spectre d'enveloppe de la bande 8.....	91
Figure IV-13 signal temporel du signal à 2700 tr/min .....	92
Figure IV-14 densité spectrale du signal. ....	92
Figure IV-15 arbre de décomposition du signal à analyser. ....	93
Figure IV-16 Kurtosis des 16 bandes du signal à analyser .....	93
Figure IV-17 le spectre d'enveloppe de la bande 11.....	94
Figure IV-18 le spectre d'enveloppe de la bande 15.....	94
Figure IV-19: (a) Signal temporel à 2400 tr/min et (b) le spectre correspondant .....	95
Figure IV-20 : (a) le Kurtosis des 16 bandes de la décomposition, (b) le spectre d'enveloppe de la bande 13, (c) le spectre d'enveloppe de la bande 12 plus la bande 13 et (d) le spectre d'enveloppe de la bande 9. .....	96
Tableau I-1 Tableau récapitulatif de la méthode QQQCCP.....	19
Tableau I-2 Différentes technique du diagnostic et leurs utilisations .....	23
Tableau II-1 Statistiques des causes de défaillances. ....	27
Tableau IV-1 caractéristique du banc d'essai .....	85
Tableau IV-2 Les différentes fréquences caractéristiques de banc d'essai.....	86

### Introduction générale

Le monde de l'industrie, et le monde des transports disposent de différentes machines et d'installations de plus en plus performantes et plus complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements offrent à la maintenance un rôle primordial. Elle permet non seulement d'intervenir dans le cas d'une présence des éléments défectueux, mais aussi elle minimise le temps de réparation, en plus de ça, elle fournit un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. La maintenance optimale des machines tournantes en fonctionnement a une importance capitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie des machines. La maintenance de ces systèmes occupe un temps relativement important par rapport à leurs temps d'utilisation. Actuellement, la recherche scientifique vise à développer les outils nécessaires à l'optimisation de la maintenance des machines.

Parmi les différentes méthodes de la surveillance, la méthode par l'analyse vibratoire compte parmi les techniques les plus utilisées pour effectuer une surveillance et un diagnostic fiable pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques qui affectent une machine.

Les machines tournantes (compresseur, pompes, turbines...) en fonctionnement engendrent des défauts comme : les balourds, les désalignements, les défauts de roulements, l'écaillage des dents d'engrenage..., c'est ce qui donne lieu à des signaux vibratoires très complexes. Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les signaux vibratoires sont captés par des accéléromètres placés sur les paliers de la machine, le plus proche possible de la source du défaut. Une fois que les signaux sont mesurés, une série de méthodes de traitement sont proposées, par exemple : l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle, l'analyse temps-fréquence, l'analyse échelle-fréquence et l'analyse de la cyclostationnarité.

L'objectif de ce travail consiste en la détection des défauts d'une machine tournante et plus particulièrement des défauts mécaniques réels, en l'occurrence ceux des engrenages.

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les notions générales de la maintenance industrielle et leurs applications dans le domaine de l'industrie suivi des techniques d'analyse qui sont utilisées spécialement dans la maintenance conditionnelle.

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier les différents défauts susceptibles d'affecter les machines tournantes par la méthode de l'analyse vibratoire avec les différents spectres qui représentent ces défauts, ainsi que leurs différentes signatures vibratoires théoriques.

Le troisième chapitre sera entièrement consacré aux différentes méthodes de traitement de signal utilisées dans le diagnostic vibratoire, on va présenter les méthodes qui se basent sur la représentation fréquentielle en utilisant la transformée en ondelettes, et plus particulièrement les paquets d'ondelettes.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à la validation expérimentale de la théorie qu'on a présentée dans le chapitre précédent. Dans cette partie, nous avons utilisé des signaux issus d'un banc d'essai réalisé au centre d'Etude et de Recherche en Soudage et Contrôle situé à Cheraga, Alger.

# Chapitre I

## Notions générales sur la maintenance .

## I.1 Introduction

Actuellement les machines industrielles fonctionnent généralement sans intervention directe de l'homme, et ce dû au développement de l'automatisation de ces machines qui poussent l'homme à quitter la scène de la production. Toutefois sa place reste primordiale dans le processus de maintenance.

Le choix des méthodes de surveillance est conditionné par la nature des installations et de leurs dégradations éventuelles. Il s'agit d'opérations pouvant être réalisées en fonctionnement (mesures de température, surveillance vibratoire ou acoustique, consommation électrique...) ou menées en différé (analyse du lubrifiant par exemple) nécessitant des arrêts programmés du système. La solution de maintenance corrective, n'intervenant qu'en cas de panne, est abandonnée dès que le taux de défaillance peut être obtenu à partir des retours d'expérience, la maintenance préventive systématique est toutefois satisfaisante.

Pour assurer une application optimale de la maintenance conditionnelle, et une bonne surveillance des machines et des équipements, il faudrait en extraire des informations représentatives de leur état de fonctionnement ; Grâce aux différentes techniques d'analyses se basant sur des grandeurs physiques constituant la machine concernée (vibrations, bruits, vitesses . . .).

## I.2 Définitions normatives de la maintenance.

Selon la norme "NF EN13306 (2001)", la maintenance est l'ensemble des activités techniques, administratives et de gestion du cycle de vie d'un bien, visant à le maintenir et à le remettre dans un environnement sûr. Dans cet état, il peut remplir les fonctions requises. La maintenance vise à maintenir ou à restaurer les actifs dans un état spécifique afin qu'il puisse fournir des services spécifiques. [1]

### I.2.1 La dégradation

C'est évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe. [1]

### I.2.2 La rénovation

Inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes. [2]

### I.2.3 La fiabilité

C'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. [3]

### I.2.4 La maintenabilité

C'est l'aptitude d'un bien, dans des conditions données d'utilisation, à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise [4], lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

Elle est caractérisée par une probabilité  $M(t)$  que la maintenance d'une entité  $E$  accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps  $t$ , sachant que  $E$  est défaillante au  $t=0$ . [9]

- Le Temps Moyen de fonctionnement Entre Défaillances (TMED), Mean Operating Time Between Failures (MTBF)

On a :  $MTBF=MUT+MDT$

Avec :

MUT : Mean Up Time (temps moyen de remise en état).

MDT : Mean Down Time (temps moyen entre un défaut et le remise en service de l'équipement).

- Le Temps Moyen avant Remise en Service ou temps d'indisponibilité après défaillance (TMRS), Mean Time To Restoration (Mean Time To repair), MTTR).

On peut l'exprimer, sous certaines conditions, par :

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

### I.2.5 La disponibilité

C'est l'aptitude d'un bien/d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou bien pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. [5]

Ce sont des visites régulières des pièces d'usure. C'est un examen qui se fait avec :

- Nos moyens naturels de contrôles : l'ouïe, odorat, toucher, bruit ;
- Des mesures électriques (intensité en charge, tension etc.)
- Des mesures mécaniques : tensiomètre pour les courroies, tournevis ou clé dynamométrique pour le contrôle des serrages.
- Des mesures diverses : température, viscosité etc.

### **I.3 Plans de maintenance**

C'est l'ensemble structuré des tâches qui comprennent les activités, les procédures, les ressources et la durée nécessaire pour exécuter la maintenance. On distinguera des plans de maintenance préventive, corrective, d'amélioration et mixte. [6]

#### **I.3.1 Maintenance corrective**

C'est une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. [1]

##### **I.3.1.1 Maintenance corrective palliative**

Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment (dépannage). [7]

##### **I.3.1.2 Maintenance corrective curative**

La maintenance corrective curative permet de rétablir un matériel ou une entité dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. [2]

##### **I.3.1.3 But de la maintenance corrective**

Elle a pour but de remettre en fonctionnement, durablement ou provisoirement, un bien.

### **I.3.2 Maintenance préventive**

C'est une maintenance effectuée à des intervalles de temps prédéterminés ou selon des normes prescrites pour réduire la possibilité d'une défaillance ou d'une dégradation des fonctions d'un bien. [1]

#### **I.3.2.1 Maintenance préventive conditionnelle**

C'est une maintenance préventive qui est basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. [1]

C'est une maintenance affectée par un type d'événement prédéterminé. Divers outils, tels que l'analyse des vibrations et l'analyse de l'huile, peuvent détecter des signes d'usure ou de dégradation des équipements. Cela se fait en mesurant les valeurs des paramètres de contrôle à chaque inspection, tels que l'amplitude de déplacement, la vitesse ou l'accélération de vibration, l'acidité, ou la teneur en particules solides dans le fluide. Dans certains cas, l'équipement de mesure ou les capteurs sont intégrés au système de surveillance, et l'inspection ne peut être effectuée qu'après l'obtention du signal. Généralement, cette action n'est déclenchée que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement par le fabricant ou les normes de santé et de sécurité au travail. [8]

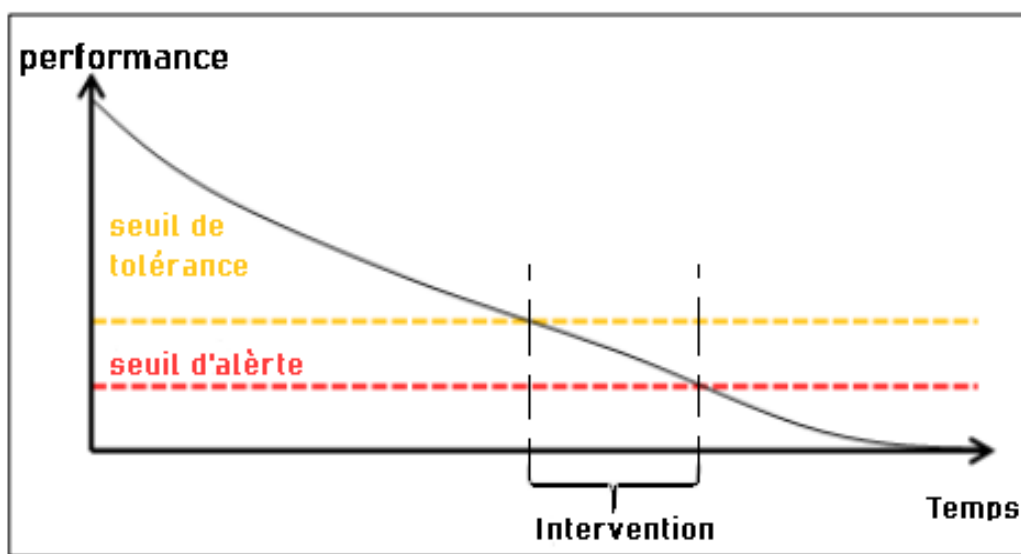


Figure I-1 intervalle d'une intervention

### I.3.2.2 Approche de maintenance conditionnelle

Les surcharges d'utilisation des équipements pourraient entraîner des défaillances précoces bien avant de la date optimale prévue par l'échéancier du constructeur. Ceci constitue une limite sérieuse de la maintenance préventive systématique. C'est pourquoi la maintenance conditionnelle est appliquée aux systèmes mécaniques où la sécurité est de grande envergure. Le principe de cette maintenance est d'intervenir lorsqu'un seuil est prédéfini d'un indicateur est atteint. Bien que le problème de ce type soit la prédéfinition de ces seuils, plusieurs méthodes et techniques sont utilisées et constituent actuellement le pilier d'une stratégie de maintenance moderne. [10]

Les mesures de température et de pression permettent un suivi et donc une bonne surveillance de l'état de certaines installations. En les comparant à des seuils prédéfinis, elles permettent un résultat rapide sur l'état de fonctionnement entraînant l'arrêt de tout le système si besoin est.

Le problème de cette technique est le fait qu'elle ne permette pas de savoir l'origine du problème, ni d'ailleurs un diagnostic précis. L'analyse des lubrifiants permet la mesure de la teneur en polluants de l'huile issue de la dégradation des pièces mécaniques, ou représentatifs d'un type de fonctionnement (résidus de combustibles, produit de combustion). C'est donc un bon indicateur de la présence d'une avarie mais pas de son origine car les particules, détectées le plus souvent par une spectrométrie, peuvent provenir de n'importe quelle pièce du système. Malgré cette limite, l'analyse de l'huile reste très utilisée notamment dans les moteurs thermiques. Enfin l'analyse vibratoire est sans doute la technique la plus fiable car elle permet la détection et le diagnostic à la fois. [11]

### **I.3.2.3 Maintenance prévisionnelle (prédictive)**

C'est une maintenance conditionnelle qui est exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation d'un bien. [4]

### **I.3.2.4 Maintenance systématique**

C'est une maintenance préventive est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. [1] [9]

Autrement dit elle désigne des opérations effectuées systématiquement, selon un calendrier à périodicité temporelle fixe ou selon une périodicité d'usage (nombre d'heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués,).

La période de remplacement est déterminée selon deux méthodes : la première est le type de bloc et la seconde est le type d'âge. La politique de remplacement par tranche d'âge recommande de remplacer l'équipement après T unités de disponibilité. La stratégie de type bloc préconise de remplacer l'appareil après une période de temps prédéterminée T, 2T, etc. Indépendamment de l'âge et de l'état des composants. Par conséquent, la maintenance du système doit comprendre le comportement de l'équipement, l'usure, le mode de dégradation, le temps moyen entre les pannes (MTBF) pour déterminer la période d'intervention. [9]

### **I.3.2.5 But de la maintenance préventive**

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées,
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production

- Diminuer le budget de maintenance
- Supprimer les causes d'accidents graves.

### I.3.3 Maintenance d'amélioration

Ce type de maintenance consiste à faire des modifications, des changements, des transformations sur un bien. Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet. [2]

### I.4 Politiques et stratégies de maintenance

La notion de maintenance a subi des évolutions au cours du temps. Aujourd'hui le terme maintenance est associé à l'optimisation des performances et des coûts de production des équipements qui passent par l'intégration d'une même démarche des aspects de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité des biens et des personnes. [12]

Le fait de choisir entre un type de maintenance et un autre est une question cruciale puisqu'il s'agit de choisir les stratégies de maintenance que nous allons montrer dans la figure ci-dessous qui synthétise selon les [12] différents concepts de la maintenance :

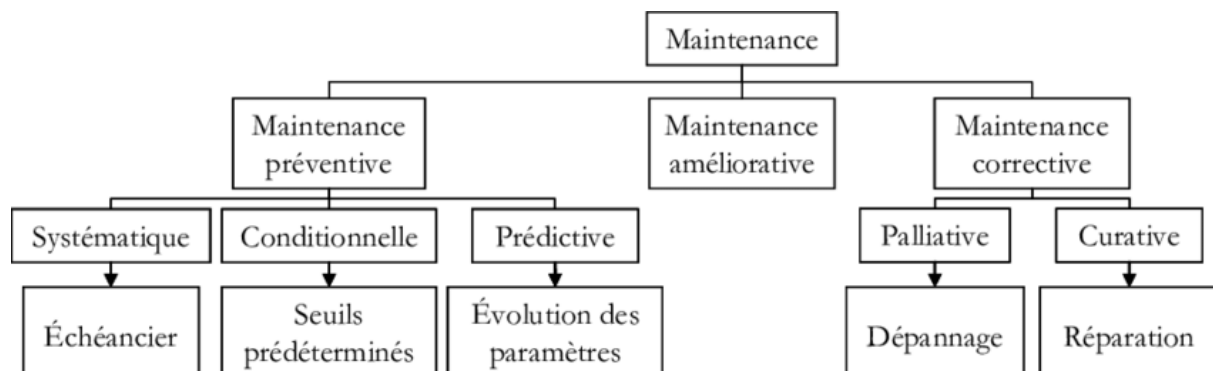


Figure I-2 les stratégies de maintenance

Le choix entre ces différents types de maintenance dépend des politiques menées sur chaque équipement. Le coût d'une panne et la sécurité du personnel sont deux paramètres primordiaux quant aux choix du type de maintenance. En général, un mélange harmonieux entre préventif et correctif est adopté afin de minimiser les coûts totaux de maintenance. Selon la figure ci-dessous (figure 2) un manque d'entretien des équipements va engendrer un nombre considérable d'incidents et de pannes et donc beaucoup de maintenance corrective, tandis que beaucoup de préventif augmentera le coût total de maintenance. [13]

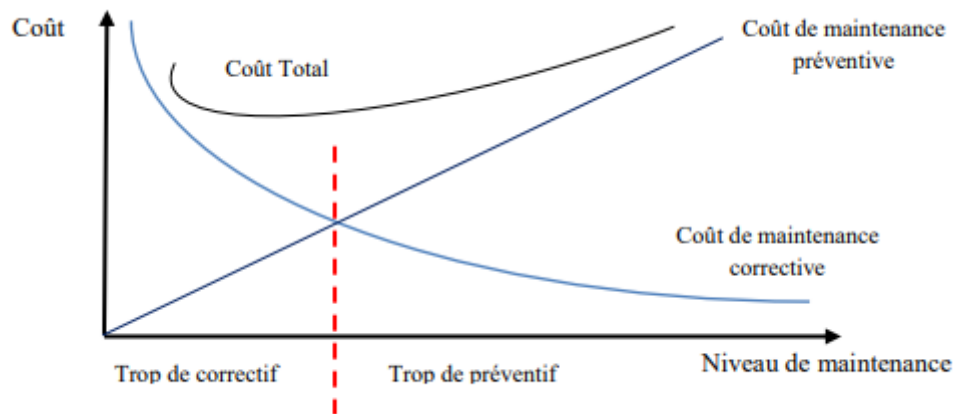


Figure I-3 optimisation de la politique de maintenance

#### I.4.1 La gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO)

La GMAO vise d'abord l'assistance des services maintenance des entreprises dans leurs missions. [1][2] Un service de maintenance cherche à établir ou à maintenir un bien (équipement) dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. Une GMAO peut également intervenir dans d'autres services de l'entreprise, comme la production ou l'exploitation, ainsi que la direction financière ou générale de l'entreprise, en fournissant des indicateurs facilitant les prises de décisions.

Ainsi les fonctions les plus courantes de la GMAO sont [14] :

- **La gestion de l'équipement** : inventaire des équipements, localisation, gestion d'information dédiée par type d'équipement (production, bâtiments, véhicules, réseaux, ordinateurs) ;
- **La gestion de la maintenance** : corrective (avec OT : ordre de travaux, ou BT : bon de travaux, ou ODM : ordre de maintenance), préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle) ;
- **La gestion des stocks** : magasins, quantités minimum ou maximum de réapprovisionnement
- **La gestion des achats** : de pièces détachées ou de services (sous-traitance, forfait ou régie), cycle devis, demande d'achat, commande, réception et retour fournisseur, facturation ;
- **La gestion du personnel et le planning** : activités, métiers, planning de charges, pointage d'heures
- **La gestion des coûts et budget** : de main-d'œuvre, de stocks, d'achat, de location de matériel, préparation des budgets, suivi périodique, rapports d'écart

- **Ordonnement** : il permet de faire la comparaison entre les besoins et les moyens en tenant compte des contraintes, de concevoir un programme de travail et d'engager les moyens nécessaires au moment opportun.

#### I.4.2 Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC)

La stratégie LCC est basée sur la détermination du coût de maintenance pendant le cycle de vie de l'équipement. Le coût du cycle de vie est la somme du coût en capital, du coût d'utilisation cumulé et du coût de maintenance de l'équipement tout au long de son cycle de vie. Cette méthode optimise le coût total du système tout au long de son cycle de vie. Le concept est principalement utilisé dans le processus décisionnel pour sélectionner la politique de maintenance à appliquer et l'âge approprié pour le remplacement des équipements. Cependant, la difficulté majeure de cette approche est l'estimation des différents coûts intervenant durant le cycle de vie d'un équipement. [15]

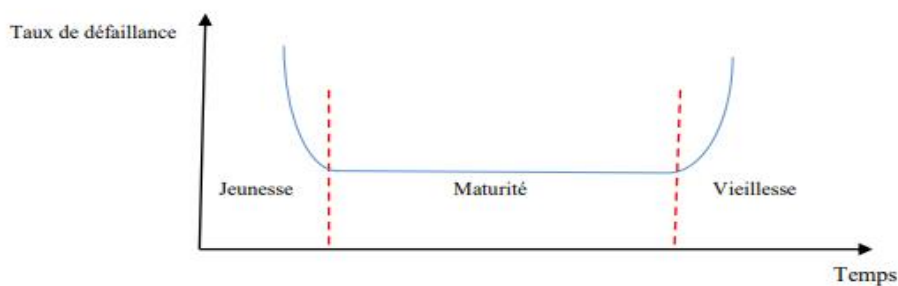


Figure I-4 période de vie d'un équipement

#### I.4.3 Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM)

La stratégie de production et de maintenance totale a été lancée au Japon dans les années 1970 dans le cadre d'une stratégie de zéro défaut, zéro délai, zéro inventaire et zéro défaillance. Il met l'accent sur l'organisation des ressources de production pour améliorer la disponibilité des équipements, et sa définition est « la capacité d'un produit à remplir les fonctions requises dans une condition donnée, un temps donné ou un intervalle de temps donné, en supposant que l'approvisionnement en ressources externes est garanti [16]. En bref, TPM a les objectifs suivants :

- D'améliorer l'efficacité du service maintenance (maintenance préventive, systématique ou conditionnelle, la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur - GMAO)
- De mettre en place l'auto-maintenance.

### Remarque

Le taux de rendement synthétique (TRS) est un indicateur destiné à suivre le taux d'utilisation de machines.

Il est défini par la formule :

$TRS = \text{Production réelle} / \text{production maximum théorique.}$

#### **I.4.4 Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)**

La stratégie de type MBF s'établit sur l'amélioration de la fiabilité et la maintenabilité. Cette approche, initiée à la fin des années 1970 dans le domaine du transport aérien, cherchait à développer des programmes d'entretien préventifs techniquement consolidés. Le principe de cette approche est basé sur une analyse de type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Ou les étapes de collecte de données matérielles et de documentation sont nécessaires pour identifier l'équipement et le décomposer en systèmes fonctionnels. L'objectif est de déterminer le remplacement préventif à mettre en œuvre en fonction de la priorité, des facteurs économiques et des exigences de sécurité. La MBF est donc une méthode rationnelle et structurée qui requiert une vision globale de l'entreprise et est donc systématique, intégrant tous les facteurs qui augmentent significativement la productivité en réduisant les coûts de maintenance. Cette vision globale du coût de possession des équipements basée sur la fiabilité et son lien avec la maintenance nécessite une analyse de la valeur, une analyse fonctionnelle, des méthodes intégrées de conception de maintenabilité, des méthodes qualité, la sécurité de fonctionnement, les aspects économiques et financiers, et un soutien logistique intégré (ILS) [17]

### **I.5 Les outils de la maintenance**

#### **I.5.1 Le PDCA**

Roue de Deming en français, c'est technique qui pour principe d'améliorer l'anticipation et la gestion des projets industriels. Cet outil aide à mettre ses idées en pratique et à découper le travail à réaliser en plusieurs étapes pour en suivre le bon déroulement. [18]

Le PDCA veut dire :

- P « **Plan** » : planifier ce que l'on va faire.
- D « **Do** » : faire ce qui a été prévu.
- C « **Check** » : vérifier que le travail effectué correspond à ce qui était prévu au départ.
- A – « **Act** » : réagir et ajuster en dressant un bilan du travail réalisé.

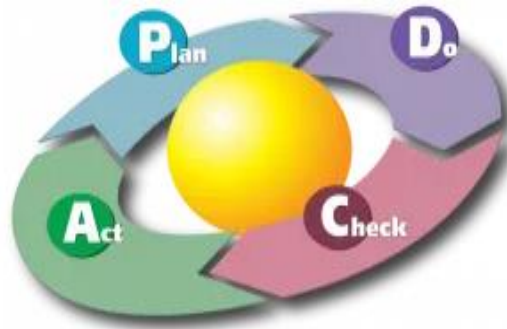


Figure I-5 diagramme PDCA « Karn G. Bulsuk

### I.5.2 Le diagramme d'Ishikawa

Appelé aussi diagramme de causes et effets (méthode des 5M), est utilisé principalement dans la gestion de la qualité, Il aide à identifier les différentes causes et effets d'une quelconque problématique. [19]

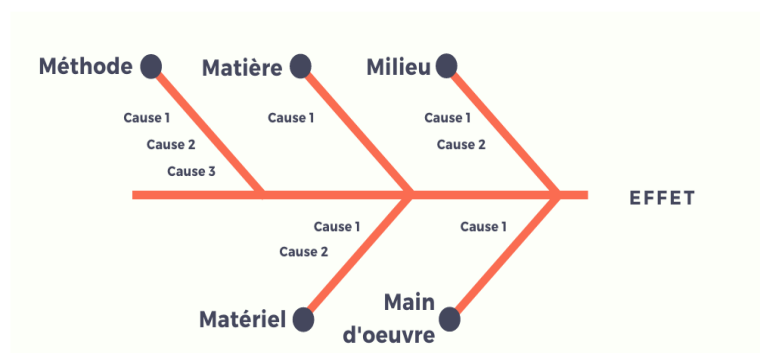


Figure I-6 diagramme d'Ishikawa

### I.5.3 Le QQQQCCP

C'est une méthode qui comporte un ensemble de questionnement par rapport à un problème précis, simple et rapide à utiliser. L'objectif est de prendre une problématique industrielle et de répondre à l'ensemble des questions suivantes :

- Qui ?
- Quoi ?
- Où ?
- Quand ?
- Comment ?
- Combien ?
- Pourquoi ?

Cette méthode permet de rassembler un ensemble d'informations qui nous permettront de mieux isoler notre problématique.

	<b>questions</b>	<b>finalité</b>	<b>Quoi ?</b>
<b>Quoi ?</b>	De quoi s'agit-il ? Que s'est-il passé ? Qu'observe-t-on ?	Description du problème, de la tâche.	Produit, action, procédure, machine...etc.
<b>Qui ?</b>	Qui est concerné ? Qui a identifié la situation?	Identification des parties prenantes actrices ou impactées.	Collaborateurs, clients, fournisseurs, partenaires...etc.
<b>Où ?</b>	Où cela se passe-t-il ? Dans quel service ? Quelle machine ?	Identification la plus précise possible du lieu d'occurrence.	Entité géographique, service, atelier, machine...etc.
<b>Quand ?</b>	A quel moment ? A quelle fréquence ?	Spécifications du moment d'occurrence, De la durée et de la fréquence	Mois, jour, heure, durée, fréquence.
<b>Comment ?</b>	De quelle manière ? Dans quel contexte ?	Analyse des procédures, des pratiques et de l'environnement.	Ressources et outils utilisés, procédures, mode opératoire...etc.
<b>Combien ?</b>	Quelle est le coût associé ? Quels sont les moyens et ressources engagés ?	Description des moyens, du matériel, des équipements engagés.	Perte engagée, nombre de ressources utilisées, déviation par rapport à la normale.
<b>Pourquoi ?</b>	Pourquoi cela se passe-t-il ?	Description des causes sous-jacentes	Manque de formation, de moyens, risques non identifiés,

Tableau I-1 Tableau récapitulatif de la méthode QQQCCP

#### I.5.4 Diagramme de Pareto

Appelé aussi méthode des 20-80, c'est une méthode qui consiste à analyser des pannes importantes, elle permet d'affirmer que 20% (voir moins) des causes sont responsables de 80% des problèmes les plus fréquents dans une usine, et alors d'analyser toutes les problématiques pour trouver des réponses les plus adaptées.

Pour mieux utiliser cette méthode, et avoir un aperçu de la situation, on doit nous munir des historiques de défaillance. Grâce à son module d'analytique, la GMAO nouvelle génération Mobility Work permet automatiquement de ressortir toutes les données afin de mieux les exploiter.

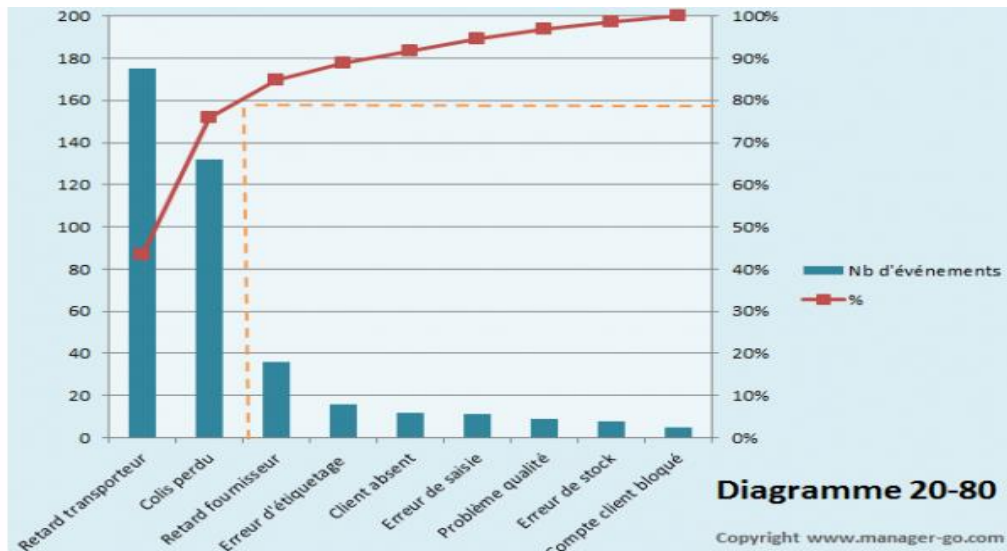


Figure I-7 exemple de diagramme de Pareto

### I.5.5 AMDEC [20]

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) a pour but de d'aider à mener une analyse poussée des interventions de maintenance et du parc machine. L'AMDEC permet de gérer notre maintenance industrielle puisque cet outil de sûreté de fonctionnement est aussi très utilisé dans le cadre de démarches qualité.

Pour l'utiliser au mieux, il suffit de suivre ces quelques étapes :

- Déterminer le mode de défaillance ainsi que la cause ;
- Mesurer les effets sur le système, la fonction touchée ainsi que le dommage induit ;
- Identifier les critères suivants :
  - **N** : Nombre de pannes
  - **F** : Fréquence
  - **G** : Gravité
  - **E** : Évidence ;
- Calculer la criticité d'après la formule suivante :  $\text{Fréquence} \times \text{Gravité} \times \text{Évidence}$ .

En résumé, cette méthode nous permet d'augmenter la production, et cela en limitant les problèmes de défaillance et d'analyser les défauts de production.

### I.6 L'importance de la maintenance industrielle dans l'entreprise

L'importance de la maintenance varie selon le secteur d'activité de l'entreprise. L'accent mis sur l'utilisabilité optimale de la recherche suppose que tout doit être fait pour éviter tout

échec. Ainsi, dans les secteurs où la sécurité est primordiale, la maintenance sera inévitable et lourde. Au contraire, une fabrication à faible valeur ajoutée peut se contenter d'un entretien traditionnel et limité, cela veut dire :

- Importance fondamentale : nucléaire, pétrochimie, chimie, transports (ferroviaire, aérien, etc.)
- Importance indispensable : entreprises à forte valeur ajoutée, construction automobile.
- Importance moyenne : industries de constructions diversifiées, coûts d'arrêts de production limités, équipement semi automatiques.
- Importance secondaire : entreprises sans production de série, équipements variés
- Importance faible ou négligeable : entreprise manufacturière, faible valeur ajoutée, forte masse salariale.

## **I.7 Les principales techniques de diagnostic**

### **I.7.1 Analyse vibratoire**

L'analyse vibratoire est l'un des moyens utilisés pour suivre le bon fonctionnement des machines tournantes et la détection d'éventuels dysfonctionnements menaçant la machine de la survenue d'une panne ou d'un arrêt de fonctionnement, et cela grâce aux signaux vibratoires continuellement recueillis sur la machine tournante. On pourra ainsi suivre l'évolution de ces défauts en temps réel afin de planifier ou reporter une intervention mécanique. [13]

### **I.7.2 Analyse d'huile et de lubrifiants**

C'est une technique qu'on peut appliquer à toutes les machines contenant un fluide (huile ou graisse) que l'on peut prélever, cette méthode consiste à détecter les particules d'usure drainées par le lubrifiant afin d'en déduire l'état de l'équipement. L'analyse d'un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile peut alors suffire à révéler l'usure anormale de l'un des composants, le mauvais état d'un filtre ou encore la dégradation du lubrifiant suite à une oxydation, à une pollution, à une température d'utilisation trop élevée. [13]

### **I.7.3 Contrôle non destructif (CND)**

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes permettant la caractérisation d'un état d'intégrité de matériaux ou de structures sans les dégrader, que ce soit au cours de la production, en cours d'utilisation ou dans le cadre de maintenances. On parle également d'essais non destructifs (END), ou d'examen non destructif. [13]

### I.7.4 Analyse acoustique

Elle consiste à libérer l'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires (émission acoustique) qui accompagne un processus évolutif. Elle est exploitée pour suivre les propagations des défauts dans les structures qui sont soumises à des contraintes mécaniques, chimiques .... Cette méthode peut être utilisée pour la détection de grands nombres de dégradations affectant les structures.

### I.8 L'importance de l'analyse vibratoire dans le diagnostic de défaillances [13]

L'analyse vibratoire est un révélateur de l'état de dégradation du bien. Le choix des indicateurs dépend essentiellement de leur capacité à décrire l'installation surveillée, On peut citer de manière non exhaustive, les contrôles de bruit, l'usure, la température, l'analyse d'huile, la mesure de vibrations.

Ce dernier critère est le plus souvent utilisé en raison de son efficacité, de sa réactivité, de sa facilité de mise en œuvre et de la richesse des résultats obtenus. Il est non seulement l'outil de base de maintenance mais aussi de contrôle qualité dans le cas d'un procédé vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état. Mais la corrélation de plusieurs critères permet d'affiner les diagnostics.

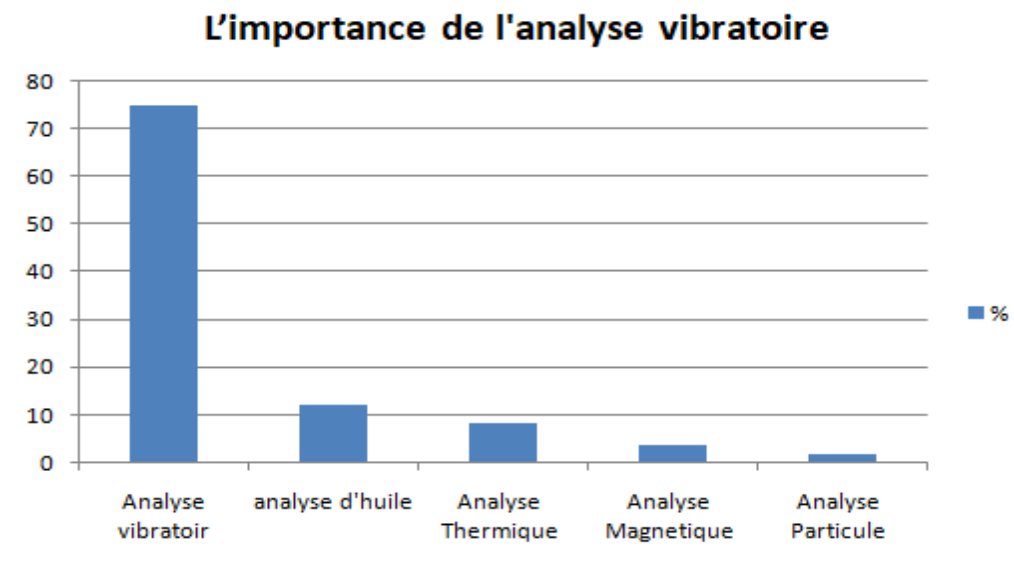


Figure I-8 importance des technique de diagnostic vibratoire

	<b>Principaux avantages</b>	<b>Principales limitations</b>	<b>Champ d'utilisation</b>
<b>Analyse vibratoire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-détection de défauts à un stade précoce.</li> <li>-possibilité de réaliser un diagnostic approfondi</li> <li>-autorise une surveillance continue</li> <li>-permet de surveiller l'équipement a distance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-spectres parfois difficiles à interpréter.</li> <li>-installation relativement couteuse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, délignage, jeux...etc.)</li> </ul>
<b>Analyse d'huile et de lubrifiants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement.</li> <li>-possibilité de connaitre l'origine de l'anomalie par analyse des particules.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-dans certains cas cette technique ne permet pas de localiser précisément le défaut.</li> <li>-nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant.</li> <li>-détection d'un manque de lubrification.</li> <li>-analyse des éléments d'usure.</li> <li>-analyse des contaminations par le processus étanchéité.</li> </ul>
<b>CND</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation.</li> <li>-interprétation immédiate des résultats.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-détection des défauts a un stade moins précoce que l'analyse vibratoire.</li> <li>-ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-les pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique.</li> <li>-Les pièces a cout de production élevé.</li> </ul>

Tableau I-2 Différentes technique du diagnostic et leurs utilisations

## I.9 Activités de l'analyse vibratoire

### I.9.1 La surveillance

L'objectif est de suivre l'évolution de l'état d'une machine par les comparaisons des relevés successifs de ses vibrations. La hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature, est habituellement synonyme d'un mauvais fonctionnement probable. Cette signature est alors établie à partir des premières mesures sur la machine révisée ou neuve. [21]

### **I.9.2 La détection**

Pour détecter les différentes défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales, cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales.

### **I.9.3 Le diagnostic**

Il permet de désigner les éléments défectueux de la machine suite à une évolution anormale des vibrations constatées lors de la surveillance. Le diagnostic est réalisable que lorsque la surveillance a permis la détection d'une anomalie ou d'une évolution dangereuse du signal vibratoire (figure). Le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par la machine en fonctionnement. [22]

### **I.9.4 Indicateurs de surveillance**

Il existe différents indicateurs de surveillance du niveau vibratoire d'une machine permettant la détection ou le suivi de l'évolution d'un défaut ou d'un ensemble de défauts. Parmi ces indicateurs on trouve d'après [23] :

- Les indicateurs scalaires dérivant de la puissance et de l'amplitude crête du signal vibratoire (valeur efficace « RMS », valeur crête, facteur de crête, Kurtosis) ;
- Les indicateurs spectraux permettant le suivi de l'évolution de la signature vibratoire (spectre à résolution constante, spectre à pourcentage de bandes constant) ;
- Les indicateurs spécifiques associés à la détection précoce d'un défaut particulier (amplitude d'une raie spectrale, amplitudes des harmoniques spectraux).

L'évolution de ses indicateurs permet un déclenchement d'alerte d'une dégradation des fonctionnements, sans pour autant désigner les éléments défectueux.

### **I.10 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à la notion de la maintenance et ses bases, nous avons vu les différents types et stratégies de maintenance en générale, particulièrement à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire et son importance capitale dans les industries, dont l'objectif est de mieux gérer les interventions, en fonction d'état réel des organes, d'une machine, de leur usure ou dégradation.

# Chapitre II

## Défauts rencontrés sur une machine tournante.

## II.1 Introduction

Le diagnostic industriel possède des applications dans les domaines de la conduite et dans la maintenance des procédés industriels et il est primordial de définir et de préciser sans ambiguïté les notions de défaillances, pannes et défauts. En effet, les actions techniques à mener sont de nature différente dans la conduite et la maintenance. Lors d'un dysfonctionnement constaté lors de la conduite d'une installation industrielle, l'équipe de conduite devra mettre en œuvre rapidement, après diagnostic, la procédure adéquate pour revenir à un fonctionnement sur de l'installation. Ici le temps de réaction joue un rôle prépondérant. Pour les activités de maintenance préventive ou prévisionnelle, la contrainte temps est souvent moins contraignante et les actions techniques sont différentes.

## II.2 Définitions

### II.2.1 La défaillance [2]

C'est l'altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise. Il existe deux formes principales de défaillances :

- **Défaillance partielle** : altération ou dégradation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.
- **Défaillance complète** : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

### II.2.2 Analyse vibratoire

C'est une technique qui est généralement utilisée pour le suivi des machines tournantes en fonctionnement. Les variations des efforts qui sont générés par la rotation des éléments sont généralement les principales causes des vibrations qui peuvent endommager les composants de la machine. La mesure des vibrations va donc permettre d'identifier ces efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils aient causé de dommages irréversibles. [13]

## II.3 Principaux défauts rencontrés sur les machines tournantes.

Le diagnostic d'un état d'une machine n'est possible que si les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée est connu. La connaissance des images vibratoires générées par ces défauts permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine.

Il faut établir alors la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et, par déduction, entreprendre les analyses complémentaires et rechercher d'autres symptômes pour se diriger progressivement vers l'hypothèse la plus probable. [10]

Localisation de défauts	Le pourcentage (%)
Arbres	60
Paliers	19
Dentures	10
Carters a	7
Autres	4

Tableau II-1 Statistiques des causes de défaillances.

### II.3.1 Déséquilibre

#### II.3.1.1 Défaut de balourd [24] [25]

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il est impossible de faire coïncider parfaitement l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor. Il en résulte l'apparition des forces centrifuges proportionnelles à la vitesse de rotation qui déforme le rotor. Le balourd provient généralement de défaut d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont les conséquences :

- D'une altération mécanique : perte d'ailettes, érosion ou encrasement.
- D'une altération thermique : déformations suites aux dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées

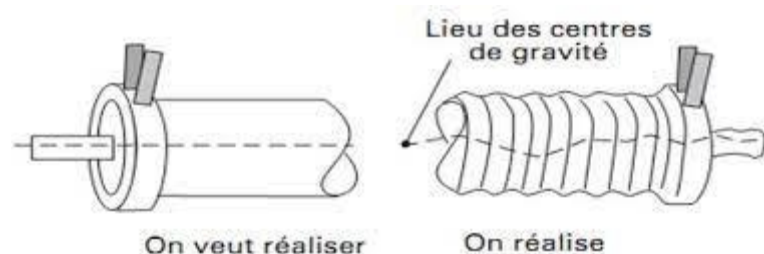


Figure II-1: tolérance d'usinage sur un rotor [24]

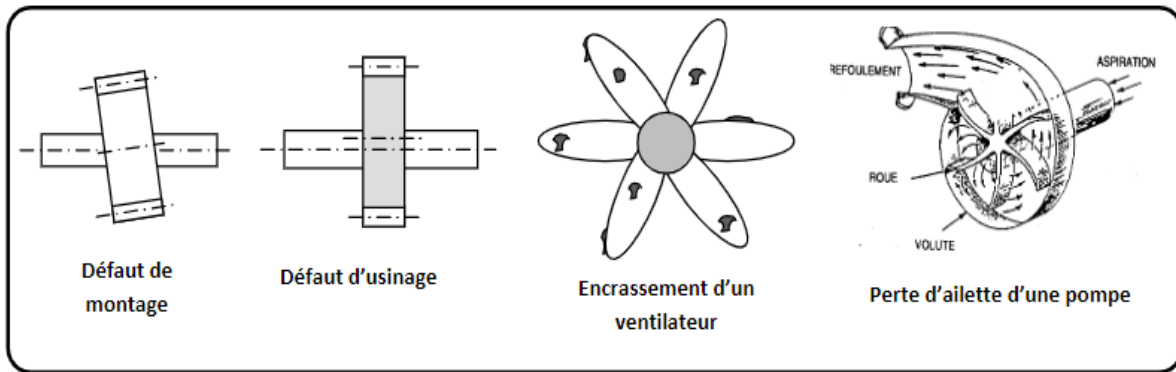


Figure II-2 : Exemples de défauts induisant un balourd

### II.3.1.2 Signature vibratoire [25]

Si on mesure l'amplitude du signal vibratoire délivrée par un capteur qui est placé sur le palier supportant un rotor déséquilibré (figure II.3), on remarque que l'amplitude sera maximale lorsque la masse sera en haut du rotor et elle sera minimale lorsqu'elle sera en bas, et ainsi de suite, à chaque tour du rotor. Le signal vibratoire est périodique de période 1 tour, donc de fréquence égale à la fréquence de rotation du rotor

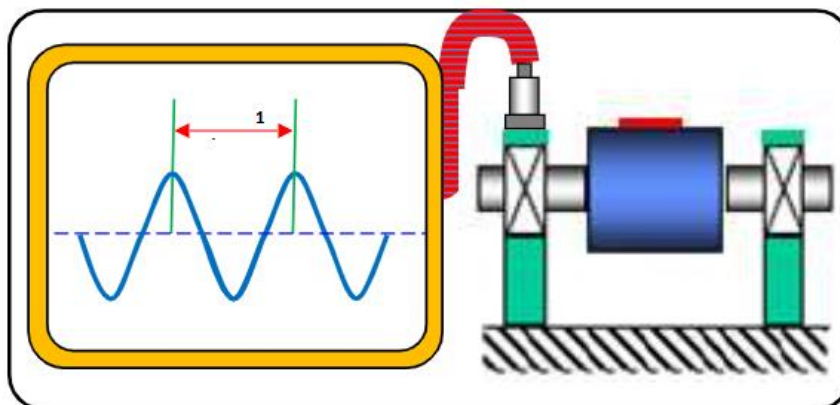


Figure II-3: signal vibratoire généré par un balourd

Le balourd va alors induire, dans un plan radial, une vibration dont le spectre présente une composante dont la fréquence de base correspond à la fréquence de rotation  $f_r$ . Elle représente alors le pic le plus élevé avec des pics d'amplitude plus faible sur les harmoniques de  $f_r$  (figure II.4). La bande de mesure est conçue de façon à prendre en compte de légères variations autour de la vitesse de rotation affichée par le constructeur.

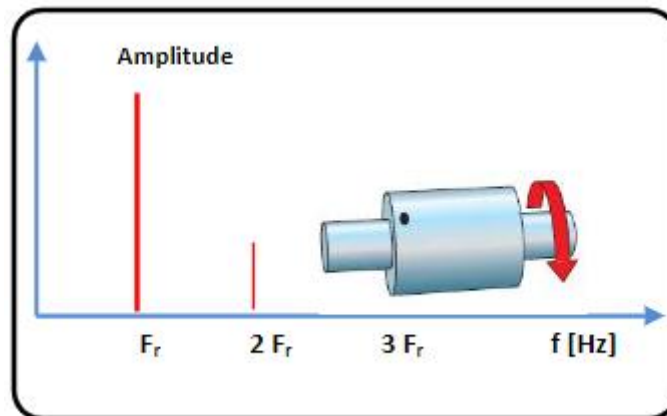


Figure II-4 spectre théorique d'un défaut de balourd [25]

## II.3.2 Défaut d'alignement

### II.3.2.1 Définition

Les défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

### II.3.2.2 Désalignement d'arbre accouplés

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux. (Figure II.5)

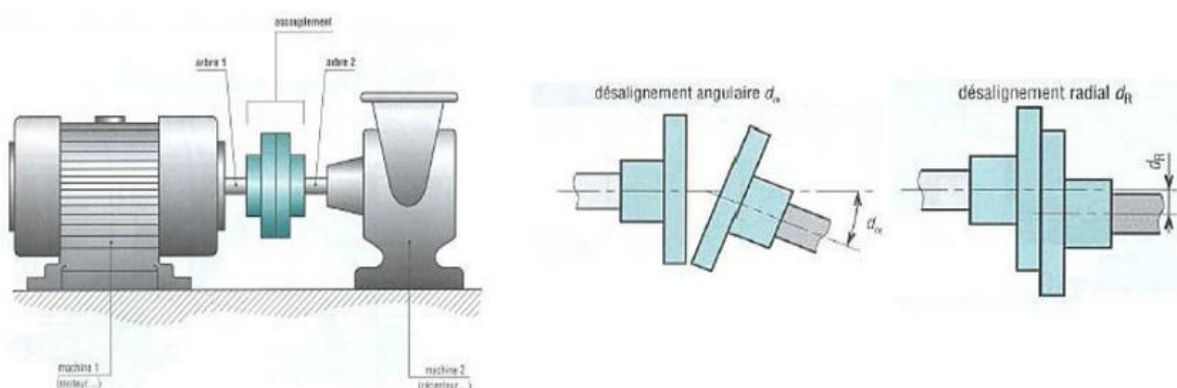


Figure II-5: défaut d'alignement d'arbre. [25]

#### a) Désalignement radial

Le signal temporel d'un défaut de désalignement est représenté dans la figure 05. On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période= 1tour), mais également des phénomènes qui se répètent 1/2 tour et 1/3 tours. Cela va se traduire le plus souvent par la

présence des composantes de l'ordre 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1.

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante à généralement, 2 fois la fréquence de rotation. Il apparaît une vibration dans la direction **radiale** de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voir exceptionnellement d'ordre 4). Avec des amplitudes supérieures aux composante d'ordre 1. [25]

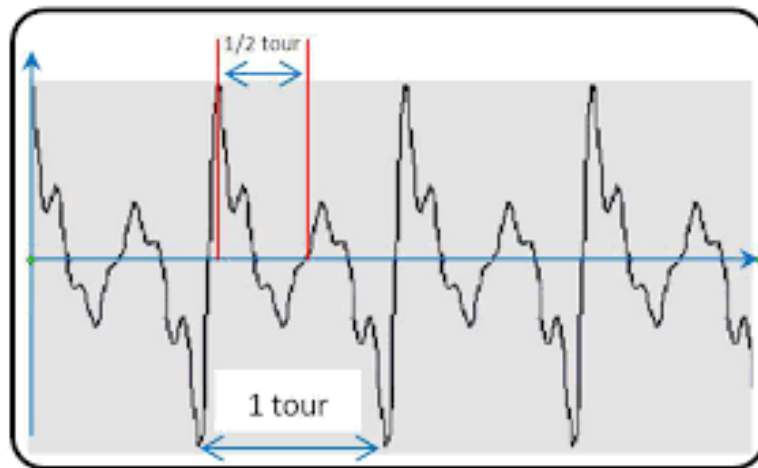


Figure II-6: Signal temporel d'un défaut d'alignement [25]

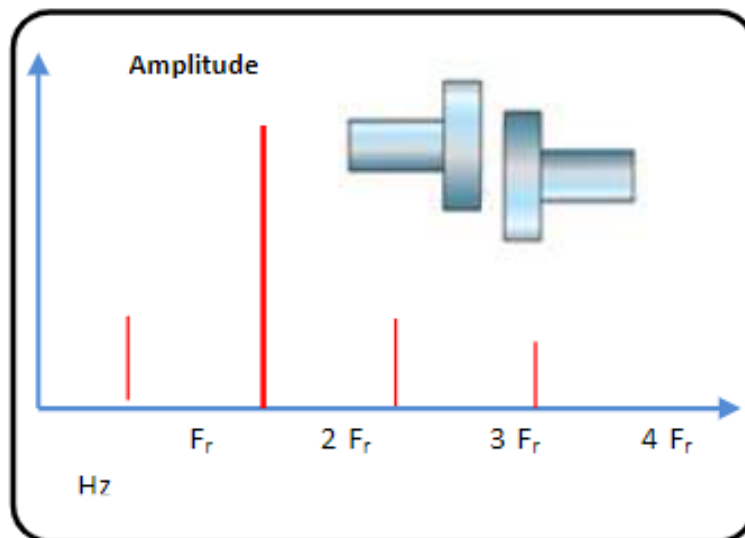


Figure II-7: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial [25]

### b) Désalignement angulaire.

Il apparait une vibration **axiale** de composante d'ordre 1, 2, 3 ou 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celle des composantes radiales correspondantes. (Figure II.8)

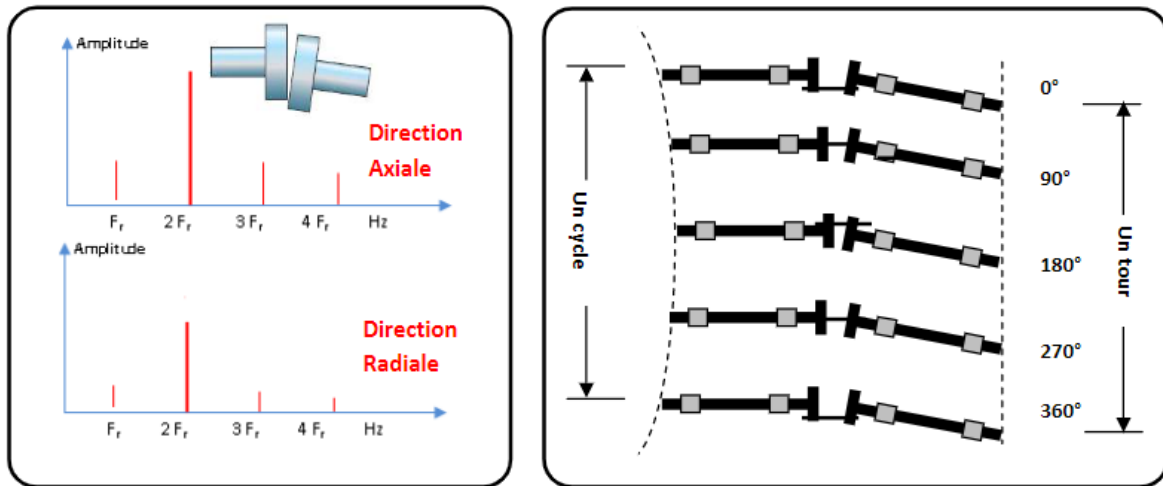


Figure II-8: Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire [24] [25]

#### II.3.2.3 Désalignement des paliers

Les axes des deux paliers d'un même corps de la machine ne sont pas concentriques (figure II.9). Cette anomalie est due peut-être à un défaut de montage d'un palier, également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

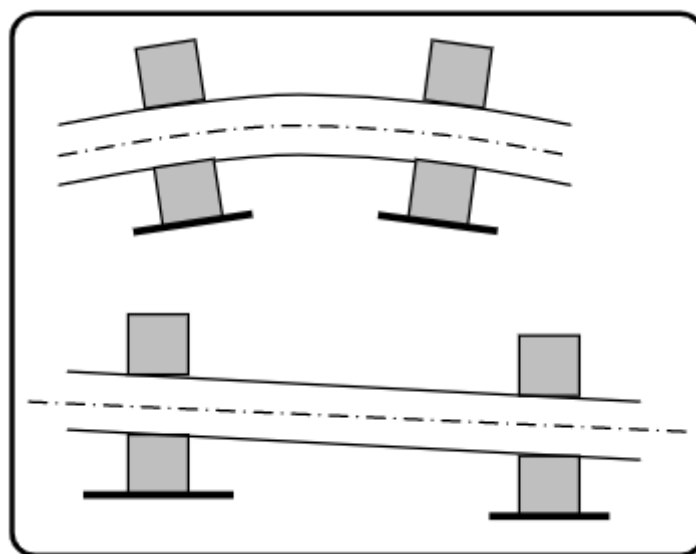


Figure II-9: Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre [25]

La manifestation spectrale de ce type de désalignement est quasiment identique à celle du désalignement angulaire.

### II.3.3 Défaut de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation.

Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique  $\frac{1}{2}$  ( $\frac{1}{2} \times$  la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais serrage

La figure II.10 nous montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz

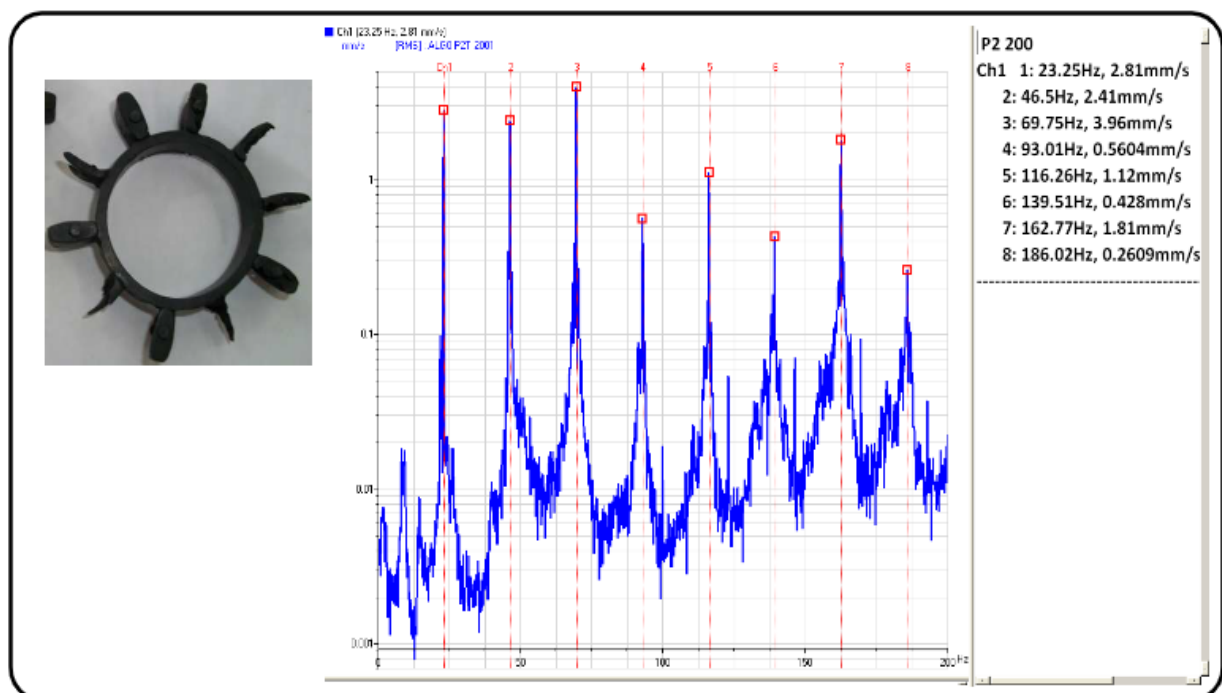


Figure II-10: Défaut d'usure d'accouplement [25]

### II.3.4 Défaut de transmission par courroie

#### II.3.4.1 Définition

La courroie est un organe de transmission d'un arbre moteur à un arbre récepteur. [21]

Bien que l'utilisation des courroies présente beaucoup d'avantages par rapport à une transmission à engrenages, notamment elle émet moins de bruit et elle s'use moins vite et

aussi elle n'a pas besoin de lubrifiant, néanmoins cette transmission par courroies peut être cible d'une multitude de défauts tels que :

- Les Déchirures transversales de la courroie (fissuration).



- Endommagement du dos avec présence de petits trous et risques d'effilochage.



- Déchirure et rupture nette de la courroie



- Détérioration ou arrachement des dentures



Les défauts qu'on vient de citer ci-dessus impliquent un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage  $F_c$  ce qui engendre des vibrations ou des pannes

### II.3.4.2 Fréquence caractéristique [25]

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission et généralement lié à une détérioration localisée d'une courroie : partie arrachée, défaut de jointure (fig. II.11) impliquant un effort ou un choc particulier à **la fréquence de passage  $f_c$**  de ce défaut définie par :

$$f_c = \frac{\pi D_1}{L} f_1 = \frac{\pi D_2}{L} f_2$$

Avec :

$f_c$  : fréquence de passage de la courroie.

$D_1$  et  $D_2$ , diamètres des poulies 1 et 2.

$f_1$  et  $f_2$ , fréquences de rotation des poulies 1 et 2.

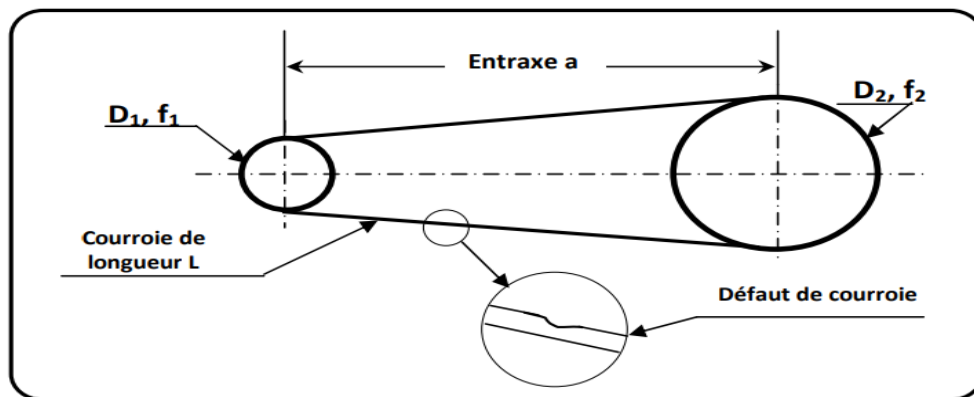


Figure II-11: schéma représentatif d'un défaut de courroie

### II.3.4.3 Signature vibratoire

L'image vibratoire de ce type de défaut donne des amplitudes importantes à la fréquence de passage de la courroie et ses harmoniques, comme le montre la figure II.12

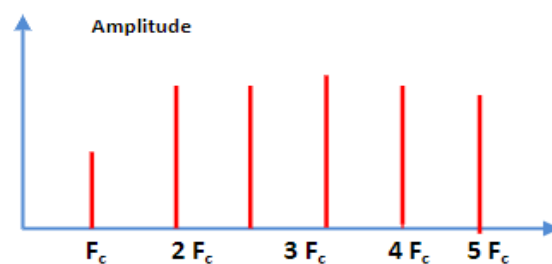


Figure II-12: Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroie

La figure (II.13) nous montre le spectre réel qui a été mesuré sur une transmission par polie courroie. On remarque bien la présence d'un pic à  $f_c$ ,  $2f_c$ ,  $3f_c$  et  $4f_c$ . (la fréquence  $f_c$  est de 8,17 Hz).

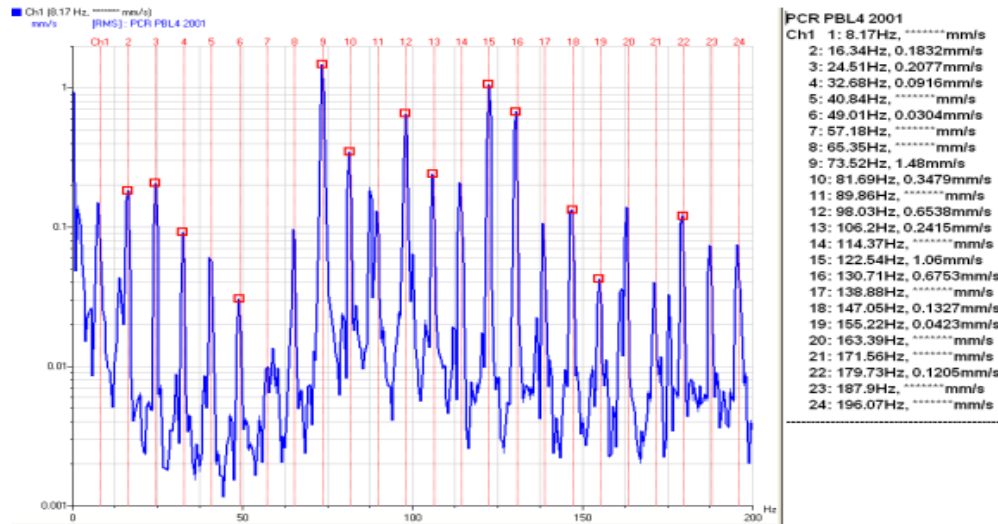


Figure II-13: spectre réel d'un défaut de transmission par courroies (la fréquence de passage est de 8,17 Hz) [25]

## II.3.5 Défaut de roulements

### II.3.5.1 Définition

Le roulement est un organe mécanique qui a pour rôle la transmission des efforts entre deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre tout en réduisant au maximum les frottements entre les deux pièces.

Il est constitué de quatre éléments différents :

- **Bague extérieure** : elle est montée dans un logement qui est ménagé dans un bâti fixe ou un moyeu tournant.
- **Bague intérieure** : elle est solidaire du tourillon de l'arbre tournant ou fixe.
- **Les éléments roulant** : ils permettent la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre.
- **La cage** : qui maintient l'écartement des éléments roulants et les empêche de frotter l'un contre l'autre.

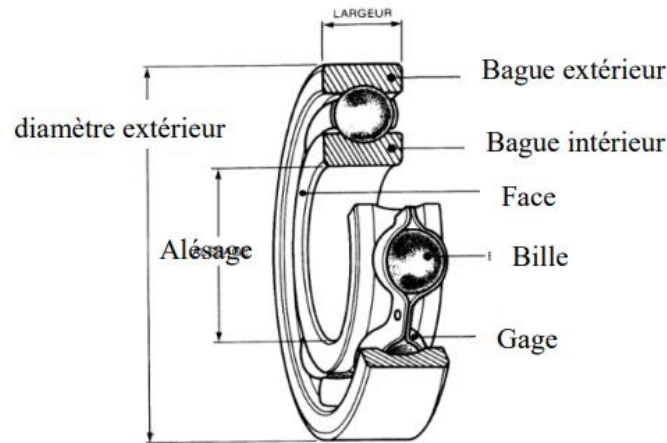


Figure II-14: éléments et caractéristiques qui constituent un roulement à billes.

### II.3.5.2 Principaux types de roulements [27]

#### II.3.5.2.1 Roulements à une rangée de billes à contact oblique

Dans un roulement à rangée de billes à contact oblique (Figure II.15), l'angle de contact des billes sur les pistes donne une capacité de charge axiale importante. Ce type de roulement est capable de supporter des charges axiales pures ou des charges combinées à condition que la proportion charge axiale sur charge radiale reste supérieure à une valeur qui dépend de l'angle de contact.

Ce type de roulement est généralement utilisé dans les moteurs électriques verticaux avec charge axiale, paliers de butée de pompe, machines-outils, roues avant d'automobiles.



Figure II-15: roulement a une rangée de billes à contact oblique.

#### II.3.5.2.2 Roulements à rotules sur deux rangées de billes

Ce type de roulement se compose de deux rangées de billes roulant sur deux pistes de la bague interne et dans la même piste sphérique de la bague externe. Il est utilisé dans les paliers de transmission et les ventilateurs centrifuges...etc.



Figure II-16: roulement a rotule sur deux rangées de billes

### II.3.5.2.3 Roulements à une rangé de rouleaux cylindriques

Ce roulement supporte des charges radiales assez élevées mais ne supporte pas de charges axiales. Il est utilisé dans les moteurs électriques, turbocompresseurs, boites de vitesse...etc.



Figure II-17: roulement à une rangée de rouleaux cylindriques

### II.3.5.2.4 Roulements à deux rangées de rouleaux cylindriques

Ces roulements comportent des éléments roulants cylindriques d'un diamètre relativement petit par rapport à leur longueur. Ayant une faible hauteur de section, il convient bien dans les applications où l'espace radiale disponible est limité. Leur capacité de charge est relativement élevée.



Figure II-18: roulement a aiguilles

### II.3.5.2.5 Roulements à rouleaux coniques

Les rouleaux de ce type de roulement sont rigoureusement coniques. Leur grande base rectifiée, sphérique, s'appuie contre un épaulement de la bague intérieure. Il peut supporter des charges plus élevées (contacte linéaire) que le roulement à une rangée de billes à contact

oblique, mais sa limite de vitesse est plus basse. Ce type de roulement est monté par paires en opposition. La bague externe appelée cuvette, est démontable, la bague interne avec sa cage et ses rouleaux est aussi appelée cône.



Figure II-19: roulement à rouleaux coniques

### II.3.5.3 Choix d'un roulement [27]

Le choix du type de roulement à utiliser dépend des exigences techniques propres à chaque cas (durée de vie exigée), importance des charges appliquées au roulement, vitesse de rotation, température de fonctionnement, lubrification, jeux...etc. il ne peut se faire que dans la connaissance parfaite des caractéristiques techniques de chaque type.

### II.3.5.4 Durée de vie d'un roulement ( $L_h$ ) [27]

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^n \frac{10^6}{60 \cdot N}$$

Avec :  $L_h$ : Durée de vie nominale de en heures de fonctionnement.

C : la charge dynamique de base en N

P : La charge dynamique équivalente en N.

$n$  : exposant,  $\left\{ \begin{array}{l} n = 3, \text{ pour roulements à billes} \\ n = \frac{3}{10} \text{ pour roulement à rouleaux} \end{array} \right\}$

N : le nombre de tours par minutes

### II.3.5.5 Principaux défaut de roulement. [28]

#### II.3.5.5.1 L'usure

Il existe deux modes d'usure :

**a- Mode d'endommagement continu :**

Dans des cas de faibles vitesses de rotation et de film fin, quand les interactions entre les rugosités de surface

**b- Mode causé par la présence d'un troisième corps**

Présence de débris d'usure dans l'huile, poussières, particules... ce qui engendre la création de cavités, des coincements des éléments roulants et l'entraînement de rotation des bagues par rapport aux éléments qui les contiennent.

**II.3.5.5.2 Le piquetage**

Un courant peut traverser les éléments d'un roulement et les arcs produisent des points chauds ou des fusions. Par suite de refroidissements rapides, le métal se trempe et des cratères se forment. Ces cratères sont caractérisés par des taches claires à bords sombres. Pour des courants faibles, l'altération est moins marquée et se traduit par des rainures. Figure (II.20).

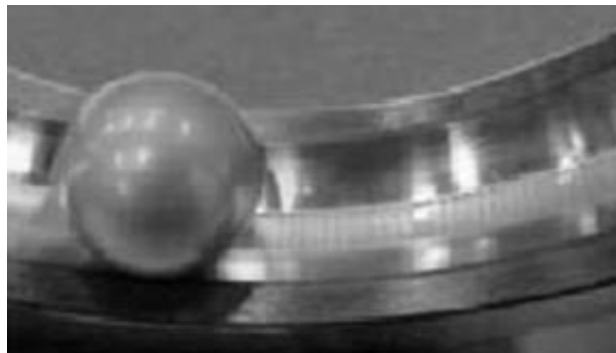


Figure II-20: Phénomène de piquetage observé sur une piste de roulement

**II.3.5.5.3 Le grippage**

C'est un mode d'endommagement instantané. Les matériaux en contact se soudent sous pression et température généralement dans des conditions de vitesse moyenne et élevée. Ce défaut résulte d'un manque de lubrifiant ; les contacts métal-métal entraînent des échauffements qui facilitent les micros soudures et le transfert de métal. Figure (II.21)

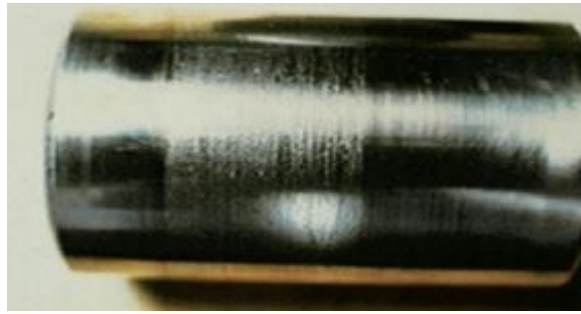


Figure II-21: Grippage d'une bague.

#### II.3.5.5.4 Rupture

La rupture des éléments est rare car elle est précédée par des craquelures dues à des charges élevées ou à des défauts tels que la portée réduite de la bague extérieure et la présence des contraintes résiduelles pendant l'usinage. Figure (II.22).



Figure II-22: Rupture des éléments d'un roulement

#### II.3.5.5.5 Ecaillage

L'écaillage est un enlèvement superficiel de métal, plus ou moins étendu, sous forme de paillettes fines. Il est attribué à une épaisseur de lubrifiant trop faible par rapport à la rugosité qui provoque des contacts métal sur métal. Le remède consiste essentiellement à diminuer la rugosité et à augmenter la viscosité du lubrifiant.

Ce type de défaut peut affecter la bague externe, la bague interne ou les éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

#### II.3.5.6 Fréquences caractéristique d'un défaut de roulement [25] [27] [28]

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. Pour chaque type de roulement et en fonction de ses côtes de fabrication. Figure (II.23)

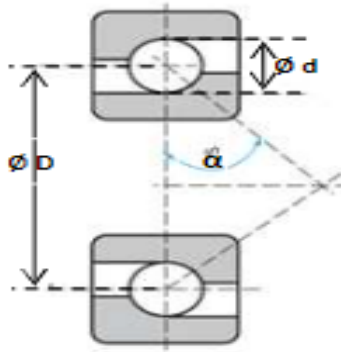


Figure II-23: Caractéristiques géométriques d'un roulement.

On peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous :

- **Bague extérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure " $Fb_{ext}$ " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{ext} = 0,5 f_r n \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right]$$

- **Bague intérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, supposée montée sur l'arbre tournant, " $Fb_{int}$ " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{int} = 0,5 f_r n \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right]$$

- **Billes**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne " $Fbille$ " est donnée par l'équation suivante:

$$Fbille = 0,5 f_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right]$$

- Cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage " ", est donnée par l'équation suivante :

$$F_{bille} = 0,5 f_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d \cos \alpha}{D} \right) \right]$$

Avec :

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

Ces différentes informations caractéristiques du roulement peuvent être fournies par le constructeur

### II.3.5.7 Signature vibratoire

La signature vibratoire théorique de ce type de défaut est représentée dans les figures suivantes :

#### a- Défaut de type écaillage affectant la bague externe

Un défaut du type écaillage qui affecte la bague externe d'un roulement donne une image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, une paire de bandes latérales est associée et espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante. Figure (II.24).

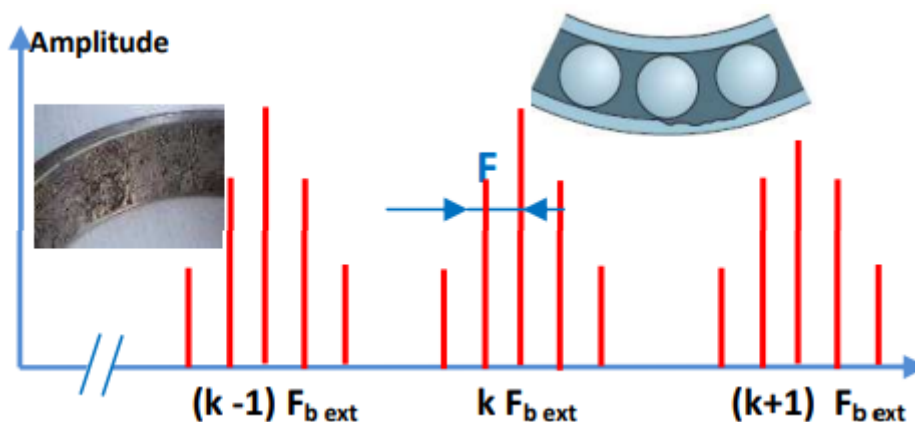


Figure II-24: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur la bague extérieure .

### b- Défaut de type écaillage affectant la bague interne

Un défaut de type écaillage qui affecte la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation. Figure (II.25).

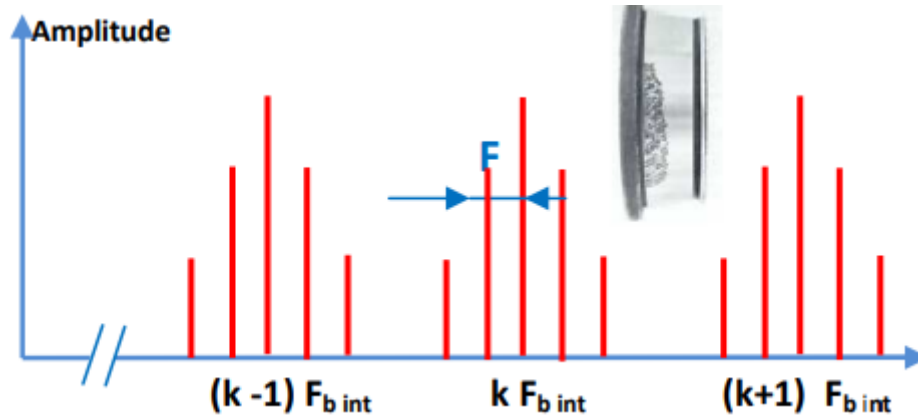


Figure II-25: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure

### a- Défaut de type écaillage sur un élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant, présente une image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante du peigne, plusieurs paires de bandes latérales sont associées et espacées de la fréquence de la cage. Figure (II.26).

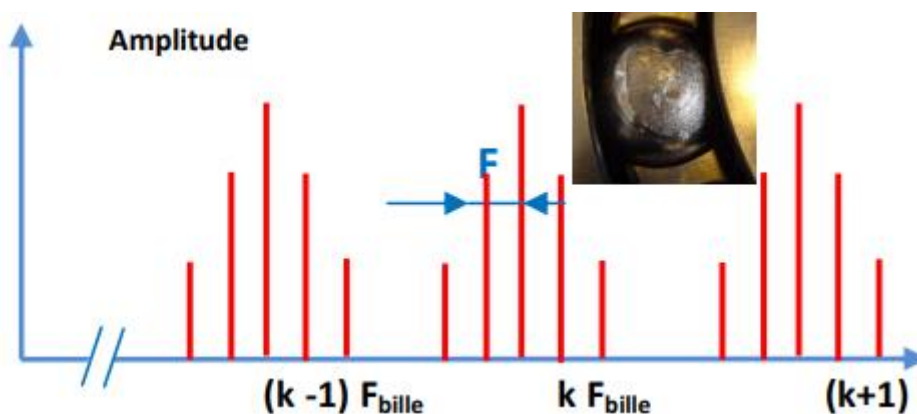


Figure II-26: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.

### II.3.6 Défauts d'engrenages

#### II.3.6.1 Définition

Les engrenages sont des éléments mécaniques qui permettent de transmettre le mouvement et la puissance mécanique entre deux arbres parallèles ou non, concourants ou non, perpendiculaires ou non. [29] [30].

Les engrenages peuvent avoir différentes utilités comme la variation de vitesse de rotation entre deux arbres avec une réduction ou augmentation du couple moteur. Ils constituent la principale source de vibrations dans une boîte de vitesse saine. Les sources d'excitations proviennent généralement de l'impact entre les dents des deux roues lorsqu'elles engrènent [31]

#### II.3.6.2 Principaux types d'engrenages [32]

##### A. Engrenage droit à denture droites pour arbres parallèles

Ce sont les engrenages les plus simples et les plus économiques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement et la puissance entre deux arbres parallèles. Les dents des deux roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

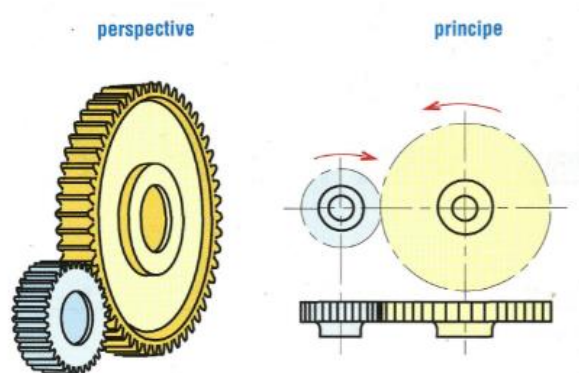


Figure II-27: engrenage droit à dentures droite.

##### B. Engrenages droits à dentures hélicoïdales

Ils sont très utilisés principalement en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres. A taille égale, ils sont plus performants que les précédents pour transmettre puissance et couple. En plus d'une meilleure progressivité et continuité de l'engrènement ils sont aussi bien plus silencieux. L'inclinaison de la denture engendre des efforts axiaux, suivant l'axe de l'arbre, qui doivent être supportés par les paliers et des couples supplémentaires qui accentuent le fléchissement des arbres.

**Remarque** : ils sont parfois utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres non parallèles et sont appelés engrenages gauches.

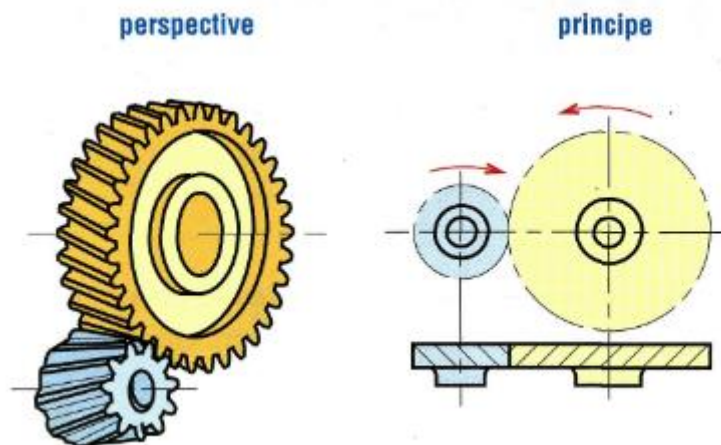


Figure II-28: Engrenages droits à dentures hélicoïdales pour arbres parallèles.

### C. Engrenages coniques

Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques. Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres concourants, perpendiculaires ou non. La denture peut être droite mais aussi hélicoïdale, ou spirale

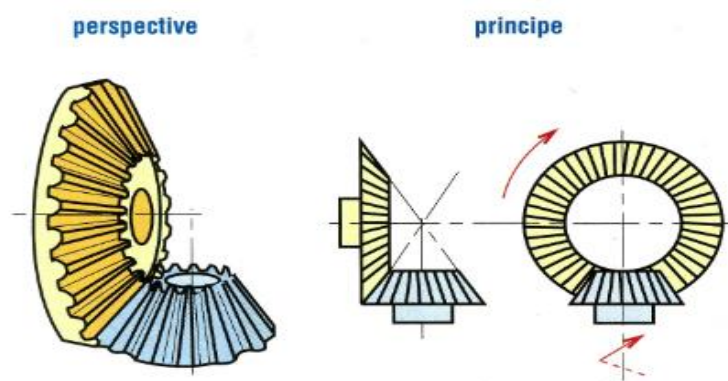


Figure II-29: Engrenage conique à denture droite pour arbres concourants

### D. Engrenages roue et vis sans fin

L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale. Le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture, filet à droite ou à gauche. L'irréversibilité est possible

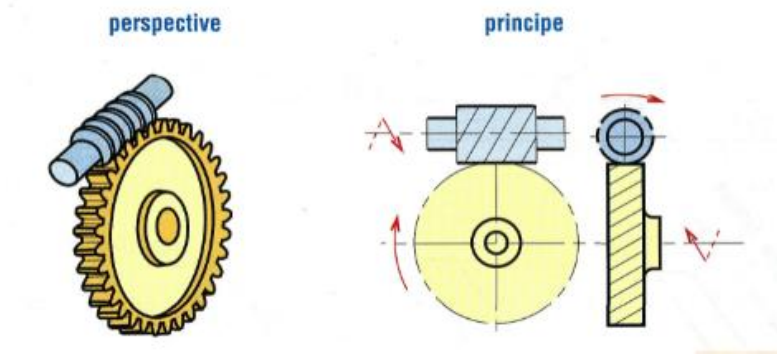


Figure II-30: Engrenages roues et vis entre arbres orthogonaux

### II.3.6.3 Principaux défauts d'engrenages

Selon [33] On distingue principalement deux catégories de défauts. Les défauts affectant toutes les dents et ceux localisés sur des dents particulières Parmi les défauts répartis, on trouve :

#### II.3.6.3.1 L'usure

L'usure est un phénomène local qui est 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

#### II.3.6.3.2 Les piqûres (pitting)

Il s'agit des trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. Le pitting est un endommagement 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 du film lubrifiant sur rugosité composite insuffisante pour éviter des contacts entre aspérités.



Figure II-31: représentation du Pitting

Les défauts localisés sur des dents particulières conduisent rapidement à la rupture de celles-ci [30] Parmi ces défauts, on trouve :

- **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 cimentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.

- **Le grippage**

Le grippage, est la conséquence 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 et 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.

- **La fissuration**

La fissuration 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 car ils 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. Ces fissures sont en général situées du côté de la dent sollicitée en traction.

#### II.3.6.4 Fréquence d'engrènement [25] [22] [28]

Observons un engrènement de deux roues dentées (1) et (2), ayant  $Z_1$  et  $Z_2$  pour nombre de dents et tournant à des fréquences  $F_1$  et  $F_2$ . A chaque fois qu'une dent de la roue

menante s'engage dans la roue menée, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement  $F_e$  qui est égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

On a : 
$$F_e = F_1 Z_1 = F_2 Z_2$$

Avec :

$F_e$  : 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.

Si la denture est en bon état, le spectre de la figure (II.32), est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques

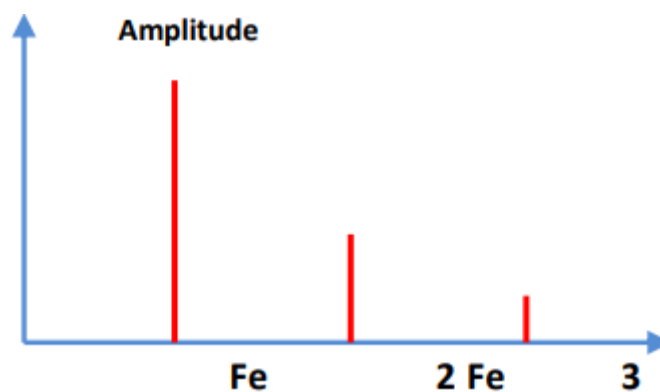


Figure II-32: : Image vibratoire d'un engrenage sain

### II.3.6.5 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

#### a) Détérioration d'une dent

Quand l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit alors un choc dur à chaque tour du pignon. Le spectre qui correspond (figure II.33) montre une forme qui ressemble à un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences.

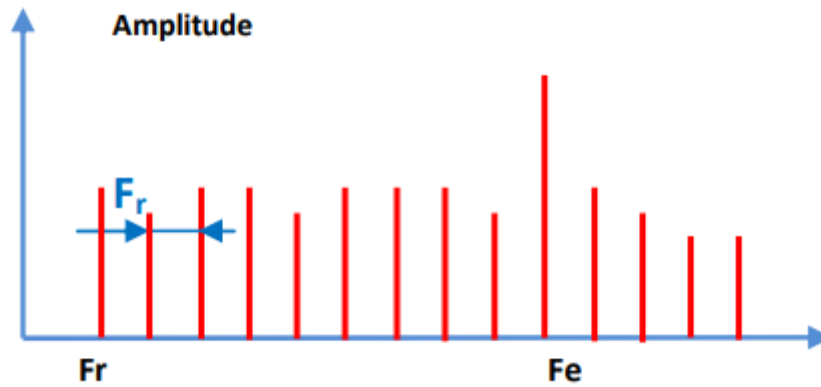


Figure II-33: image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

### b) Détérioration de deux dents sur les deux roues

S'il y a une dent détériorée dans chacune des deux roues dentées, les chocs pourront alors être importants lorsque les deux défauts se rencontrent « coïncidence ». La rencontre se fait à la fréquence  $F_{CO}$  appelée fréquence de coïncidence telle que :

$$F_{CO} = \frac{F_e}{PPCM(Z_1 Z_2)}$$

Avec :

$F_e$  : fréquence d'engrènement.

**PPCM** : plus petit commun multiple de  $Z_1$  et  $Z_2$

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  $F_{CO}$ .

### c) Détérioration de l'ensemble de dentures

Lorsque l'ensemble de la denture détériorée ou bien usée, 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.34). Le spectre peut présenter alors des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits.

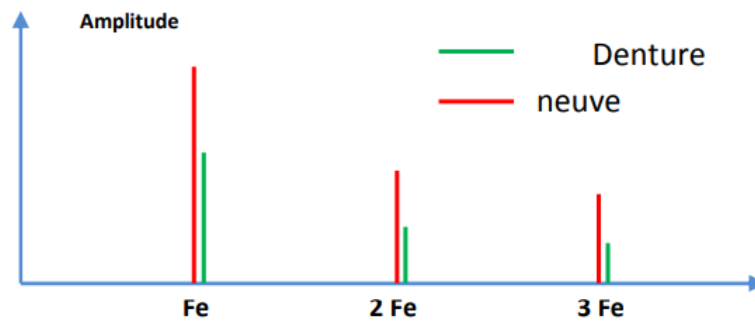


Figure II-34: Image vibratoire théorique d'une denture

#### d) Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)

Si l'entraxe des arbres qui porte les deux roues est insuffisant, il va se produire un engrenement en fond de denture. La dent menante force à l'engagement et au déengagement, c'est ce qui provoque une détérioration 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  $F_e$  et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence

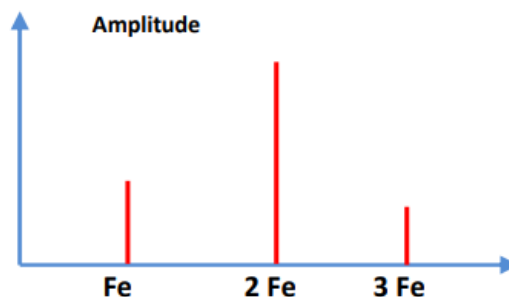


Figure II-35: Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture sur un réducteur

#### e) Jeu de fond de denture trop grand

Ce défaut représente une conséquence d'un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient donc un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement Figure (II.36).

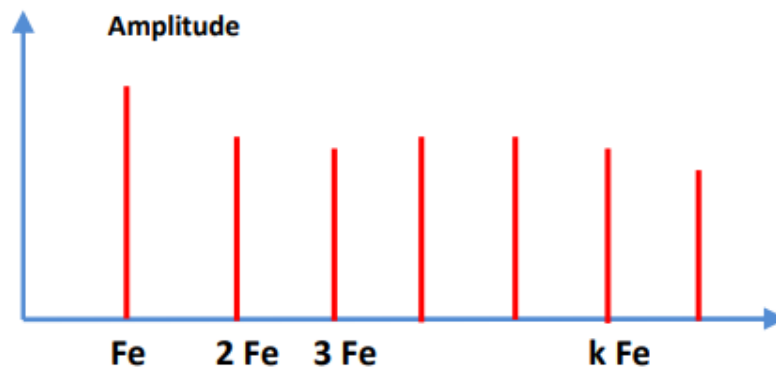


Figure II-36: Jeu de fond de denture trop grand

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 de la figure 30 (nombre et niveau des harmoniques élevées).
- Dû au montage, le spectre apparaît dès l'origine.

#### II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les principaux défauts qui peuvent affecter une machine tournante. Les compétences d'un connaisseur en diagnostic et en surveillance de machine tournante sont indispensables pour définir les techniques de traitement de signal adéquates pour chaque type d'installation. Alors, la fiabilité du diagnostic dépend essentiellement sur une bonne connaissance des différents défauts.

C'est pour quoi, la première étape d'une action de surveillance est de détecter les incidents les plus rencontrés sur la machine à surveiller, leur manière de se manifester et leur signature.

# Chapitre III

## Traitement du signal et transformée en ondelettes

### III.1 Introduction

Les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle en traitement du signal, et parmi ces dernières, la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822) [34]. Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal. Très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il s'est avéré que la décomposition obtenue par Fourier n'était pas toujours la plus satisfaisante. C'est alors, dans les années 40 que Gabor découvrait la première forme de la représentation temps-fréquence. Sa technique consiste à découper le signal en différentes plages de longueur fixée ou fenêtre [35] Chaque segment du signal limité par une fenêtre est étudié séparément des autres par l'analyse de Fourier. L'ensemble de ces transformées localisées forme la transformée de Gabor du signal.

Avec le temps, le géophysicien Jean Morlet s'était rendu compte que la méthode de Gabor que nous allons étudier dans ce chapitre, était inadéquate, car elle ne permettait pas d'obtenir une résolution suffisante, alors il a proposé en 1983, un procédé révolutionnaire : l'analyse et la synthèse par les ondelettes, qui permet d'analyser efficacement des signaux où se combinent des phénomènes d'échelles très différentes [36]. La transformée en ondelette a été créée pour résoudre des problèmes posés par la sismique-réflexion, et ensuite elle a été appliquée à l'analyse des sons, des images, et toutes formes de signaux.

Donc, le traitement du signal consiste à dégager des informations contenues dans un signal qui se déroule dans le temps. Plusieurs analyses et méthodes ont été développées dans ce sujet.

### III.2 Représentation fréquentielle (analyse de Fourier)

L'analyse de Fourier sert généralement à décomposer un signal en une somme de fonction élémentaire appelées **sinusoïdes** [35]. La recherche d'une fréquence dans un signal, c'est chercher une similitude entre ce signal et une sinusoïde de fréquence connue.

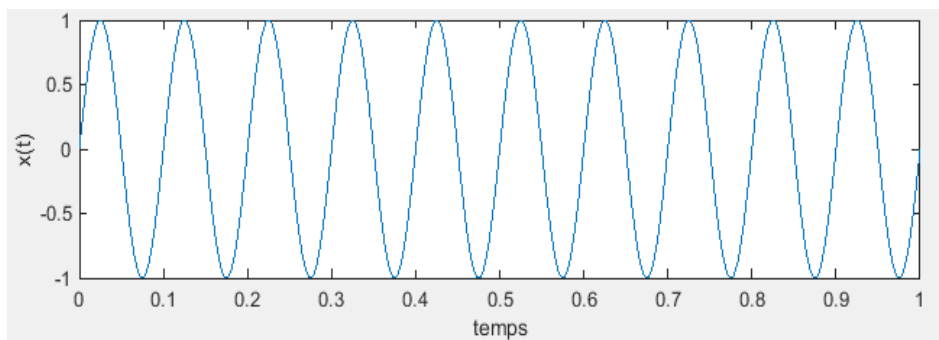


Figure III-1 signal sinusoïdal

### III.2.1 Définition 1

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif de la théorie du signal. Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information. [37]

### III.2.2 Transformée de Fourier [38] [35] [21]

#### III.2.2.1 Définition 2

L'analyse spectrale permet de décomposer un signal complexe en ses constituants de base. La représentation conventionnelle d'un signal tel qu'il est délivré par un capteur se fait dans le domaine temporel (amplitude en fonction du temps). L'analyse spectrale permet de représenter l'amplitude du signal en fonction de la fréquence

#### III.2.2.2 Rappel sur la série de Fourier

Toute fonction périodique  $S(t)$  de période  $T_0$  ( $= \frac{1}{f_0}$ ) peut être considérée comme la somme de fonctions sinusoidale de fréquence  $f$  multiple de la fréquence  $f_0$  dite fréquence fondamentale (décomposition en série de Fourier). Soit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2\pi n f_0 t + b_n \sin 2\pi n f_0 t \quad (\text{III.1})$$

Où  $a_n$  et  $b_n$  sont les coefficients de la série de Fourier calculés à partir des relations :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) dt \quad (\text{III.2})$$

Et pour  $n \geq 1$  :

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \quad (\text{III.3})$$

$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \quad (\text{III.4})$$

La décomposition fréquentielle de  $s(t)$  s'écrit :

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(2\pi n f_0 t + \Phi_n) \quad (\text{III.5})$$

Avec :  $c_n = 2\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  et  $\Phi_n = \arctan(-\frac{b_n}{a_n})$ .

Le spectre de Fourier d'un signal périodique est un spectre discret. Il est donc constitué d'une composante de fréquence nulle d'amplitude  $a_0$  et d'un peigne de raies espacées de  $f_0$  et d'amplitude  $c_n$ .

### III.2.2.3 Propriétés de la TF

$$E[s(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = a_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 + b_n^2 \quad (\text{III.6})$$

L'énergie transportée par un signal périodique est égale à la somme des énergies transportées par ses harmoniques.

Voici quelques exemples de décomposition en série de fourrier de quelques signaux simples :

#### a- Signal carré

Signal périodique dont le motif de base sur une période T prend successivement une valeur constante et opposée à chaque demi-période.

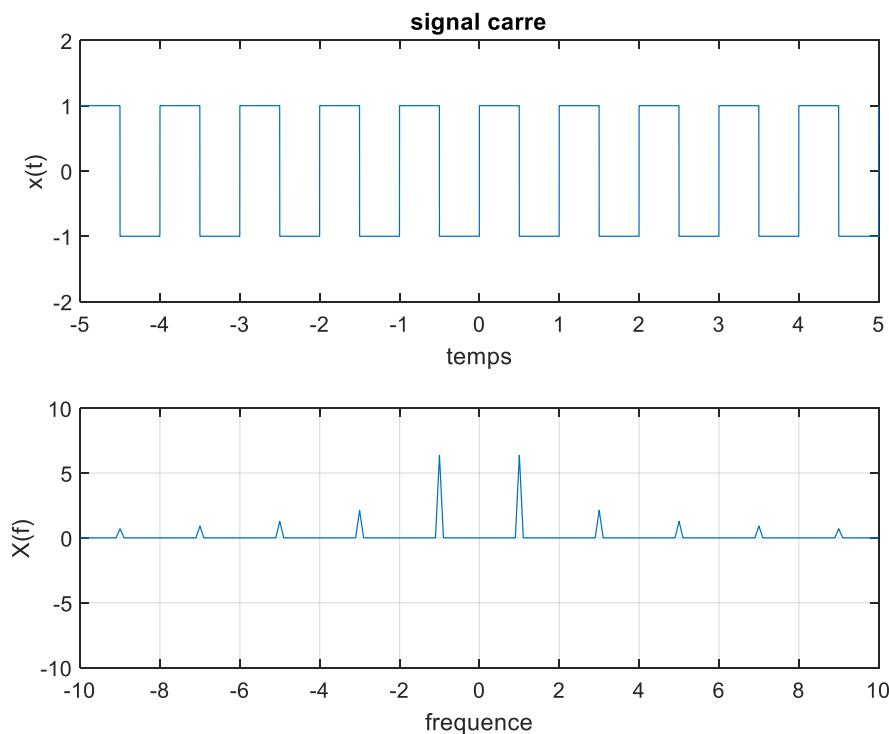


Figure III-2 signal « carré ».

Sa décomposition en série de fourrier s'écrit :

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left[ \sin \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{2\pi}{T} t + \dots + \frac{1}{(2n+1)} \sin(2n+1) \frac{2\pi}{T} t \right] \quad (\text{III.7})$$

#### b- Signal triangulaire

Signal périodique dont le motif de base sur une période T présente successivement deux pentes constantes de signe contraire au cours d'une période.

Sa décomposition en série de Fourier s'écrit :

$$x(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left[ \cos \frac{2\pi}{T} t - \frac{1}{9} \cos 3 \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{25} \cos 5 \frac{2\pi}{T} t \dots \frac{(-1)^n}{(2n-1)^2} \cos(2n-1) \frac{2\pi}{T} t \right] \quad (\text{III.8})$$

### c- Sinus redressé double alternance

Signal périodique dont le motif de base sur une période T représente la valeur absolue d'une sinusoïde.

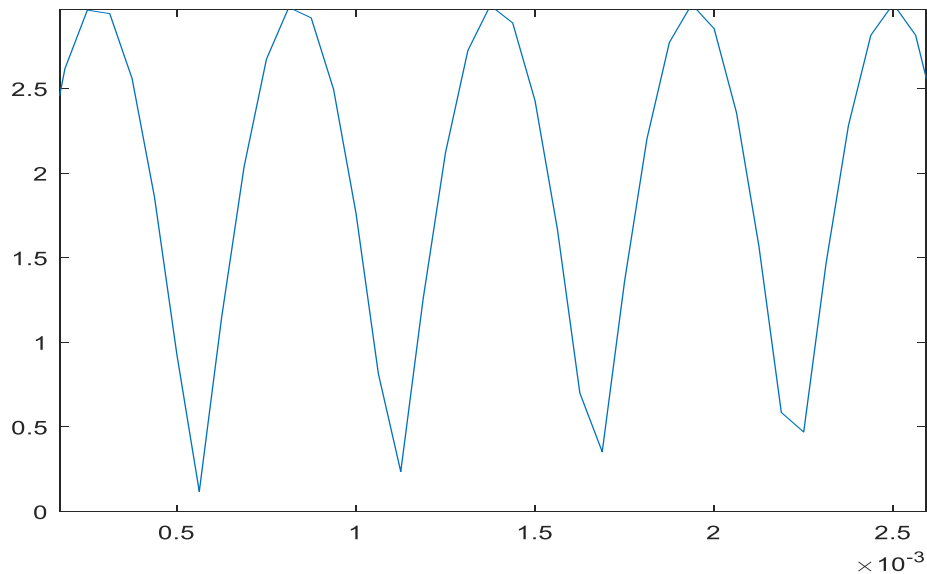


Figure III-3 signal sinus redressé double alternance

Sa décomposition en série de Fourier s'écrit :

$$x(t) = \frac{2A}{\pi} - \frac{4A}{\pi} \left[ \frac{1}{3} \cos 2 \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{15} \cos 4 \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{35} \cos 6 \frac{2\pi}{T} t \dots + \frac{1}{4n^2-1} \cos 2n \frac{2\pi}{T} t \right] \quad (\text{III.9})$$

### III.2.3 Produit de convolution

On appelle produit de convolution de deux fonctions  $f$  et  $g$  noté  $f * g$  la fonction  $z$  définie par l'intégrale :

$$z(x) = (f * g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(x-t)dt = \int_0^x f(t)g(x-t) \quad (\text{III.10})$$

Si  $f(t) = g(t) = 0$  pour  $t < 0$

Cet opérateur joue un rôle considérable en physique et en mathématiques du signal puisqu'il relie dans le domaine temporel la réponse  $s(t)$  d'un système linéaire à l'excitation d'entrée  $e(t)$  par l'intermédiaire de sa réponse impulsionnelle  $h(t)$ .

$$s(t) = h(t) * e(t) \quad (\text{III.11})$$

Le produit de convolution d'une fonction par un peigne de Dirac de pas  $T_0$  répète cette dernière identique à elle-même.

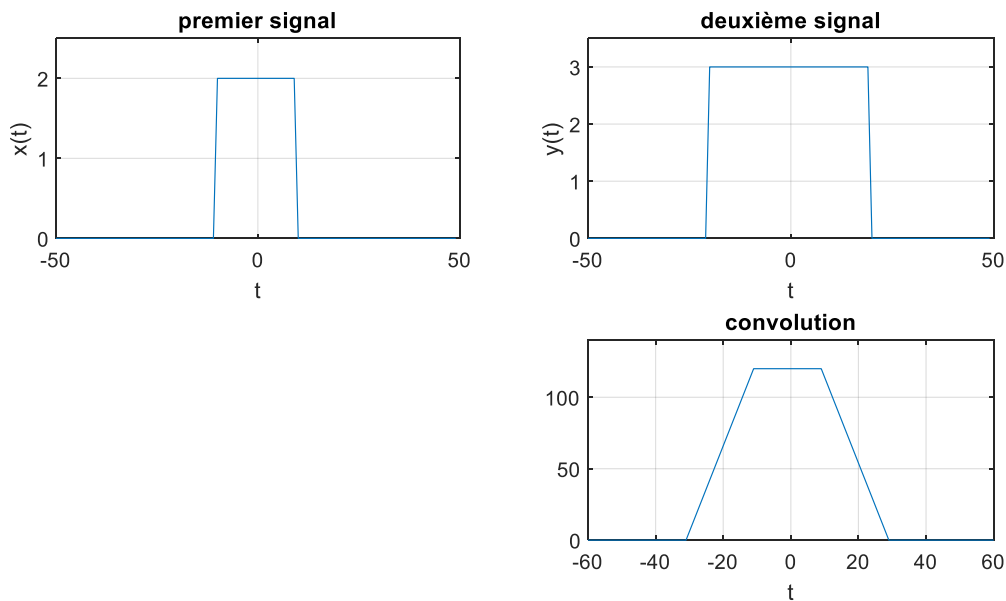


Figure III-4 produit de convolution d'une fonction par Dirac

### III.2.4 Transformée de Fourier discrète

Comme en général la fonction  $x$  est représentative d'un signal analogique non défini par une fonction mathématique simple, elle doit être échantillonnée en des points discrets.

Pour passer du domaine continu au domaine discret, on utilise la correspondance suivante :

$$t \rightarrow nt_e \quad f \rightarrow k\Delta f \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \rightarrow \sum_0^{N-1} \quad dt \rightarrow t_e$$

$t_e$  Représente le pas d'échantillonnage du signal temporel,

$n$  : le numéro de l'échantillon,

$k$  : le numéro de la ligne fréquentielle

$\Delta f$  l'intervalle entre deux lignes fréquentielles.

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \tag{III.12}$$

$$X(nt_e) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta f) e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \tag{III.13}$$

### Procédus de calcul de la TFD [38]

Le calcul de la transformée de Fourier discrète (TFD) nécessite en premier lieu d'échantillonner le signal. Le calcul doit s'effectuer sur un nombre fini  $N$  d'échantillons. Calculer la transformée de Fourier sur un nombre fini d'échantillons revient à assimiler le signal à analyser à un signal motif de durée  $\Delta t$  égale à  $N/f_e$ , ( $f_e$ : fréquence d'échantillonnage) et à le rendre périodique en le convoluant par un peigne de Dirac de pas  $\Delta t$ .

#### III.2.4.1 Effet échantillonnage [38]

Echantillonner un signal à la fréquence  $f_e = 1/t_e$ , ça revient à le multiplier par un peigne de Dirac de pas  $t_e$  et de poids 1. Dans le domaine fréquentiel, la convolution du spectre  $X(f)$  par un peigne de Dirac de pas  $f_e$  a pour effet de périodiser la fonction qui le représente avec pour poids  $f_e$ .

La fréquence de répétition correspond à la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ . Si l'étendue fréquentielle  $f_{max}$  du spectre est supérieure à la demi fréquence d'échantillonnage, les supports des fonctions  $X(f)$ ,  $X(f - f_e)$  et  $X(f + f_e)$  se recouvrent et les fonctions s'additionnent dans les zones de recouvrement. Le spectre du signal est donc altéré.

#### III.2.4.2 Effet fenêtrage

Définir un signal motif d'une durée  $\Delta t = N/f_e$  à partir de  $N$  échantillons consécutifs c'est multiplier le signal échantillonné par une fonction  $W(t)$  dont la valeur est nulle en dehors d'un intervalle de largeur  $\Delta t = N/f_e$ . Cette fonction est appelée « fenêtrage ». La fenêtrage la plus simple est la fenêtrage « rectangle » dont la valeur à l'intérieur de son intervalle de définition est égale à 1.

$$w(t) = 1 \text{ pour } |t| < \frac{\Delta t}{2}$$

$$w(t) = 0 \text{ pour } |t| > \frac{\Delta t}{2}$$

$$TF[w(t)] = \Delta t \frac{\sin \pi f \Delta t}{\pi f \Delta t} = Q_0(f) \quad (\text{III.14})$$

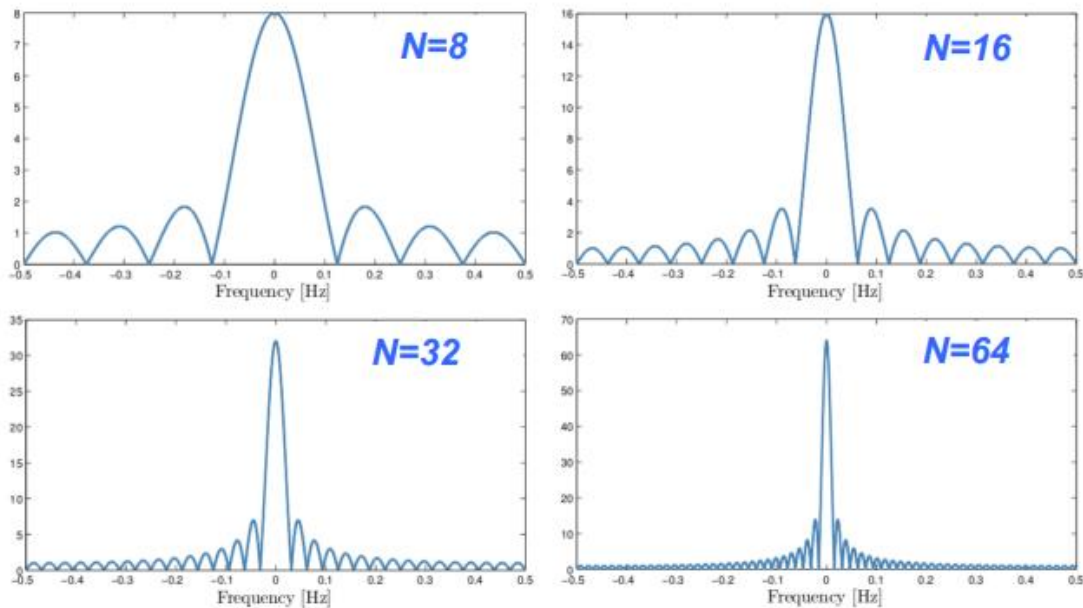


Figure -III-5: Effet de la largeur de la fenêtre (rectangulaire) d'observation  $N =$  nombre d'échantillons temporel

La multiplication du signal par une fenêtre temporelle de largeur  $\Delta t$  se traduit par une convolution de la transformée de Fourier de ce dernier par la transformée de Fourier de la fenêtre.

### III.2.4.3 Les limites de la transformée de Fourier

La transformée de Fourier repose sur le fait que les fonctions qui montrent un certain degré de régularité pouvant être représentées par une combinaison linéaire de sinus et de cosinus. La limitation de la durée des signaux dans le domaine temporel et l'échantillonnage des données dans le domaine fréquentiel limite la précision que l'on veut atteindre.

Il faut lors bien comprendre que la transformation de Fourier ne fait pas disparaître l'information (c'est une vertu d'un changement de base), autrement dit ; la TF localise la série de temps en fréquence, mais les résultats sont délocalisés dans le temps.

Comme le montre la figure suivante :

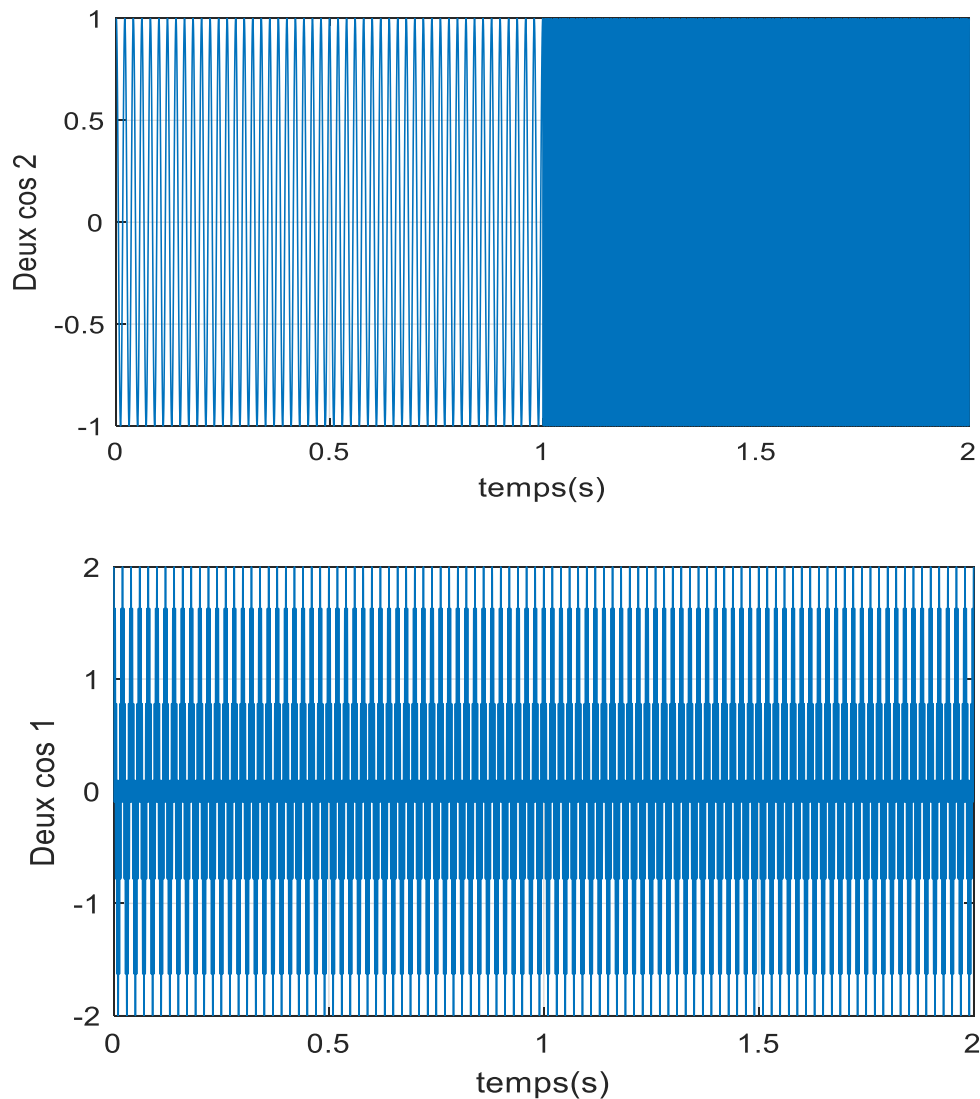


Figure III-6: transformée de Fourier d'un signal cosinus

Alors, il faut modifier la base de fonctions analysantes de façon à être capable de localiser les éventuelles non-stationnarités du signal. Une première idée, c'est de modifier la TF pour lui donner ce pouvoir de localisation, c'est l'idée d'utiliser la TF à fenêtre.

### III.2.5 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (à court terme)

Dans les années 1940, le physicien Dennis Gabor découvre la première forme de représentation temps-fréquence. Il obtient une analyse temporelle en découpant arbitrairement le signal en plage de longueur limitée. [35]

Chaque plage est centrée autour du paramètre  $b$  de localisation en temps est étudiée séparément des autres par l'analyse traditionnelle de Fourier, c'est-à-dire décomposer le signal sur des fonctions élémentaires qui dérivent toutes d'une même « fonction fenêtre »

La solution consiste à limiter le domaine d'intégration temporel à l'aide d'une fonction fenêtre que l'on pourra faire glisser pour explorer le signal ; on obtient ainsi la transformée de Fourier à fenêtre glissante (c'est-à-dire l'observation à court terme d'un signal à travers une fenêtre plus une analyse spectrale locale) :

$$F_w(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) G(t - \tau) e^{-2\pi j f (t - \tau)} \quad (\text{III.15})$$

$F(\tau)$  : signal à étudier

$G(t - \tau)$  : fonction introduisant la notion de fenêtre.

La fenêtre  $G(t)$  permet de prélever une partie du signal que l'on veut étudier. On remarque que la TFCT dépend du temps et de la fréquence en même temps. C'est ce qui permet de faire une analyse temps-fréquence du signal. Le choix de la fenêtre dépend à ce que cette dernière soit optimale vis-à-vis du principe de Heisenberg. Alors on déduit que l'analyse est loin d'être idéale car si une résolution temporelle faible est directement liée à la détection des basses fréquences, la détection des composantes à haute fréquence du signal peut être analysée avec une résolution temporelle supérieure.

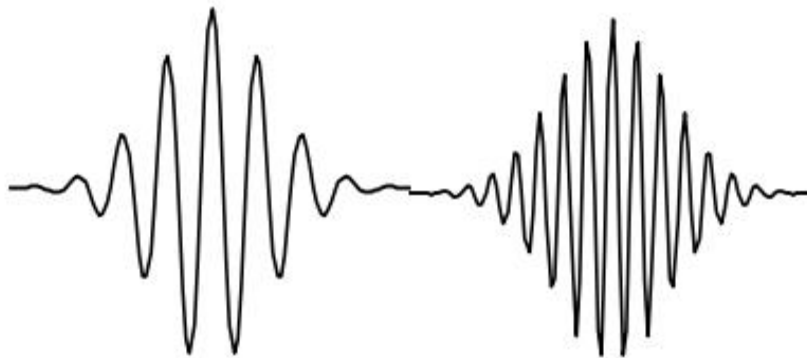


Figure III-7 : Fenêtre de la transformée de Fourier à court terme pour deux fréquences différentes

Les résolutions, temporelle et fréquentielle sont indépendantes, de sorte que le pavage de l'espace temps-fréquence est régulier.

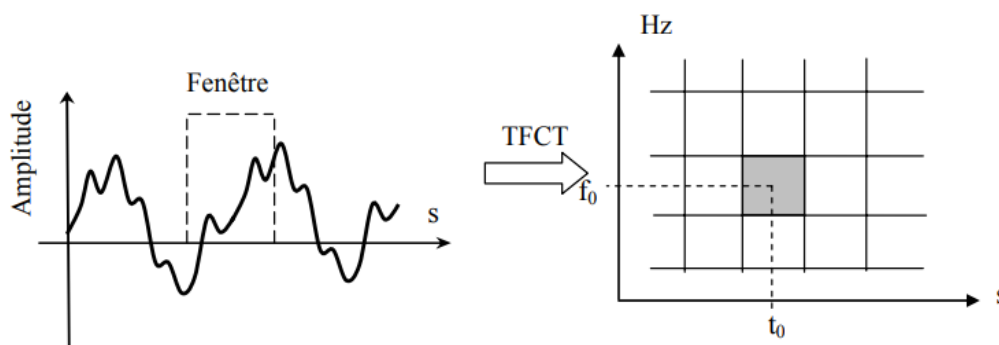


Figure III-8: Pavage temps-fréquence pour la TF à court terme

### III.2.6 Principe d'incertitude de Heisenberg [39]

Le principe d'incertitude nous dit que l'énergie d'une fonction et sa T.F ne peuvent être simultanément concentrée sur des intervalles arbitrairement petit. Le Dirac  $\delta(t - u)$  (au sens des distributions) a un support ponctuel  $t = u$ , mais sa T.F  $e^{-2\pi jf}$  a une énergie uniformément répartie sur toutes les fréquences. On remarque que  $|\hat{f}(\omega)|$  décroît rapidement dans les hautes fréquences seulement si  $f$  a des variations régulières dans le temps. Par conséquent, l'énergie de  $f$  doit s'étaler sur un domaine relativement étendu.

Pour réduire l'étalement temporelle de  $f$ , on peut dilater la fonction par un facteur  $s < 1$ , sans changer son énergie totale, si :

$$f_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} f\left(\frac{t}{s}\right) \|f_s\|^2 = \|f\|^2 \quad (\text{III.16})$$

### III.2.7 Inconvénient de l'analyse de Fourier

Même si la technique de l'analyse de Fourier a connu un immense succès, néanmoins elle représente beaucoup de défauts, en particulier son manque évident de localisation temporelle. En effet, l'analyse de Fourier permet de connaître et d'identifier les différentes fréquences excitées dans un signal, cela veut dire son spectre, mais ne permet en aucun cas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. Cette analyse procure une information globale et non locale, car les fonctions d'analyses qui sont utilisées sont des sinusoides, qui oscillent indéfiniment sans amortir.

Cette perte de localité ne représente pas un inconvénient pour une analyse des signaux dont la structure est stationnaire, mais elle devient un sérieux problème pour l'étude des signaux non stationnaires.

### III.3 Transformée en ondelettes [35] [34] [40] [42]

Pour analyser les composantes transitoires de différentes durées, il plus que nécessaire d'utiliser des atomes dont les supports temporels à des tailles variables. C'est pour cela que, la transformée en ondelettes décompose les signaux sur une familles d'ondelettes translatées et dilatées.

#### III.3.1 Définition 1 :

Une ondelette est une fonction  $\Psi$  qui oscille durant un temps données (dans le temps), ou sur un intervalle de longueur fini (dans l'espace)

#### III.3.2 Définition 2

La transformée en ondelettes est une fonction  $S(a, b)$ , qui associe aux paramètres  $a$  et  $b$  la valeur du coefficient  $C_{a,b}$  de l'ondelette  $\Psi_{a,b}$  dans la décomposition du signal.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.17})$$

La quantité  $b$  est le paramètre de localisation temporelle, alors que  $1/a$  est le paramètre de fréquences. Le coefficient  $C_{a,b}$  est égal à la somme en continu du produit du signal par l'ondelette  $\Psi_{a,b}$ .

L'expression de la transformée en ondelette est donnée par :

$$Wf(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.18})$$

Où \* représente le complexe conjugué.

#### III.3.3 Principe de la transformée en ondelettes [40] [38] [36]

La transformée en ondelettes permet en principe de résoudre les problèmes de la transformée de Fourier à Court terme (TFCT), c'est-à-dire quand le résolution temps-fréquence est faible, et la taille de la fenêtre qui reste constante. La transformée en ondelettes permet d'ajuster la taille de la fenêtre d'analyse aux caractéristique locale du signal, ce qui veut dire : quand la taille de la fenêtre est petite le signal varie rapidement (hautes fréquences), et lorsque les fenêtres sont grandes, ses variations sont lentes (basses fréquences), elle décompose le signal sur une base de signaux élémentaire.

En modifiant alors par des dilatations et des contractions successives la taille de l'ondelette analysante (ondelette mère ou de référence).

Si  $a \ll 1$ , l'ondelette  $\Psi_{a,b}$ . Devient très concentrée de l'ondelette mere  $\Psi(t)$  et le contenu fréquentiel penchera alors vers les hautes fréquences du plan d'analyse.

Si  $a \gg 1$ , l'ondelette  $\Psi_{a,b}$ .sera très large et le contenu fréquentiel sera penché vers les basses fréquences .

Si on fait varier le paramètre  $a$ , l'ondelette va conserver le même nombre d'oscillations .

L'ondelette analysante doit satisfaire à des conditions mathématiques d'admissibilité de telle manière que l'énergie doit être conservée et que le signal analysé puisse être reconstruit, pour cela, elle doit être oscillante et à moyenne nulle.

Le facteur échelle comporte à la fois un aspect translation dans le temps amené par le terme  $b$ , et aussi un aspect de dilatation à la fois en temps et en amplitude apporté par les termes  $a$  et  $\sqrt{a}$ . La dilatation en amplitude permet une conservation de norme constante pour tous les éléments de la base (l'énergie de l'ondelette.)

Le paramètre de fréquence sera remplacé par celui de de l'échelle, pour prendre en compte les hautes fréquences et les basses fréquences, on va contracter ou dilater l'ondelette de référence  $\psi(t)$

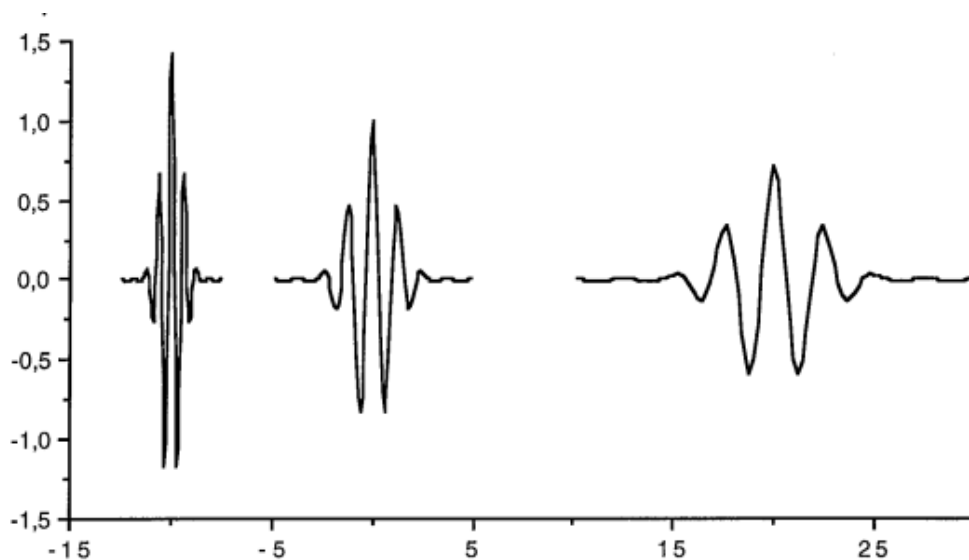


Figure III-9: générations d'ondelettes par dilatation et translation

### III.3.4 Les propriétés générales des ondelettes [42]

Nous allons nous intéresser à trois propriétés fondamentales des ondelettes.

#### a- La localisation

Les ondelettes sont des fonctions à la fois bien localisées en temps et en fréquences (ou nombre d'onde). Cette propriété obéit au principe :  $\Delta t \Delta f = \text{constante}$ .

$\Delta t$  est le support temporel de l'ondelette et  $\Delta f$  le support fréquentiel.

La constante sera supérieure ou égale à la valeur  $1/4\pi$  correspondant au cas d'une fonction gaussienne.

Cette propriété permet d'adapter la fenêtre d'analyse aux phénomènes qu'on veut étudier, la résolution en temps pourra devenir alors bonne pour les hautes fréquences et la résolution en fréquence arbitrairement bonne pour les basses fréquences.

#### b- Oscillation

Cette propriété se traduit par le nombre de moments nuls de l'ondelette, qui se mesure par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^j \Psi(x) dx = 0 \quad (\text{III.19})$$

Où  $j$  le nombre de moments nuls de l'ondelette. Cette équation représente le calcul des moments de l'ondelette. Tous les moments d'ordre inférieur à  $j$  sont nuls.

#### c- Régularité

Cette propriété a fait l'objet de nombreuses études (Daubechies 1988), l'ordre  $r$  de régularité d'une ondelette se traduit par :

- $\Psi$  est  $(r-1)$  fois continûment dérivable
- $\Psi$  est  $r$  dérivable presque partout.
- Pour tout  $m \in \mathbb{N}$  et pour tout  $n$  tel que  $0 \leq n \leq r$ .

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (1 + |x|^m) \left| \left( \frac{d}{dx} \right)^n \right|^2 dx < +\infty \quad (\text{III.20})$$

Cette définition est alors liée à celle de l'analyse multirésolution. Les propriétés de régularité et d'oscillation sont complémentaires.

### III.3.5 Transformée en ondelette continue [36] [41] [44]

Les coefficients de la transformée en ondelette continue correspondent aux termes de projection du signal à analyser, sur une base de fonctions élémentaires qui résulte de la dilatation et de translation d'une ondelette analysante.

Cette grandeur est le produit scalaire du signal  $x(t)$  et de l'ondelette  $\psi_{a,b}(t)$  :

$$C_w(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (\text{III.21})$$

L'ondelette analysante doit obligatoirement satisfaire à des conditions mathématiques d'admissibilité de façon à ce que l'énergie soit conservée et que le signal analysé puisse être reconstruit.

La forme gaussienne donne une localisation maximale dans l'espace temps-échelle, ou bien altitude-longueur d'onde verticale. Les propriétés de progressivité de l'ondelette de Morlet sont utilisées pour déterminer l'évolution de la phase des structures ondulaires.

Les coefficients  $C_w(a, b)$  qu'on affecte dans chaque fonction élémentaire  $\psi_{a,b}(t)$  pour la décomposition d'un quelconque signal, fournit une information directe sur les propriétés fréquentielle et temporelle du signal. Elles permettent ainsi de repérer avec précision l'apparition d'une fréquence donnée à un instant donné dans un signal.

La transformation en ondelettes continue (TOC) produit une représentation temps-échelle similaire à celle de la représentation temps-fréquence produite par la transformée de Fourier à court terme (TFCT).

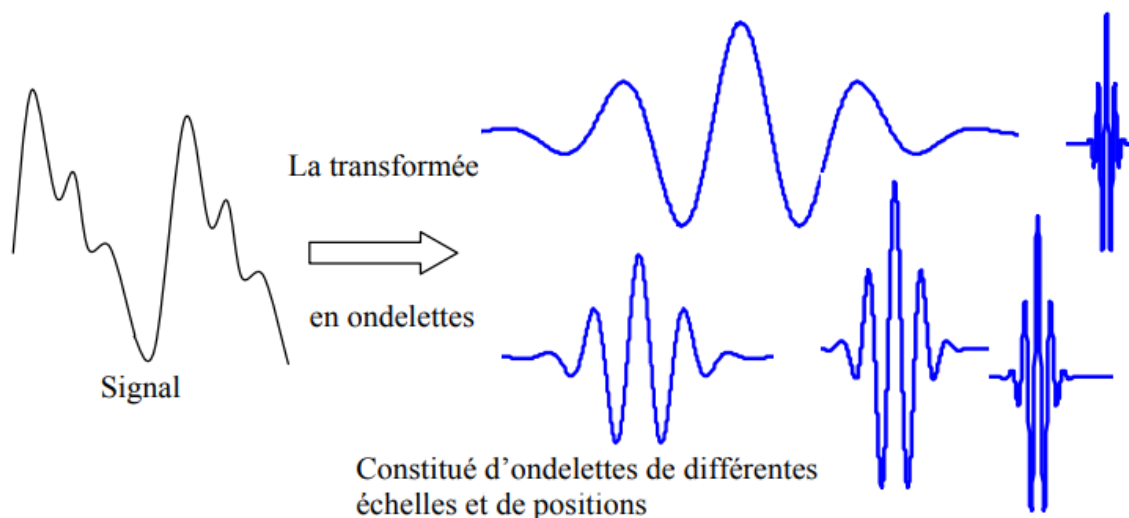
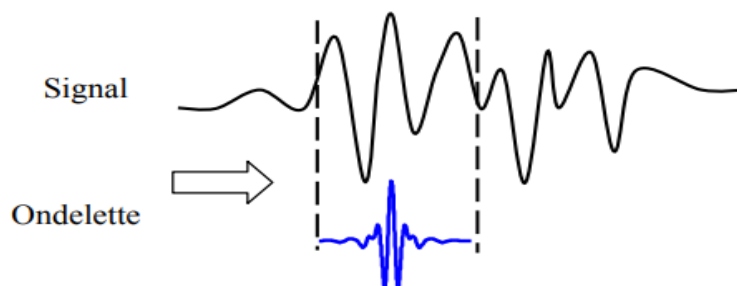


Figure III-10: Décomposition d'un signal en ondelettes

Pour calculer la transformée en ondelette d'un signal quelconque, on procède au calcul d'une série de produit scalaire. Pour cela, on doit suivre les étapes suivantes :

- Choisir un jeu de facteur d'échelle, c'est-à-dire les valeurs de  $a$
- Choisir un jeu de décalage temporelle, c'est-à-dire les valeurs de  $b$
- Pour chaque couple  $(a,b)$ , il faut produire l'ondelette  $\psi_{a,b}(t)$ , et ainsi calculer le produit scalaire  $C_w(a,b)$ , pour y procéder, on va décaler l'ondelette vers la droite jusqu'à ce que le signal sera entièrement couvert.



- Figure III-11: : Balayage de signal par l'ondelette avec  $a$  et  $b$  donnés

Ensuite, on redimensionne l'ondelette et va reproduire les étapes citées précédemment. Et on reproduit toutes ces étapes pour toutes les échelles.

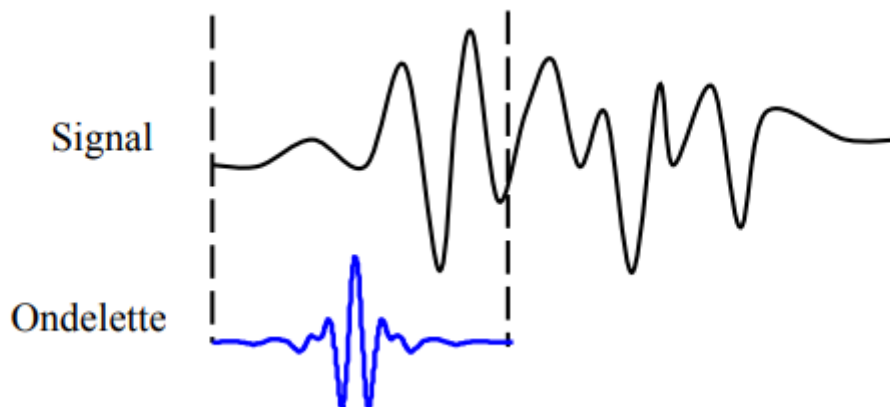


Figure III-12: Balayage de signal par une autre ondelette fille

Pour une échelle quelconque donné  $a_0$ , la transformée en ondelette continue (CWT) est équivalente à l'ondelette inversée dans le temps à l'échelle  $a_0$  et elle est centrée à l'instant de l'apparition de de l'impulsion. Cette propriété est appliquée par l'odelette de Haar

La CWT possède également la propriété de conservation d'énergie similaire au théorème de Parseval de la transformée de Fourier.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(u)|^2 \cdot du = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} |CWT_x(u, a)|^2 da \cdot du \quad (\text{III.22})$$

La forme de la fonction d'une ondelette varie d'une fonction à une autre ; chacune d'elle présente ses propriétés spécifiques. On va illustrer quelques une dans la figure ci-dessous.

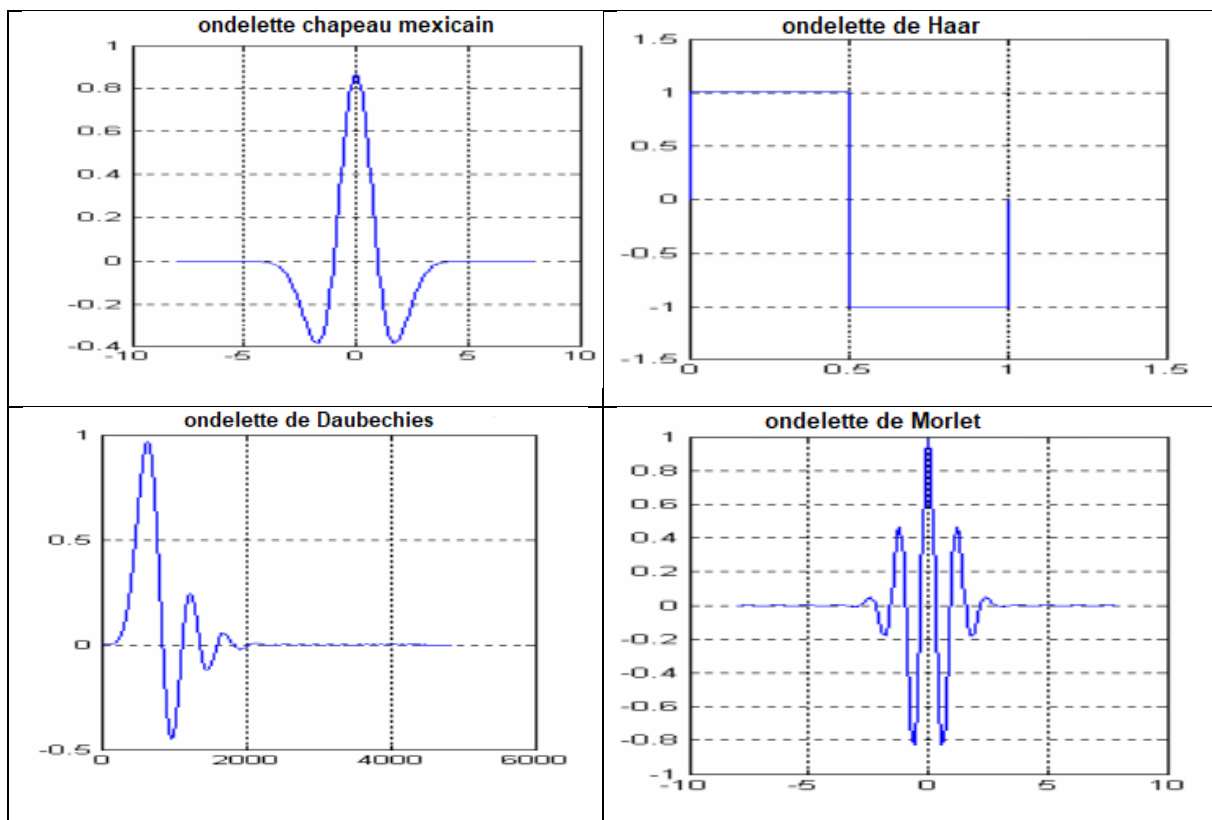


Figure III-13: Quelques formes d'ondelettes

### III.3.6 Transformée en ondelette discrète [44] [43]

La transformée en ondelettes discrète (DWT) d'un signal  $x(t)$  est une représentation non redondante du signal dans le plan temps-échelle.

Lorsque l'ondelette d'analyse est originaire d'une analyse multirésolution, la transformée en ondelette discrète correspond à l'échantillonnée de la transformée en ondelette continue (CWT) sur la grille dyadique. Cela veut dire que la CWT permet de décomposer un signal selon un ensemble spécifique d'ondelettes déduite d'une ondelette de référence par des opérateurs de dilatation de et de translation.

La DWT peut se calculer en utilisant un algorithme pyramidal rapide, et ces coefficients peut s'écrire :

$$d_x(i, k) = \langle x, \Psi_{ik} \rangle = CWT_x(a = a_1^i, b = kb_1 a = kb_1 a_1^i) \quad (III.23)$$

Où  $i$  et  $k$  sont des entiers relatifs variant entre les bornes, ainsi le décalage va dépendre du facteur d'échelle, ce qui correspond avec le pavage irrégulier du plan.

Lorsqu'on définit à partir de la transformée continue en ondelette, une coupe tout le long du temps à une échelle  $a$  donnée, le signal  $x_a(t) = CWT_x(a, b)$  qui correspond au signal filtré du signal  $x(t)$  par le filtre passe-bande de transmittance  $\Psi_a(f)$  ( $\Psi_a$  est la transformée de Fourier de  $\Psi_a(t) = \frac{1}{a} \Psi(\frac{t}{a})$ ). Cette lecture ne sera plus possible avec les coefficients  $d_x(i, k)$  de la transformée en ondelette discrète. Mais on peut construire à partir de ces coefficients le signal passe-bande.

$$x_i(t) = \sum_k d_x(i, k) \Psi'_{ik}(t) \quad (III.24)$$

Où  $\Psi'_{ik}$  est la duale de  $\Psi_{ik}$ .

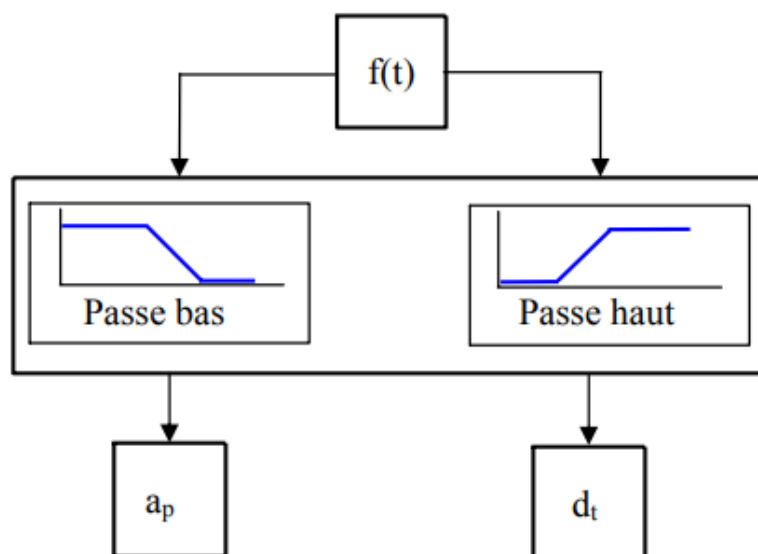


Figure III-14: Décomposition de signal par deux filtres passe bas et passe haut

La transmittance du filtre  $|\Psi_i(f)|^2$  ( $\Psi_i$  est la transformée de Fourier de  $\Psi_i$ ) . le signal sera différent de  $x_a(t)$ , mais va résulter comme celui d'un filtrage passe-bande, et qui va dépendre de l'ondelette utilisée à l'échelle  $2^i$ .

Le but d'utiliser  $x_i(t)$  c'est qu'il peut être obtenu par l'algorithme pyramidal rapide de construction. On disposera donc de  $m$  signaux qui vont correspondre aux  $m$  octaves inspectées dans les différentes échelles,  $\{x_i(nTe), n = 1, \dots, N\}, i = 1 \dots, m$ . Et après nous allons prendre  $T_e = 1$ .

### III.3.6.1 Indice de détection

Le but est de détecter un déplacement d'énergie d'un niveau de résolution vers un autre. C'est ce qui explique pourquoi une rupture ne serait valide que si on observe au même instant, sur au moins deux niveau  $i$  et dans différentes directions.

Un changement de moyenne dans la variance  $\{v_i, (k)\}$  du signal  $\{x_i, (k)\}$ . Sur chaque niveau, on définit un indice local  $\{vr_i, (k)\}$  qui sera égale à l'intercorrélacion de  $\{v_i, (k)\}$ , avec un modèle de rupture  $\{m_r, (n)\}$  qui correspond à un saut de moyenne :  $\{m_r, (k)\}, \{v_i, (k)\}$  et  $\{vr_i, (k)\}$ , et ils sont définis par :

$$\begin{cases} m_r(k) = 1 \text{ si } k < 0 \\ m_r(k) = -1 \text{ si } k \geq 0 \end{cases}$$

Et  $\{v_i, (k)\}$  : estimé sur une fenêtre glissante qui est centrée sur  $k$  et de largeur :  $p=20$ .

### III.3.6.2 Notions de détails et d'approximation

Le principe fondamental de la transformée en ondelette discrète, c'est de séparer en deux composante le signal, la première composante représente l'allure générale du signal, tandis que l'autre représente ses détails. L'allure générale d'une fonction est représentée ses fréquences basses c'est-à-dire les grandes échelles. Les détails par ses hautes fréquences alors les petites échelles. Comme le montre la figure ci-dessous.

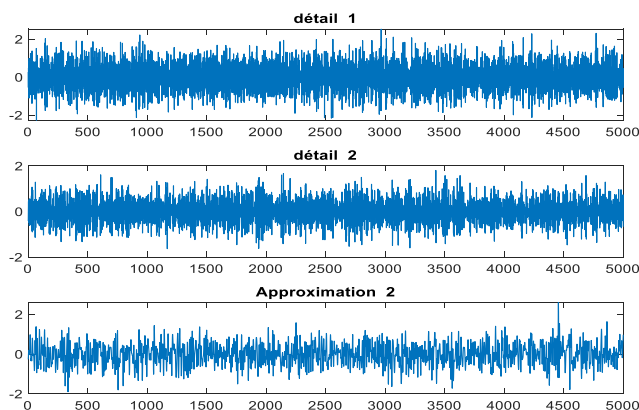


Figure III-15: décomposition d'un signal à  $n=2$  (niveau2)

En résumé, à chaque itération, on divise la résolution par 2. C'est pourquoi cette méthode est appelée analyse multirésolution.

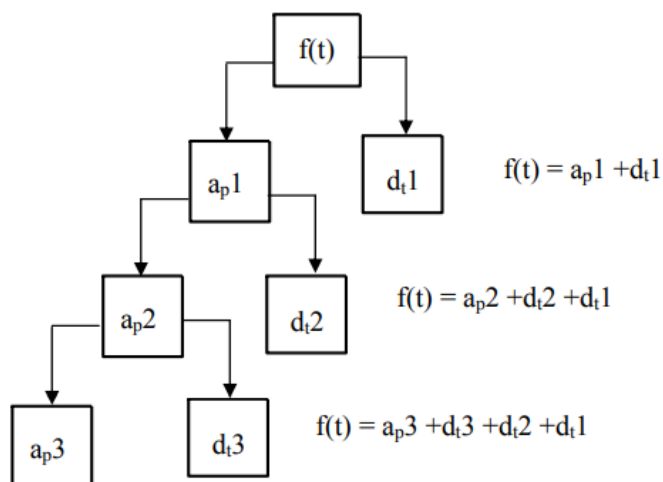


Figure III-16: analyse multirésolution

### III.3.6.3 Nombre de niveaux

Du moment que le processus d'analyse se répète à maintes fois, en théorie il peut être continu indéfiniment. En réalité, la décomposition peut se faire jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon, ou d'un simple pixel.

Dans la pratique nous choisissons généralement un nombre approprié de niveaux qui sont basés sur la nature du signal, sur un critère approprié et de l'application appropriée.

### Exemple

Longueur :  $2 \times 2^9 = 1024$  alors on a 9 niveaux de décomposition.

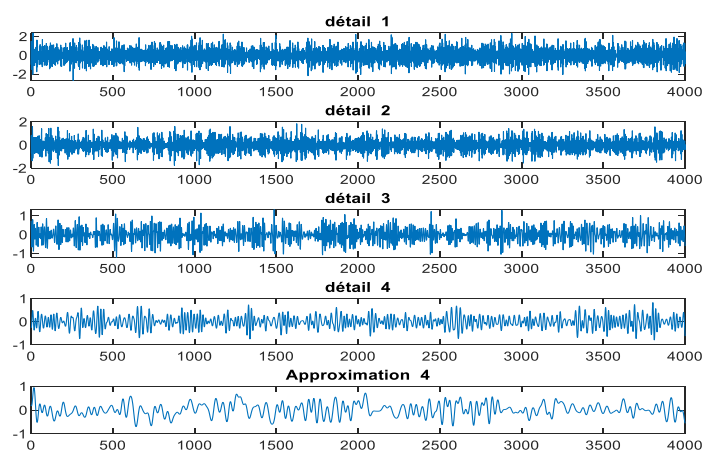


Figure III-17: décomposition d'un signal à  $n=4$  (4 niveaux)

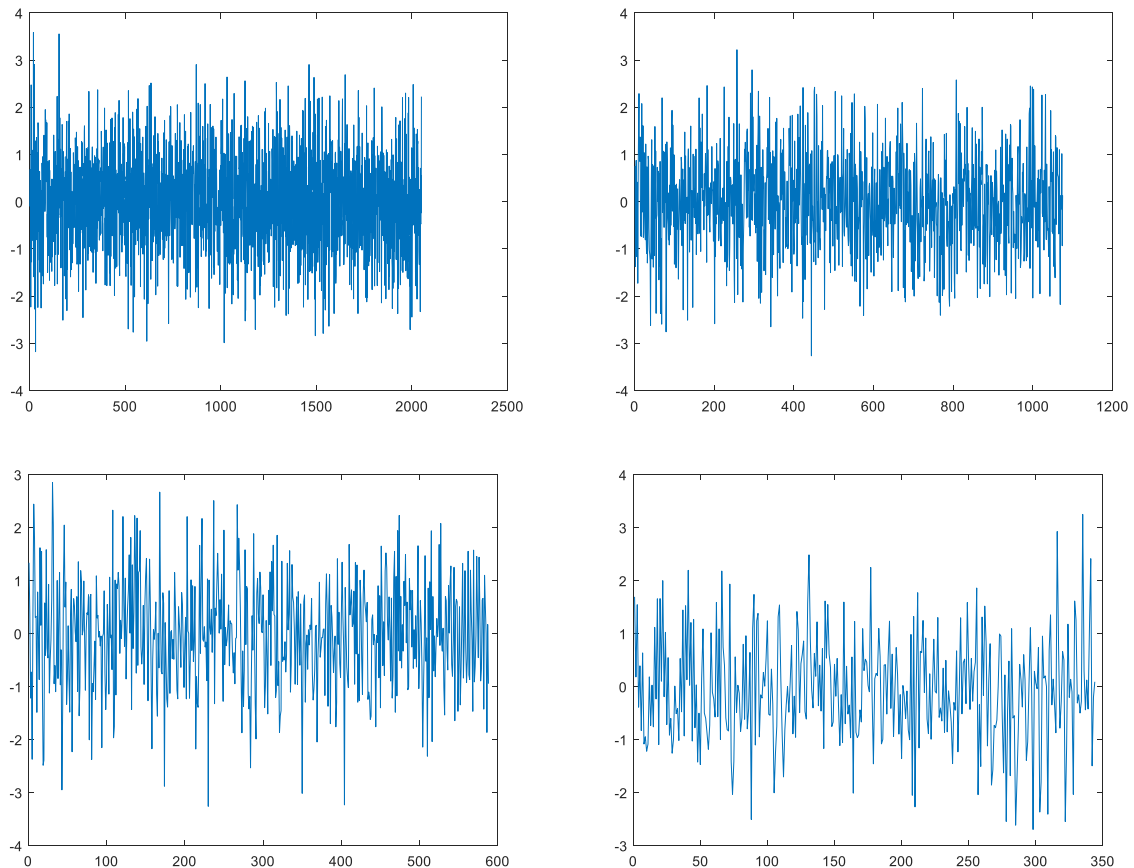


Figure III-18: décomposition d'un signal en 4

Les principaux inconvénients de la transformée en ondelette discrète (TOD), c'est qu'elle produit un nombre considérable de coefficients pour représenter un signal qui exige un temps de calcul très élevé pour la reconstruction du signal d'origine.

Pour résumer ce qu'on a déjà expliqué, la transformée en ondelettes discrète décompose le signal en 2 parties principales :

- Les détails, correspondants à la haute fréquence,
- Les approximations qui correspondent à la basse fréquence.

### III.3.7 Famille des ondelettes [42] [44]

Contrairement à la transformée de Fourier, les ondelettes offrent plusieurs choix d'ondelette analysante qui est adaptée avec l'application souhaitée, parmi les plus connues en traitement du signal :

### III.3.7.1 Ondelette de Haar

Ce type d'ondelette est classée parmi les plus anciennes, elle est définie par sa fonction d'ondelette  $\Psi$  et sa fonction d'échelle,  $\Phi$ , l'inconvénient de cette ondelette, c'est qu'elle est discontinue, alors il est impossible d'approximer les signaux continus d'une manière précise.

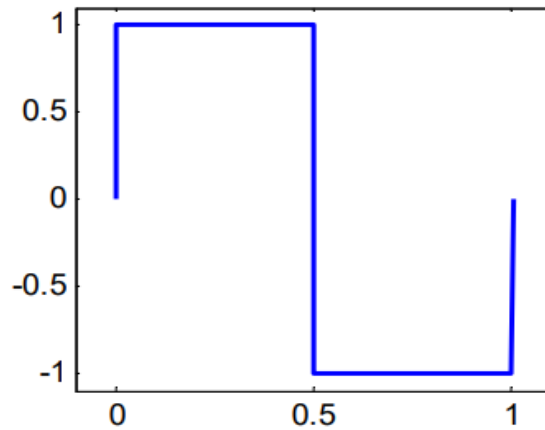


Figure III-19: ondelette de Haar

### III.3.7.2 Ondelette de Daubechies

Proposée par Ingrid Daubechies en 1988, elle représente une famille d'ondelettes orthogonale, on note N l'ordre de l'ondelette dbN (Daubechies 1 représente l'ondelette de Haar). A l'exception de db1, cette famille ne possède pas une expression explicite.

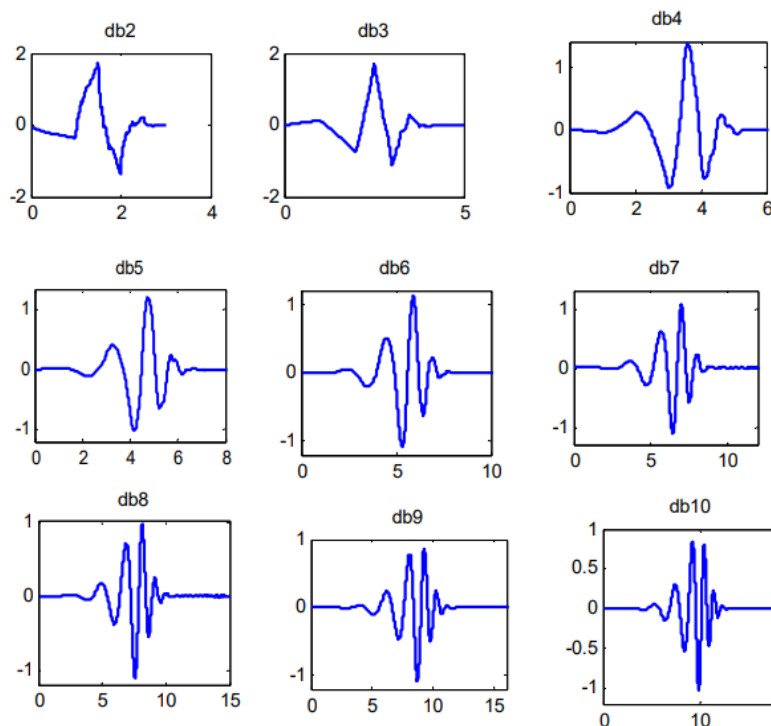


Figure III-20: ondelette de Daubechies

### III.3.7.3 Ondelette de Meyer

Classée parmi les ondelettes les plus ancienne, l'ondelette de Meyer est introduite au milieu des années 1980. C'est une famille d'ondelette orthogonales infiniment dérivable et elle est définie par sa fonction  $\Psi$  ainsi que sa fonction d'échelle  $\Phi$  dans le domaine fréquentiel.

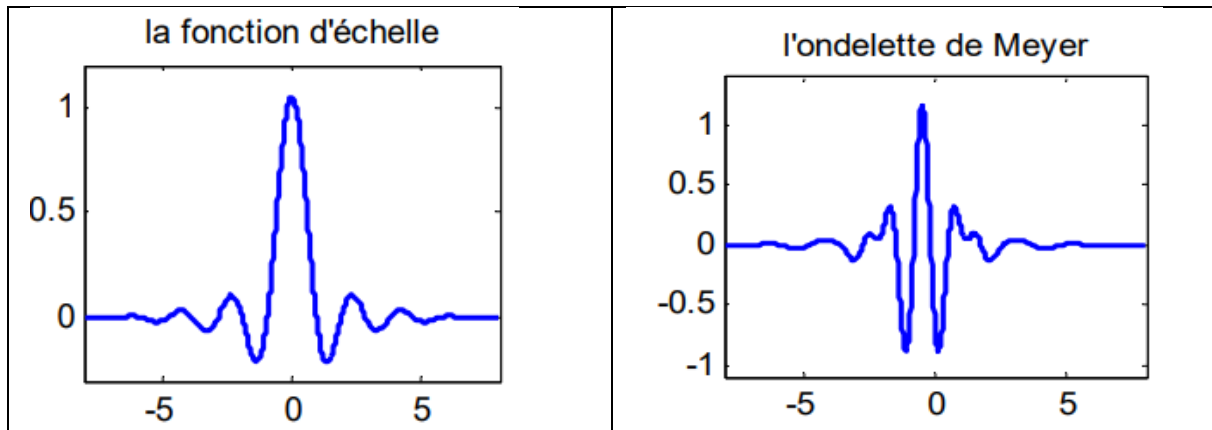


Figure III-21: ondelette de Meyer

### III.3.7.4 Ondelette de Morlet

Cette famille d'ondelette a été introduite par J. Morlet :

$$\Psi(t) = C e^{\frac{-t^2}{2}} \cos(5t) \quad (\text{III.25})$$

Cette famille d'ondelette a été inspirée du signal élémentaire de GABOR, autrement dit, par modulation d'une Gaussienne. Toutes les ondelettes correspondent à une modulation d'enveloppe portée par une exponentielle complexe appelées ondelette type MORLET. Elle ne satisfait pas la condition d'admissibilité.

Du moment que  $\Phi$  n'existe pas, alors l'analyse n'est pas orthogonale.

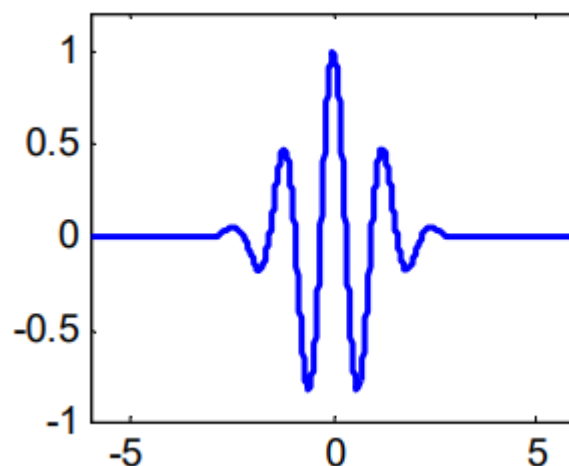


Figure III-22: ondelette de Morlet

### III.3.8 Décomposition en paquets d'ondelettes [44] [42] [36] [34] [45]

#### III.3.8.1 Généralités

La principale caractéristique de la transformée en ondelette, c'est de permettre une analyse avec des résolutions variables selon les échelles d'analyse. Un phénomène de longue durée ne nécessite pas une bonne localisation temporelle, alors que les événements rapides sont traités avec une résolution temporelle bien précise, au détriment de la précision fréquentielle.

L'approche par paquet d'ondelettes est bien différente ; elle offre une librairie d'ondelettes organisés en fonction de leur propriétés d'analyse et de localisation temps-fréquence, en suivant une architecture d'arbre binaire.

La décomposition en paquet d'ondelettes est très intéressante dans le cas où on peut ne conserver que les paquets qui reflètent le signal initial pour le critère choisi

Alors, la décomposition en paquet d'ondelettes est une généralisation de l'analyse multirésolution de la transformée en ondelette discrète. Les espaces d'approximation  $V_j$  sont décomposés, et on garde les espaces de détails  $W_j$  tels qu'ils sont. Dans la décomposition en paquet d'ondelettes, on va opérer encore sur les espaces de détails pour en déduire de nouvelles bases.

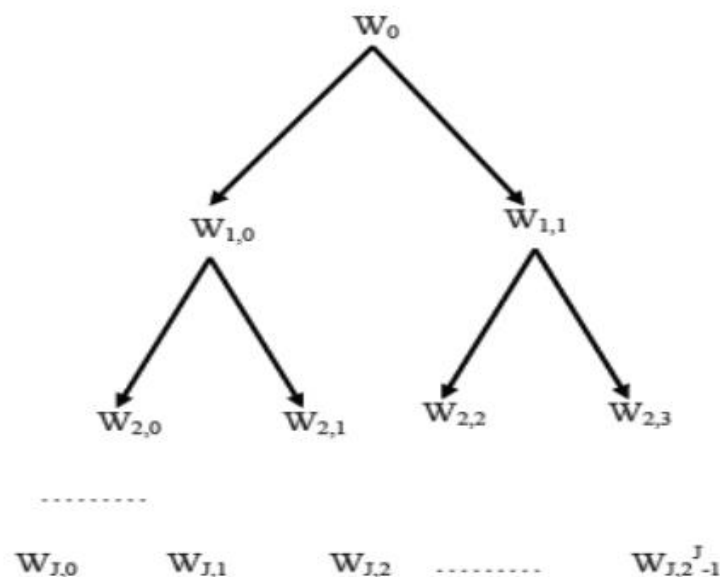


Figure III-23: Décomposition en paquets d'ondelettes à l'ordre  $J$

Les paquets d'ondelettes sont alors liés par trois paramètres : l'échelle, l'index et la position.  $J$  pouvant être interpréter comme paramètre d'échelle,  $n$  comme un index de chaque nœud de l'échelle  $j$ , et  $k$ , un paramètre de localisation temporelle.

Pour les valeurs de  $j$  et  $n$ , la décomposition en paquet d'ondelette est organisée en arbres. La figure ci-dessous représente un arbre tracé pour un niveau de décomposition égal à 5.

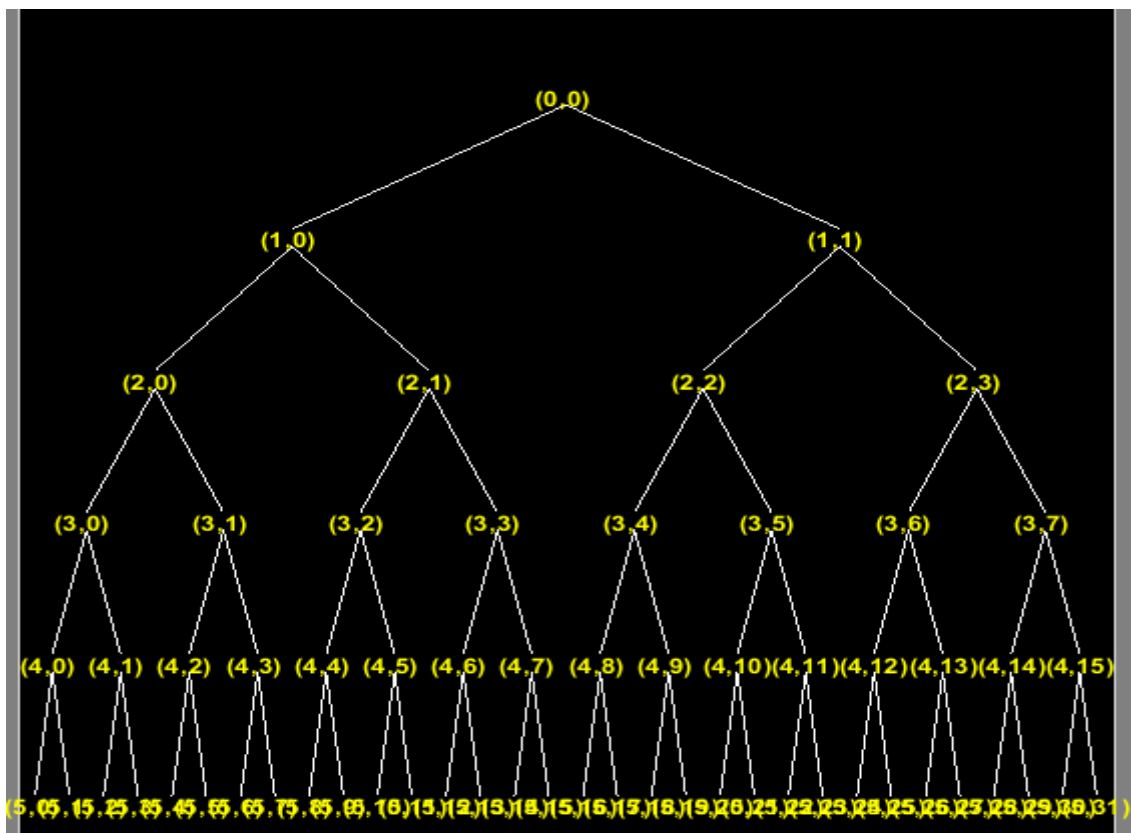


Figure III-24:: Coefficients d'ondelettes pour une base d'ondelettes de niveau 5

Un arbre décrivant les décompositions à effectuer est inversible et linéaire, son résultat correspond alors à des coordonnées du signal de départ dans une base. Faire plusieurs décompositions de suite revient à composer plusieurs changements de base. Ce sera toujours donc un changement de base.

Par conséquent, si tous les changements de bases correspondent à des bases orthogonales, la composition des changements de bases orthogonales sera donc toujours un changement de base orthogonale.

### III.3.8.2 Construction des paquets d'ondelette :

La génération des paquets d'ondelette se fait par alternance, on parle de deux filtres de longueur  $N$ ,  $g_n$  et  $h_n$ , qui sont associés à l'ondelette orthogonale à support compact  $\Psi$  et la fonction d'échelle  $\varphi$  de  $L^2$ .

Par induction, on va définir la suite de fonction  $(w_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , en partant de  $w_0 = \varphi$ , par :

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k w_n(2t - k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g_k w_n(2t - k) \end{cases}$$

Alors, on a pour  $n = 0$ , l'équation va se réduire simplement aux deux équations, aux deux échelles ; et on a  $w_0 = \varphi$ , la fonction d'échelle et ensuite  $w_0 = \Psi$ , l'ondelette.

On constate alors en quoi les paquets généralisent les ondelettes, généralement, à partir d'une ondelette orthogonale plus régulière, on obtient des versions lissées de ce système de fonctions.

### III.3.8.3 Principe d'un paquet d'ondelettes

A la base d'une décomposition en ondelettes, on a :

- Un algorithme de décomposition d'une suite de  $R^N$  en deux suites de  $R^{\frac{N}{2}}$ ,
- Un algorithme de recombinaison des deux suites de  $R^{\frac{N}{2}}$ , en une suite de  $R^N$ .

Ces algorithmes sont inverses les uns des autres.

Pour un paquet d'ondelettes, on utilise la même décomposition/recombinaison des signaux, mais on peut, à chaque niveau, décomposer le signal représentant les basses fréquences et/ou le signal qui représente les hautes fréquences.

Alors, la décomposition en paquet d'ondelettes est caractérisée par :

- Deux filtres  $h$  et  $g$ .
- Un arbre décrivant les décompositions.

On peut donc faire la décomposition tant que la taille du signal est plus grande que celle du filtre. Faire successivement plusieurs décompositions, veut dire composer plusieurs changements de basses. Ça reste toujours un changement de base.

### III.3.8.4 La transformée en paquet d'ondelettes

La figure suivante, représente un arbre de décomposition en paquets d'ondelettes et leurs représentations.

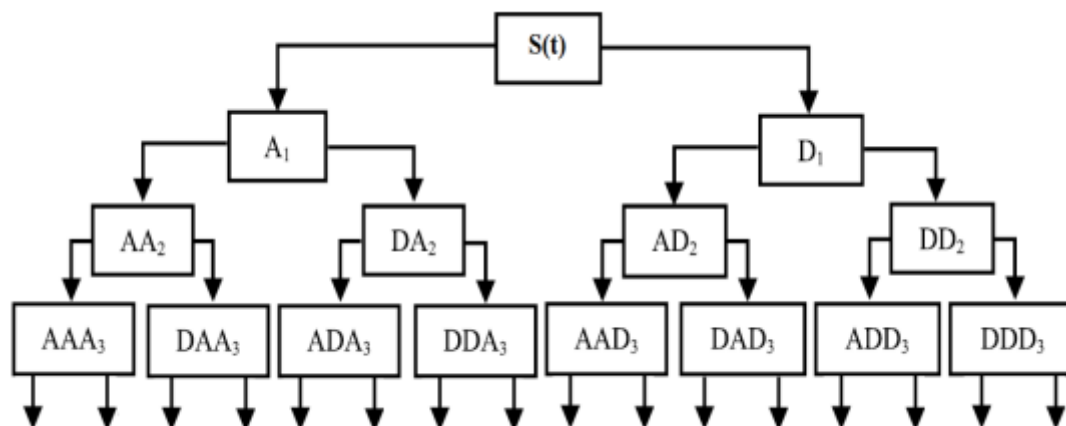


Figure III-25: Transformée en paquet d'ondelette

Dans une analyse en paquet d'ondelettes, non seulement les détails mais aussi les approximations peuvent être décomposés, ceci rapporte plus de  $(2n+1)$  de différentes décompositions du signal.

Les approximations sont alors coupées en approximation et détails de deuxième niveau, ainsi le processus est répété. Pour une décomposition de « n » niveau, il y a  $(n+1)$  manières possible de décomposition du signal.

### III.3.8.5 Localisation des paquets d'ondelettes

#### III.3.8.5.1 Localisation spatiale

La localisation spatiale des éléments de la base des paquets d'ondelettes est généralement similaire à celle des ondelettes. Un élément de la base des paquets d'ondelettes correspondant à un niveau de décomposition  $j$  est translaté tous les  $2^j pixels$ .

Le calcul de ces coefficients se fait en sous-échantillonnage  $j$  fois par un facteur 2, la taille du support d'un élément de la base de paquets d'ondelette du niveau  $j$  est comprise entre  $2^j \min(|h|, |g|)$  et  $2^j \max(|h|, |g|)$ .

On va considérer alors que, plus le niveau de décomposition du coefficient d'ondelette est élevé, plus sa localisation spatiale sera mauvaise.

#### III.3.8.5.2 Localisation fréquentielle

Pour suivre ce qui se passe dans le domaine fréquentiel, et lorsque l'on décompose un signal  $u \in R^N$  :

$$\widehat{u}_k^1 = \frac{1}{2} (\widehat{h}_k^* \widehat{u}_k + \widehat{h}_{k+\frac{N}{2}}^* \widehat{u}_{k+\frac{N}{2}}) \tag{III.26}$$

$$\widehat{u}_k^1 = \frac{1}{2} (\widehat{g}_k^* \widehat{u}_k + \widehat{g}_{k+\frac{N}{2}}^* \widehat{u}_{k+\frac{N}{2}}) \tag{III.27}$$

Ces deux formules donnent la transformée de Fourier des signaux obtenus après la décomposition en fonction de la transformée de Fourier du signal  $u$

Il faut rappeler que dans le cadre des ondelettes,  $h$  est typiquement passe bas et  $g$ , alors pour simplifier l'analyse, on va supposer  $\widehat{h}_k \sim 0$  pour  $k \in \{-\frac{N}{4}, \dots, \frac{N}{4}\}$ , et  $\widehat{g}_k \sim 0$  pour  $k \notin \{-\frac{N}{4}, \dots, \frac{N}{4}\}$ .

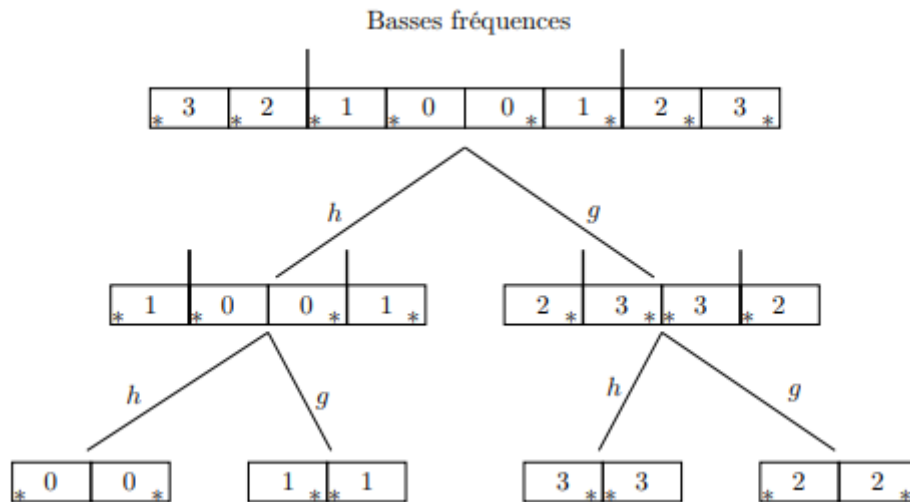


Figure III-26: Suivi des différentes bandes de fréquences au cours des décompositions avec les filtres  $h$  et  $g$

Sur ce, lors d'une première décomposition, on obtient le résultat schématisé sur la fig. (III.26).

La transformée de Fourier obtenue dans la décomposition utilisant  $h$  ( $u^1$ ) correspond aux basses fréquences de  $u$  (les bandes 0 et 1).

La TF du résultat de la décomposition utilisant  $g$  ( $u^2$ ), correspond aux hautes fréquences de  $u$  (bandes 2 et 3), mais l'ordre de ces fréquences est inversé.

Si on décompose encore une fois  $u^2$  (ce qui n'est pas faisable avec les ondelettes, mais que l'on peut faire avec les paquets d'ondelettes) :

- Les basses fréquences de  $u^2$  (les bandes 3) correspondent à la TF de la décomposition avec  $h$
- Les hautes fréquences de  $u^2$  (les bandes 2) correspondent à la TF de décomposition avec  $g$ .

En résumé, l'observation qui est faite ci-dessus veut dire : un paquet d'ondelette qui est décomposé au niveau  $j$  va être localisé sur une bande de fréquences.

### III.3.8.6 Optimisation des paquets d'ondelettes

Le choix de la longueur de la bande peut être égal à trois fois la fréquence du défaut  $f_d$  c'est-à-dire, les trois harmoniques de la fréquence du défaut seront suffisantes pour bien interpréter le spectre d'enveloppe.

Avoir la détermination de la fréquence de résonance  $f_0$  et de la bande  $\Delta f_d (=3*f_d)$ , le signal va être décomposé à un niveau pour lequel la plage fréquentielle des sous-bandes aura une longueur proche de  $\Delta f_d$ . Dans le cas où  $\Delta f_d$  est proche de  $\Delta f_N$ , c'est  $n=N$  qui sera choisi pour la décomposition, sinon ce serait  $N=n-1$  qui va être choisi.

Au niveau  $N$  de décomposition, la fréquence de résonance peut se situer alors dans une bande  $C_j^N$  (voir la figure). Dans le cas où la résonance se situe au milieu de la bande (cas 2), c'est la bande principale  $C_j^N$  qui sera retenue. Si la fréquence de résonance se situe à l'une des extrémités de la bande, alors une partie de l'information sera partagée avec la bande voisine, et on va ajouter à la bande  $C_j^N$  la moitié de la bande adjacente ( $C_{j-1}^N$  ou  $C_{j+1}^N$ ). Dans ce cas, une décomposition supplémentaire au niveau  $N+1$  est nécessaire. La décomposition au niveau  $N+1$  se fait quand la différence entre la fréquence de résonance et la fréquence maximale ou minimale de la bande  $C_j^N$  est inférieure à la fréquence du défaut.

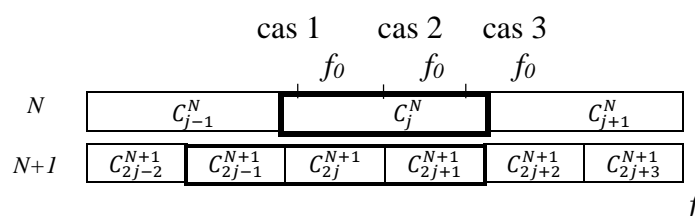
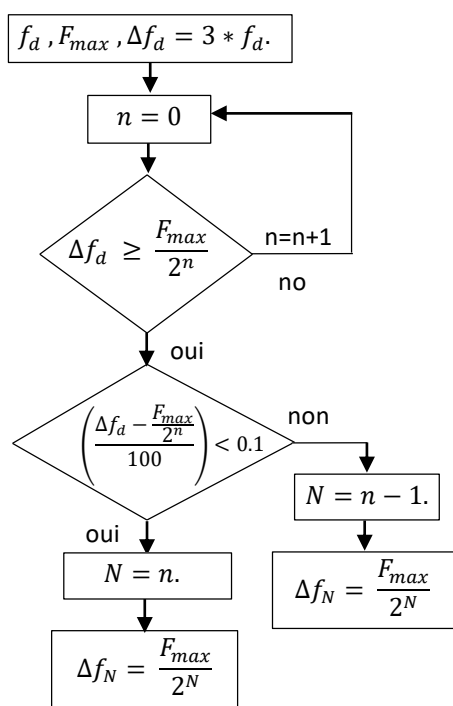


Figure III-27 Les positions probables d'une résonance dans une sous-bande.

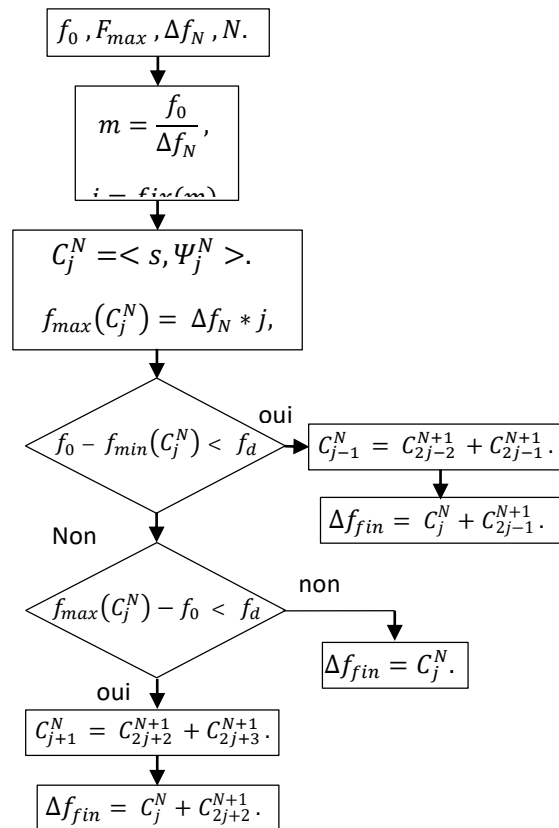
#### Exemple

On va simuler un signal avec une fréquence de résonance égale à 2000 Hz, et une fréquence de défaut égale à 21.25 Hz, la plage fréquentielle  $\Delta f_d$  est égale à 63.75Hz. Alors le niveau de décomposition  $N$  est égale à 6 ( $\Delta f_N = \frac{f_{max}}{2^N} = \frac{4000}{2^6} = 62.5$ ).

Le numéro de la bande qui contient 2000 Hz est obtenue par  $2000/62.5 = 32$ , alors la bande principale est  $C_{32}^6$  et qui sera la bande finale selon le cas (cas 2) de la figure (III.27)



Détermination du niveau de décomposition



Organigramme de calcul de la bande finale de démodulation  $\Delta f_{fin}$ .

En utilisant l'indicateur du Kurtosis, on remarque bien l'apparition d'une résonance à la bande n° 32 (F0=2000Hz).

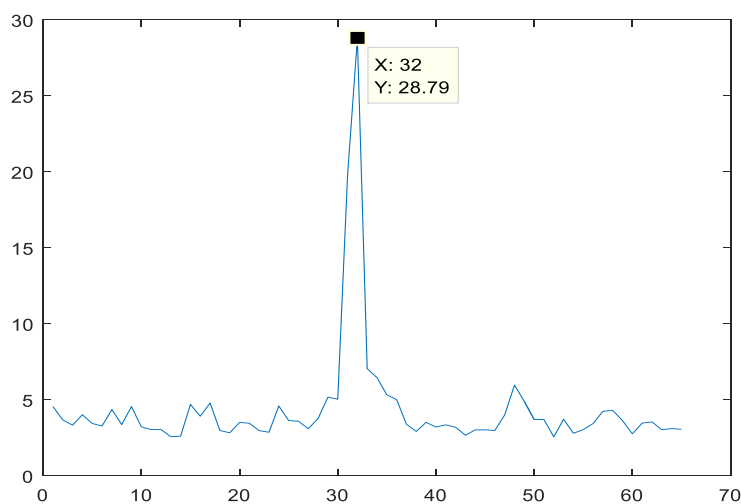


Figure III-28 : détection d'une résonance avec le Kurtosis.

Les spectres d'enveloppe des résonances sont donnés dans la figure (III.29), dont lesquels nous constatons d'une manière nette la présence des trois peignes de raies relatifs aux défauts simulés.

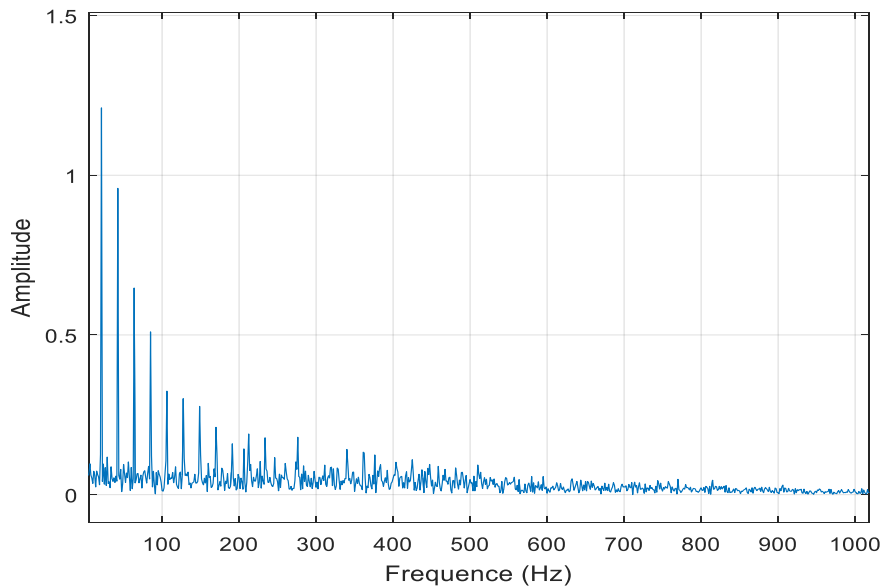


Figure III-29 Le spectre d'enveloppe des coefficients de la bande  $\Delta f_{in}$ .

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons constaté que la transformée de Fourier à fenêtre glissante, avait pour inconvénient, posséder une résolution d'analyse fixe, elle est définie par la taille de l'enveloppe. Pour que l'analyse soit efficace, cette taille doit être définie avant l'analyse, et elle doit donc nécessiter la connaissance a priori du signal. Ainsi, plutôt que de faire le choix d'une résolution adaptée du signal donné, il serait préférable de détenir une méthode d'analyse dont la résolution efficace adaptée aussi bien en temps qu'en fréquence, qui s'adapte au signal en fonction de ses caractéristiques.

Au lieu de conserver une enveloppe fixe dans laquelle le nombre d'oscillations varie, on va conserver un nombre d'oscillation fixe dans une enveloppe que l'on peut contracter et dilater à volonté, c'est pourquoi la transformée en ondelette s'adapte parfaitement au signal à analyser.

Chapitre IV  
Analyse  
expérimentale

## IV.1 Introduction

Un certain nombre de défauts mécaniques susceptible d'affecter une machine tournante (jeux de palier, d'engrenage, défaut d'alignement...), induisent des forces d'excitation impulsionnelles périodiques.

Tout travail de simulation quel qu'il soit, et quel que soit son degré de signification de physique réel, il ne peut en aucun cas remplacer la réalité des choses, ni de prévoir tous les phénomènes qui agissent sur le processus réel. Alors pour avoir des informations précises et juste, on doit faire recours à l'expérimentation.

Ce laboratoire dispose d'un matériel de vibration destiné à la détection des défauts de machines tournantes par les vibrations, ce matériel est composé d'un banc d'essai qui réalisé au niveau de ce centre ainsi que du matériel de prise de mesures et de traitement numérique de signal.

Dans ce chapitre, nous allons simuler des défauts d'engrenage sur un banc d'essai réalisé au **Centre d'Etude et de Recherche en soudage et contrôle** situé à Cheraga, Alger.

## IV.2 Description du matériel

### IV.2.1 Le banc d'essai

On peut voir le banc d'essai sur la figure (IV.1) ainsi que sa chaîne cinématique sur la figure (IV.2), et ses caractéristiques sur les tableaux IV.1 et IV.2.



Figure IV-1 Le banc d'essai

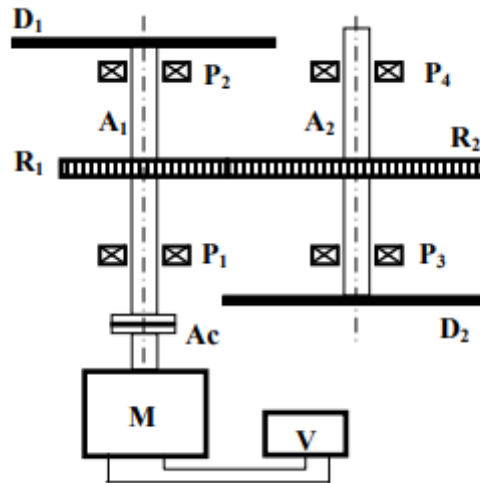


Figure IV-2 chaîne cinématique du banc d'essai

N°	Désignation	Dimensions	Caractéristiques techniques
1	Moteur électrique		$0 < f < 50 \text{ Hz}$
2	Variateur de fréquence		
3	Arbre moteur $A_1$		
4	Arbre récepteur $A_2$		
5	Disques d'inertie (02) identiques $D_i$		
6	Roue dentée $R_1$	80 dents	
7	Roue dentée $R_2$	100 dents	
8	Paliers (04) identiques $P_i$		
9	Accouplement Ac		

Tableau IV-1 caractéristique du banc d'essai

$\Omega_M$ (tr/min)	$f_M$ (Hz)	$f_R$ (Hz)	$f_{eng}$ (Hz)	$f_c$ (Hz)
300	5	4	400	1
600	10	8	800	2
900	15	12	1200	3
1200	20	16	1600	4
1500	25	20	2000	5
1800	30	24	2400	6
2100	35	28	2800	7
2400	40	32	3200	8
2700	45	36	3600	9
3000	50	40	4000	10

$\Omega_M$  : vitesse de rotation de moteur

$f_M$  : fréquence de moteur (A1)

$f_R$  : fréquence de récepteur (A2)

$f_{eng}$  : fréquence d'engrènement

$f_c$  : fréquence de coïncidence

(LCM (100 ; 80) = 400)

Tableau IV-2 Les différentes fréquences caractéristiques de banc d'essai

### IV.2.2 Le matériel de prise de mesures et de traitement de signal

Les capteurs sont des accéléromètres de type piézoélectrique, avec une sensibilité de 9.82 mV/g et une réponse fréquentielle de 1 Hz à 4 kHz. Ces capteurs seront reliés au boîtier donné dans la photo V.3 de modèle 4-2 voies, ce dernier est relié à l'analyseur de signal, donné dans la photo V.4 qui est directement connecté à un ordinateur où est installé un logiciel de traitement de type **OROS 25**.



**Photo 1** : Le boîtier d'acquisition



**Photo 2** : L'analyseur de signal

### IV.3 Les défauts d'engrenages

Les défauts simulés sur les dents sont de forme de rayures tout au long du flanc, au niveau du diamètre primitif comme le montre la figure (IV.3), ces défauts sont réalisés sur notre banc d'essai.

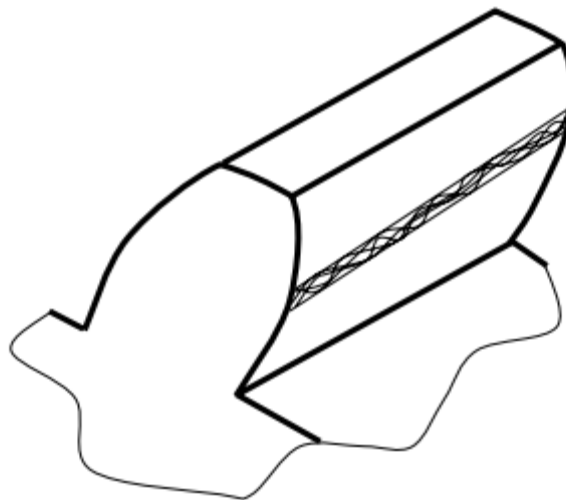
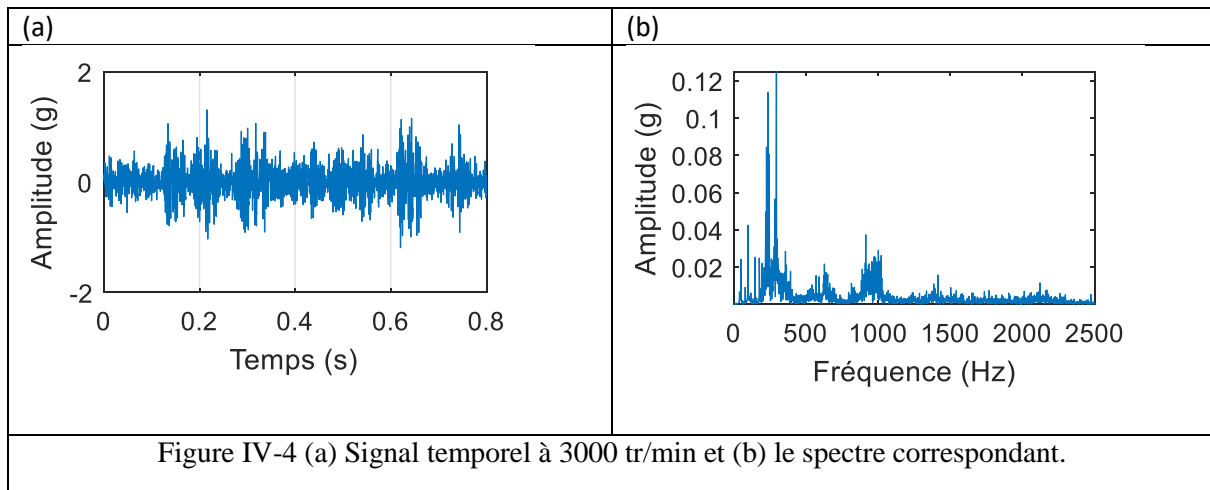


Figure IV-3 défaut d'engrenage

## IV.3.1 Cas test 1

Une dent du pignon monté sur l'arbre d'entrée est complètement arrachée, ce défaut génère un choc périodique à chaque rotation de l'arbre concerné. La fréquence du défaut est égale à la fréquence de rotation de l'arbre d'entrée. La figure (IV.4) (a) donne le signal temporel qui est recueilli avec un accéléromètre placé sur le palier P1. La fréquence d'échantillonnage étant égale à 5120 Hz, le temps d'acquisition est égal à 0.8 s et la vitesse de rotation du moteur électrique étant fixée à 3000 tr/min.

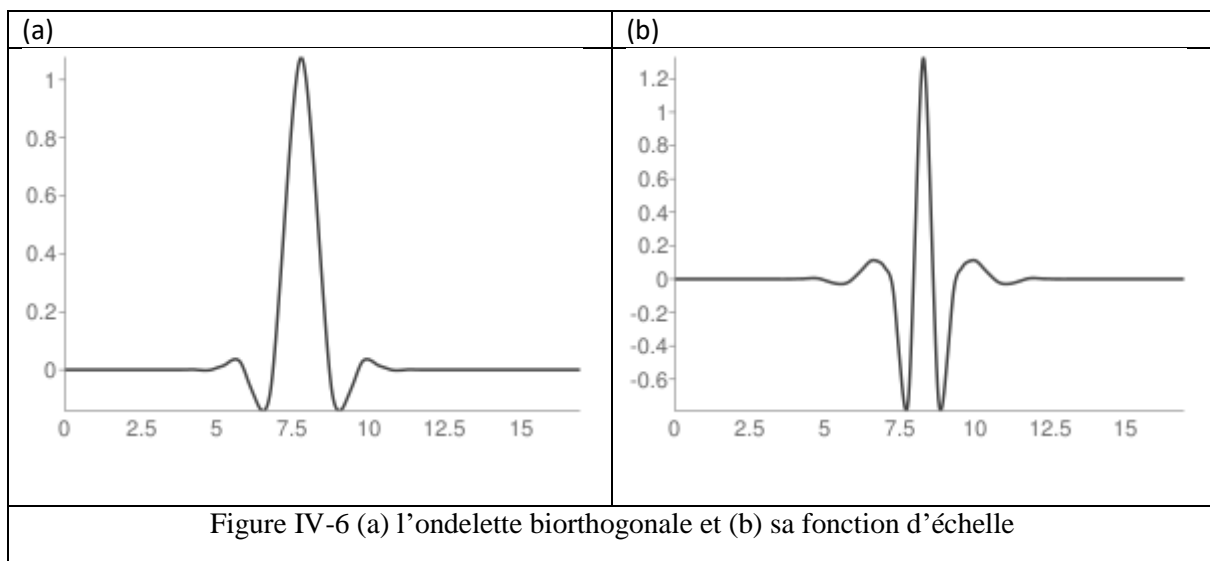
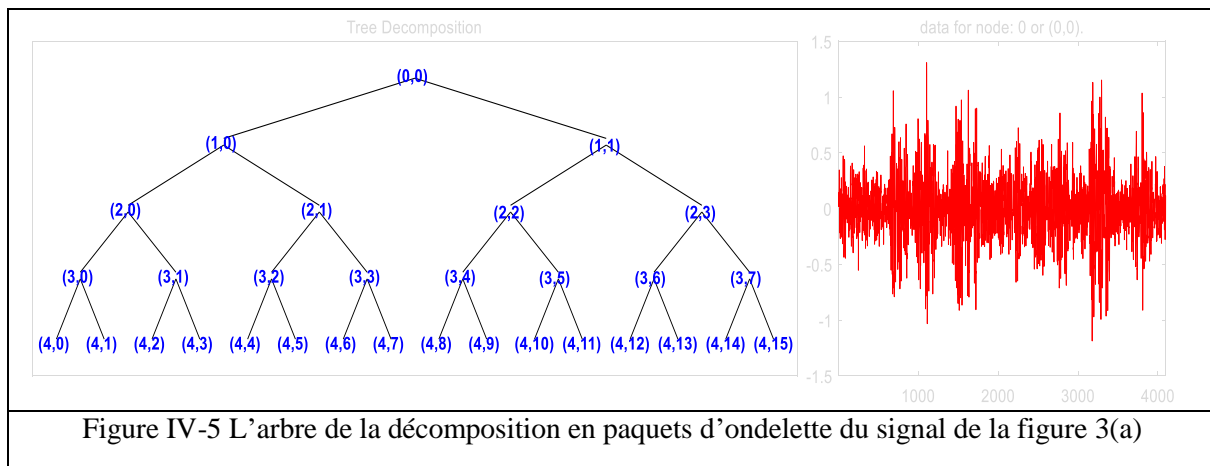


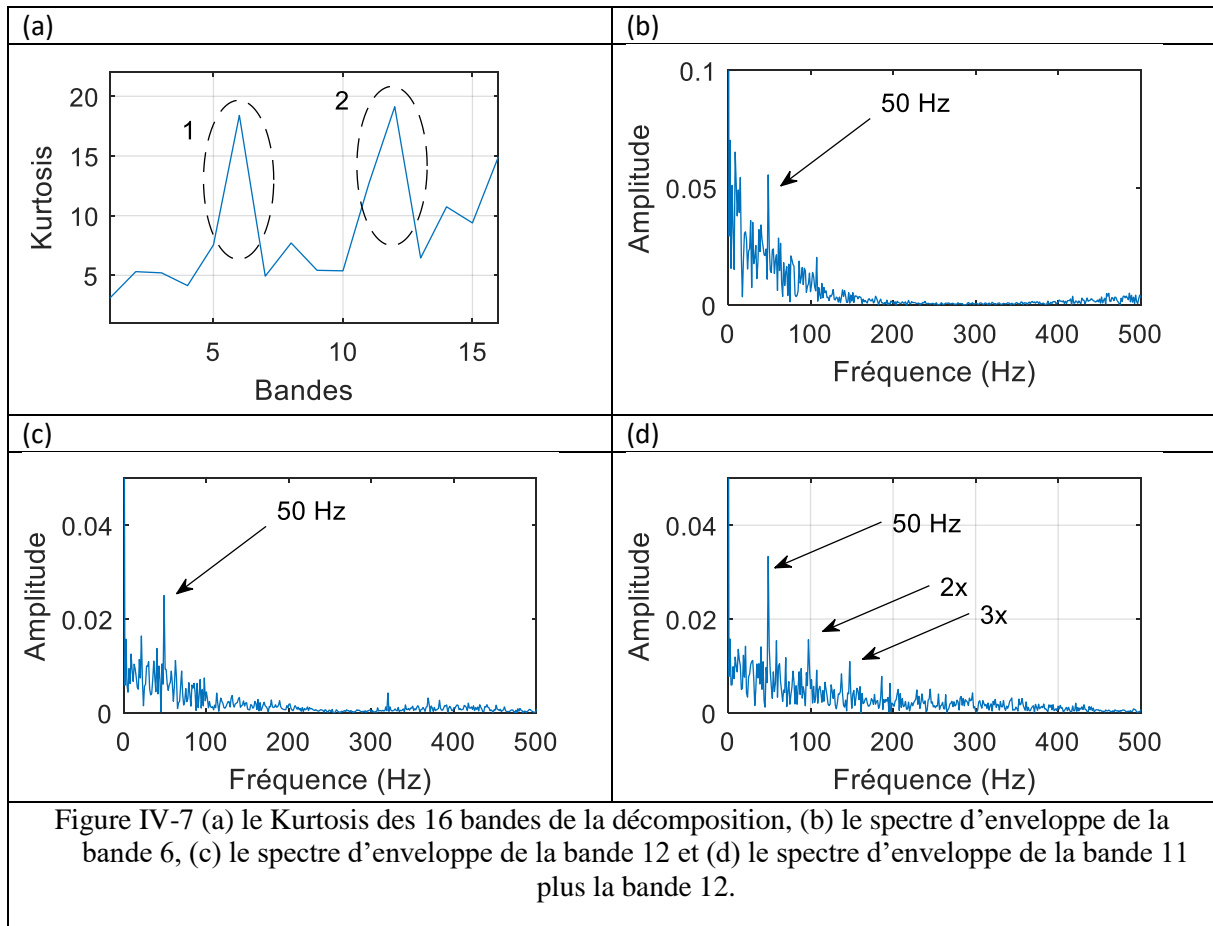
Le spectre du signal temporel (fig. IV.4(b)) montre des peignes de raies aux fréquences de rotations des deux arbres respectivement ainsi qu'une grande énergie au niveau des hautes fréquences mêmes en basses fréquences (250 Hz, 700 Hz et aussi 1000 Hz). Le peigne de raies à la fréquence de rotation d'un arbre est une image vibratoire commune à plusieurs défauts. Il est quasiment impossible de statuer sur la nature du défaut susceptible d'affecter la machine, ce qui justifie le recours à d'autres méthodes plus avancées pour réussir le diagnostic.

Nous avons décomposé le signal temporel en utilisant les paquets d'ondelettes jusqu'au 4ème niveau comme montre la figure (IV.5). La largeur de bande de ce niveau est de 160 Hz. L'ondelette de décomposition et de la reconstitution utilisée est la bi-orthogonale inverse 6.8 (rbio6.8). Il y a lieu de rappeler qu'à chaque niveau de décomposition, les signaux obtenus sont sous-échantillonnés, ce qui nécessite la reconstitution de ces signaux pour obtenir les mêmes caractéristiques que le signal de départ, c'est le signal temporel brut. La figure (IV.6) (a) donne l'ondelette utilisée pour la décomposition et la figure (IV.6) (b) donne la fonction d'échelle utilisée pour la reconstitution.

Il faut noter que le repérage des bandes à n'importe quel niveau commence par 0 et non par 1 comme nous pouvons le constater au niveau de la figure (IV.5).

Les valeurs du Kurtosis de des 16 bandes sont donnés dans la figure (IV.7) (a). Les plus grandes valeurs de cet indicateur sont repérables aux alentours des bandes 6 et 12. Le spectre d'enveloppe des coefficients d'ondelettes de la bande 6 sont donnés dans la figure (IV.7) (b), où nous pouvons constater la présence d'un pic à la fréquence de 50 Hz, la même chose est constatée avec la bande 12 figure (IV.7) (c). Nous pouvons remarquer que la bande 11 a un Kurtosis important et puisqu'elle est au voisinage de la bande 12, le spectre d'enveloppe de ces bandes, à savoir bande 11 plus la bande 12, permet d'avoir d'une manière claire un de raies à la fréquence du défaut qui est de 50 Hz (figure (IV.7) (d),). Cette démarche a permis de bien diagnostiquer le défaut simulé sur le banc d'essai et a donné un spectre lisible correspondant à celui d'un défaut sur une dent d'engrenages.





**IV.3.2 Cas test 2**

La figure (IV.8) donne le signal temporel qui est recueilli avec un accéléromètre placé sur le palier P3. La fréquence d'échantillonnage est toujours égale à 5120 Hz, le temps d'acquisition est égal à 0.8 s et la vitesse de rotation du moteur électrique étant fixée à 1200 tr/min.

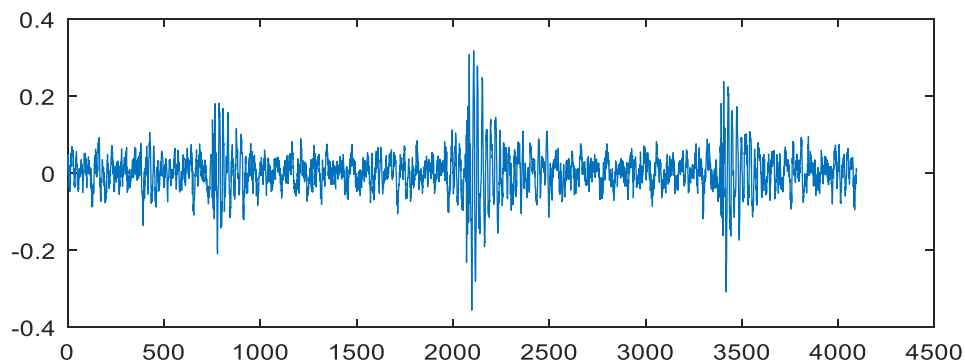


Figure IV-8 signal temporel du signal à 1200tr/min

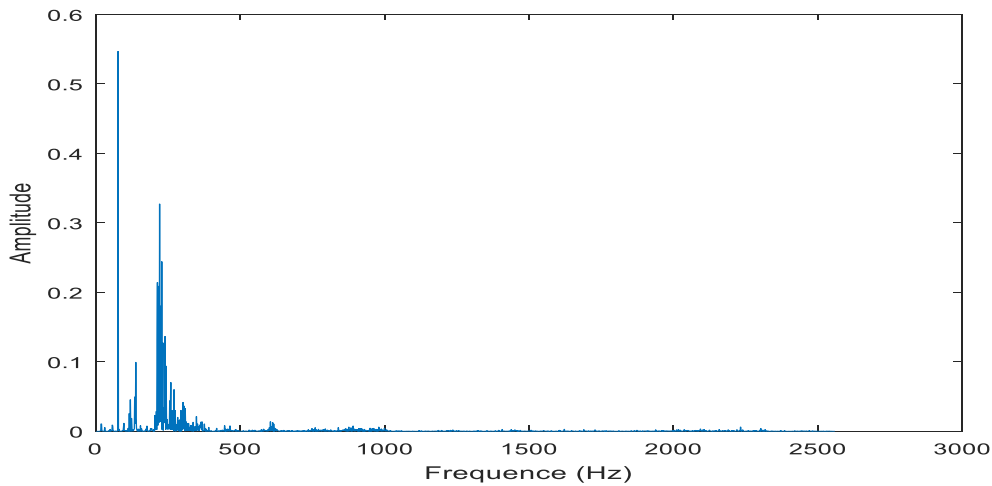


Figure IV-9 densité spectrale du signal

Le spectre du signal temporel (fig.IV.9) montre des peignes de raies aux fréquences de rotations des deux arbres respectivement ainsi qu'une grande énergie au niveau des hautes et des basses fréquences (250Hz).

On a décomposé le signal temporel en utilisant les paquets d'ondelette en niveau 04 (fig. IV.10)

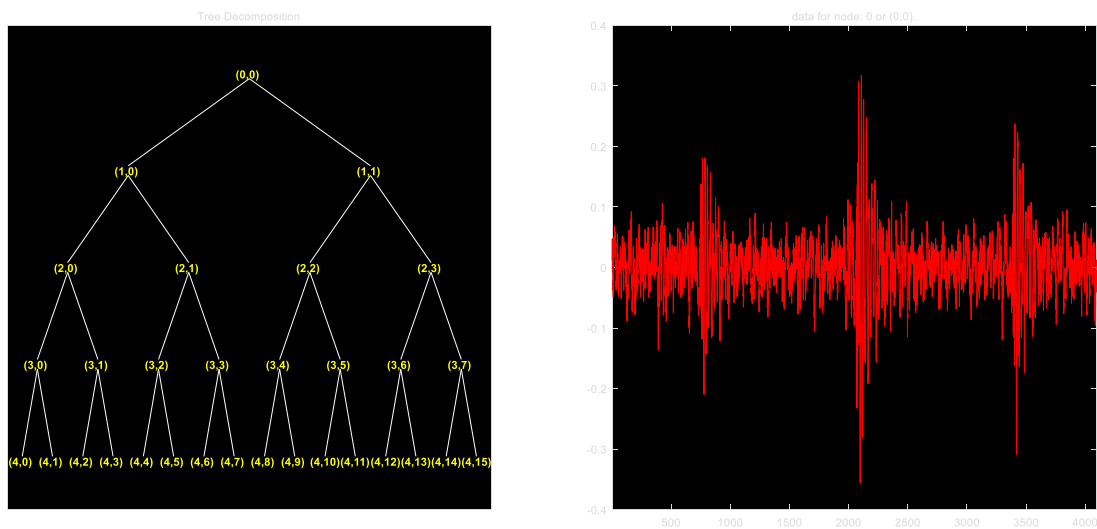


Figure IV-10 arbre de décomposition du signal.

Les valeurs du Kurtosis des 16 bandes sont donnés dans la figure (IV.11). La plus grande valeur de cet indicateur est repérable aux alentours de la bande 8.

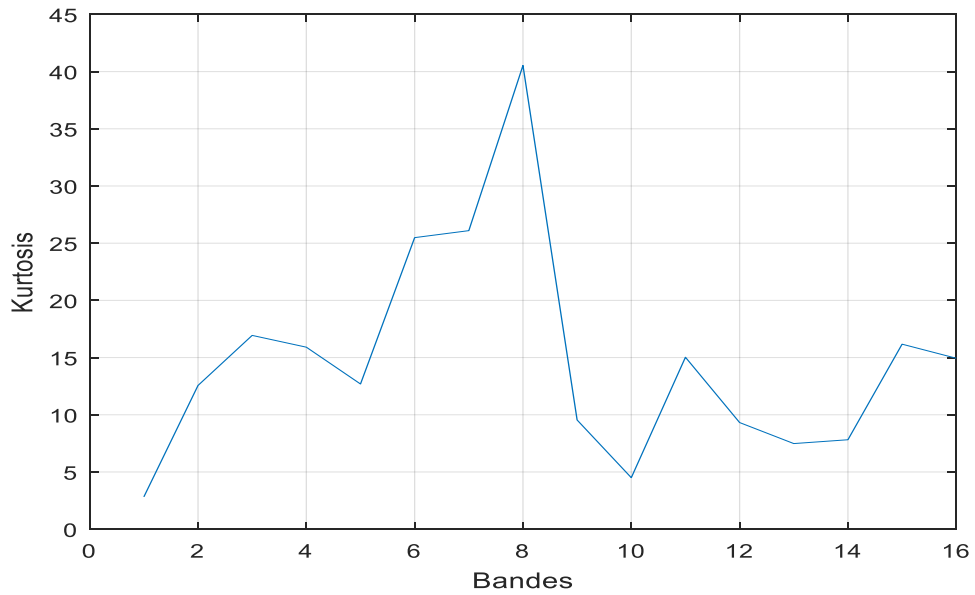


Figure IV-11 le Kurtosis des 16 bandes de la décomposition

Le spectre d'enveloppe des coefficients d'ondelettes de la bande 8 sont donnés dans la figure (IV.12). Nous constatons alors la présence d'un pic à la fréquence de 20 Hz.

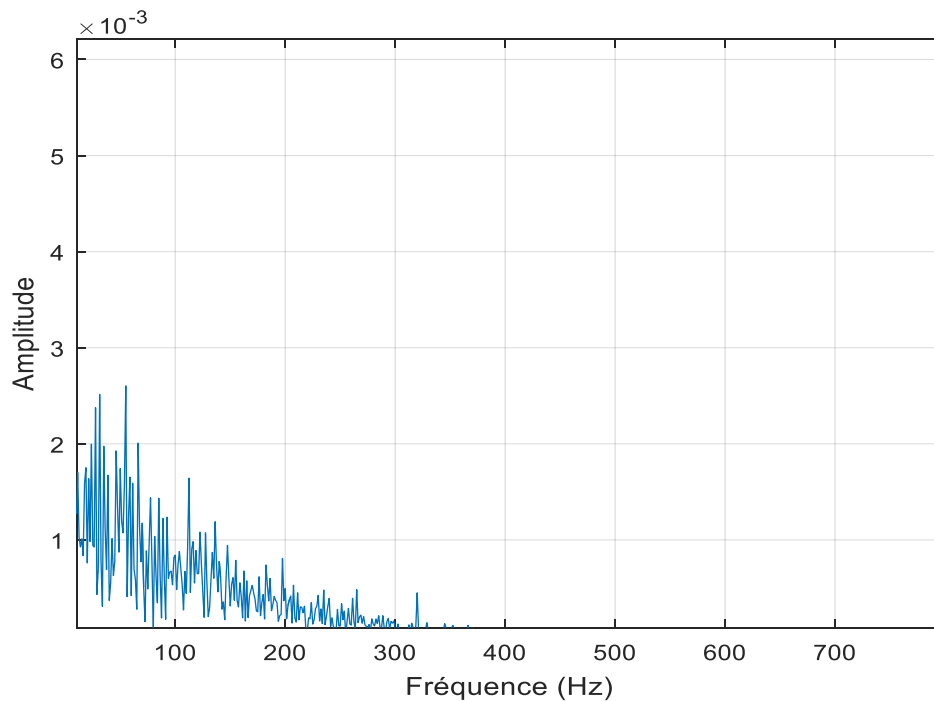


Figure IV-12 spectre d'enveloppe de la bande 8

### IV.3.3 Cas test 3

Avec le même défaut, le capteur est toujours placé sur le palier P3 et la vitesse de rotation est de 2700 tr/min, la fréquence d'échantillonnage est toujours égale à 5120 Hz, le temps d'acquisition étant toujours égal à 0.8s. Le signal recueilli est donné dans la figure (IV.13), ainsi que sa densité spectrale dans la figure (IV.14).

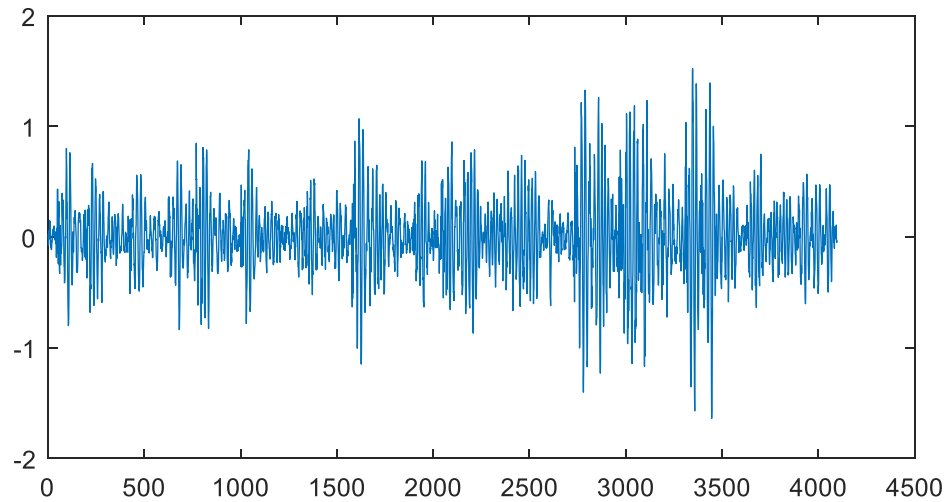


Figure IV-13 signal temporel du signal à 2700 tr/min

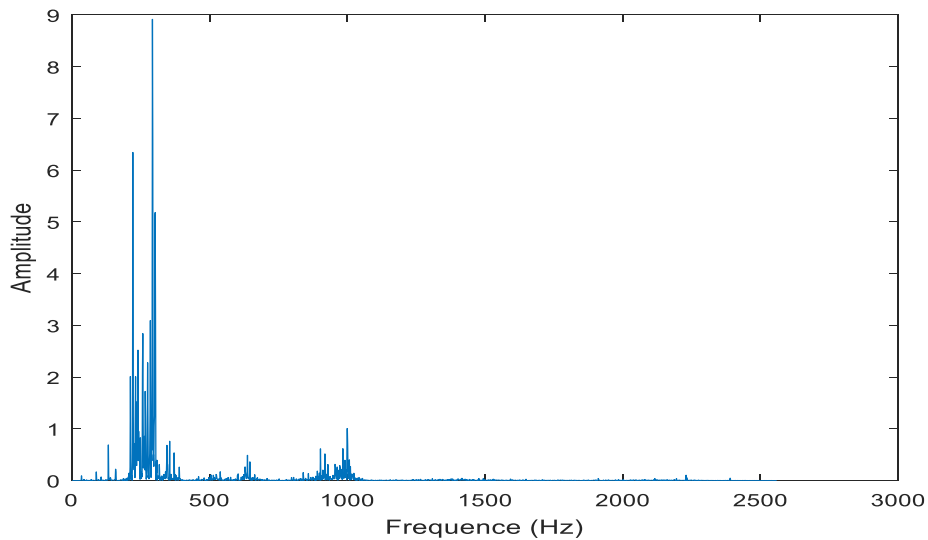


Figure IV-14 densité spectrale du signal.

Le spectre du signal temporel (fig.IV.14) montre des peignes de raies aux fréquences de rotations (hautes et basses fréquences) qui sont respectivement égale à 1000 Hz et 250 Hz.

La figure (IV.15) nous montre l'arbre de décomposition et le niveau de décomposition du signal (niveau 04).

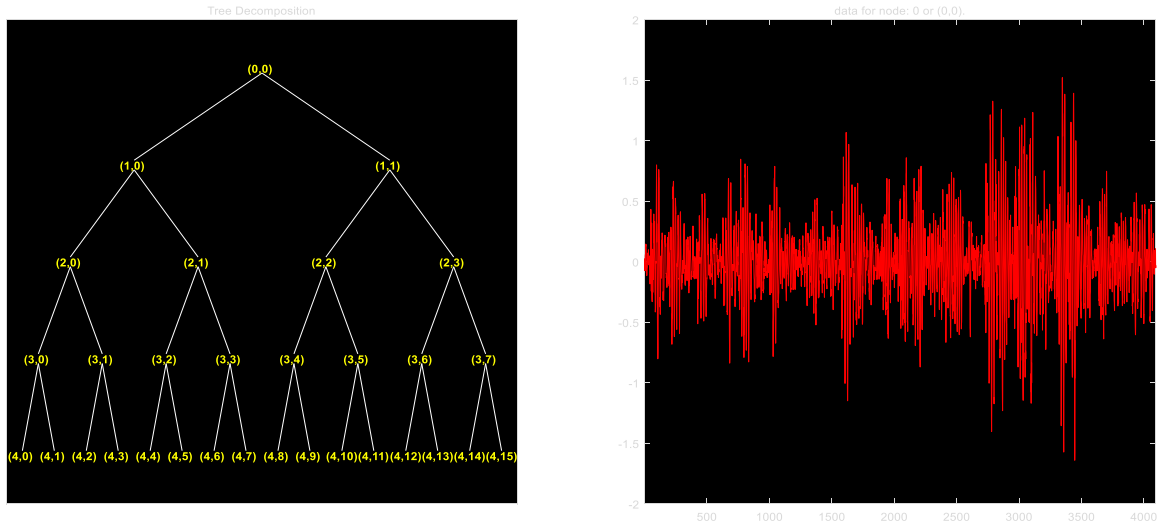


Figure IV-15 arbre de décomposition du signal à analyser.

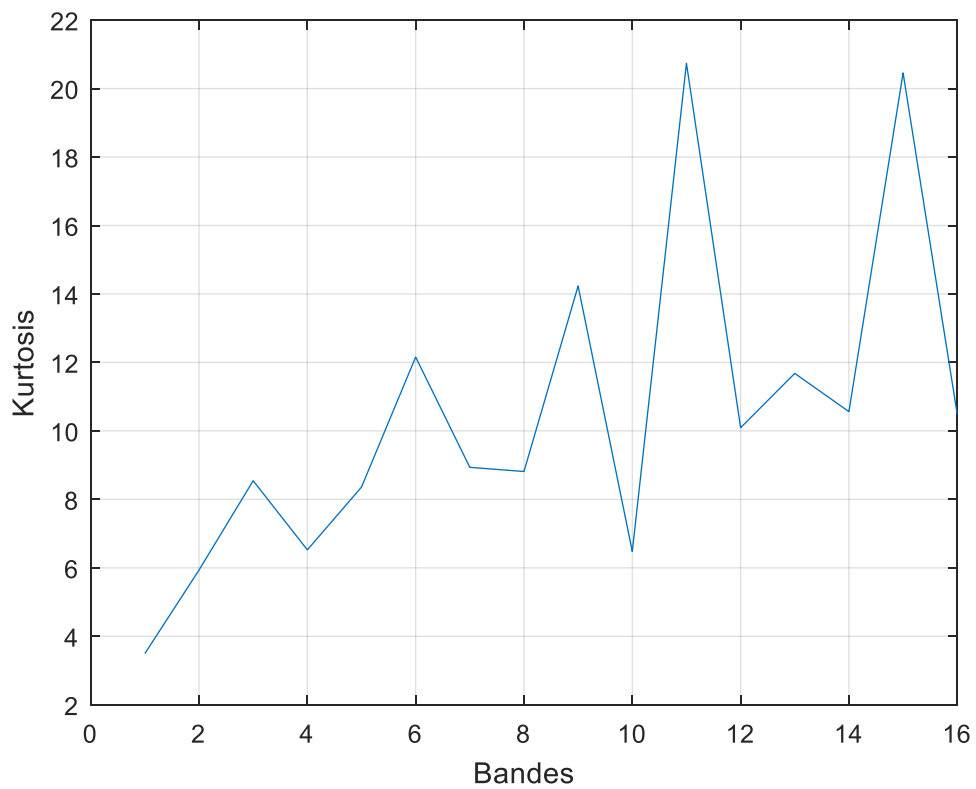
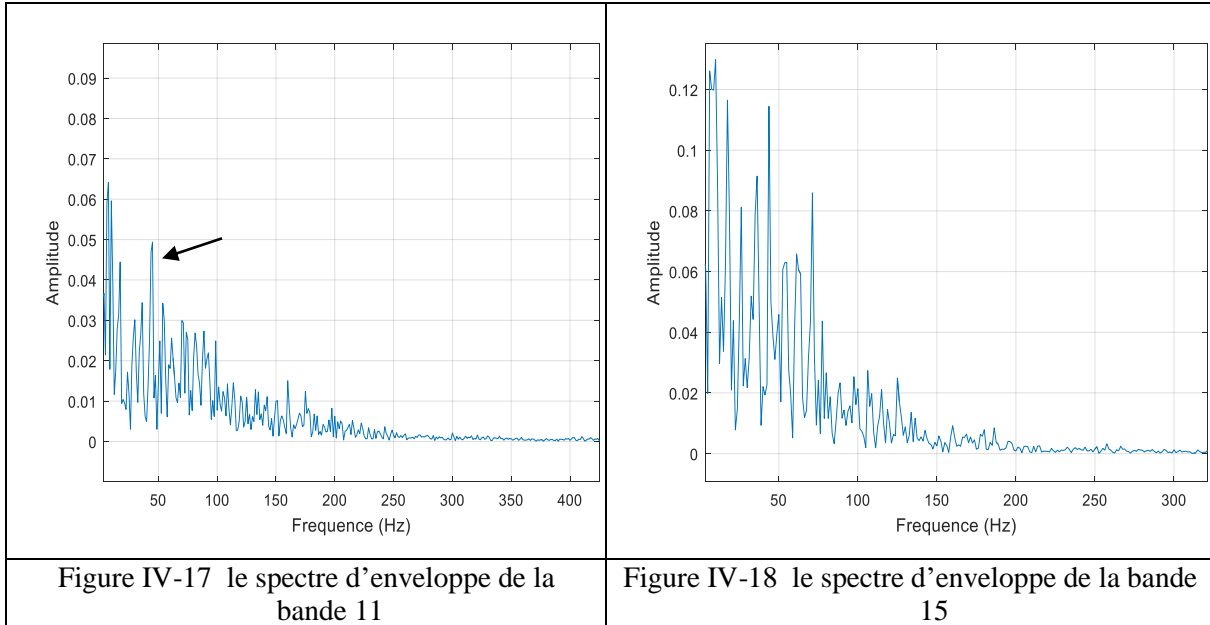


Figure IV-16 Kurtosis des 16 bandes du signal à analyser

Les valeurs du Kurtosis des bandes sont données dans la figure (IV.16), ses plus grandes valeurs se situent dans les alentours de la bande 11 et la bande 15.

Le spectre d'enveloppe des coefficients d'ondelettes de la bande 9 est donnée dans la figure (IV.17) et celui de la bande 15 est donné dans la figure (IV.18) où nous constatons la présence d'un pic à la fréquence de 45 Hz.

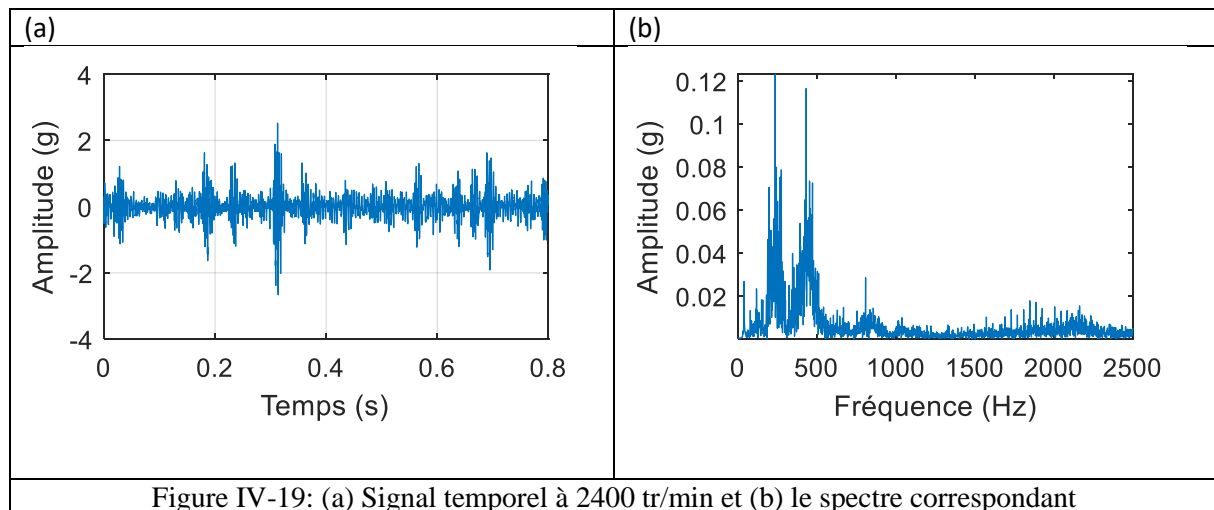


#### IV.3.4 Cas test 4

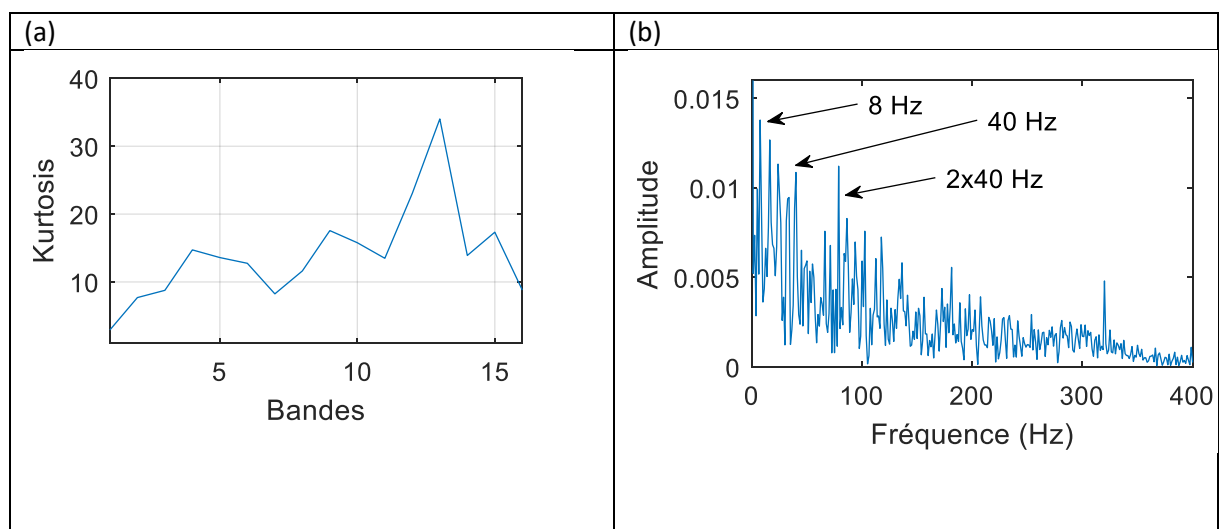
Ce dernier cas concerne un défaut sur chaque pignon, c'est-à-dire il y a arrachement d'une dent sur le pignon d'entrée ainsi que sur la roue. Cette situation engendre un choc lorsque les deux défauts se rencontrent. Ce choc va se produire à la fréquence de coïncidence qui peut déterminer par l'équation suivante :

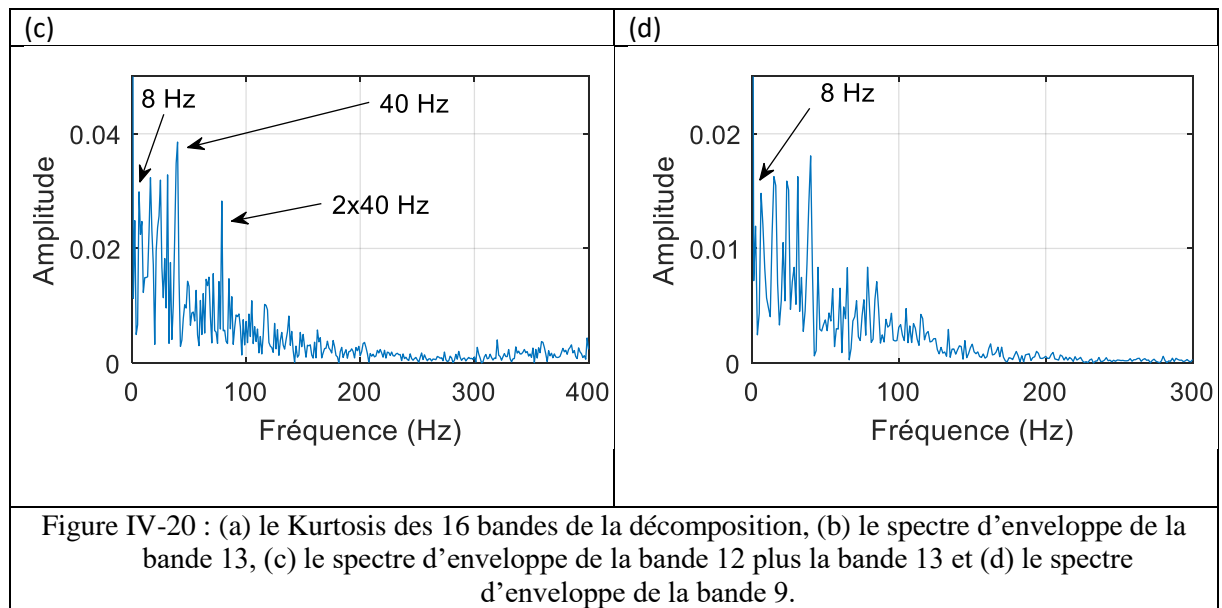
$$f_{coin} = \frac{z_1 f_1}{PPCM(z_1, z_2)} = \frac{z_2 f_2}{PPCM(z_1, z_2)}$$

Le signal temporel est recueilli avec les mêmes caractéristiques que les signaux précédents à la vitesse de rotation de 2400 tr/min (Fig.IV.19). Dans ce cas la fréquence coïncidence est égale à 8 Hz.



La décomposition est réalisée avec la même ondelette (rbio6.8) jusqu'au 4, ce qui donne toujours 16 bandes. Le Kurtosis de ces bandes est donné dans la figure (IV.20) (a) où nous constatons des valeurs importantes aux alentours de la bande 13. Le spectre d'enveloppe de cette bande (figure IV.20(b)) révèle d'une manière claire la présence d'un peigne de raies à la fréquence 8 Hz et un autre à la fréquence 40 Hz. Cette image vibratoire est synonyme de la présence d'un à choc à la fréquence de rotation de l'arbre d'entrée ainsi qu'un autre choc à la fréquence de coïncidence. L'ajout de la bande 12 à la bande 13 qu'il y a aussi un Kurtosis important qui a permis de montrer d'une manière significative les pics à la fréquence 40 Hz (figure IV.20 (c)). La figure (IV.20) (d) donne le spectre d'enveloppe de la bande 9 et dont laquelle nous constatons un peigne de raies à la fréquence 8 Hz engendré par la coïncidence des défauts. Le spectre d'enveloppe de la bande 15 donne les mêmes résultats que celles obtenus avec les bandes étudiées ci-dessus.





#### IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a proposé une méthode basée sur la transformée en ondelettes « paquets d'ondelettes » pour diagnostiquer des défauts d'engrenages. Cette méthode nous donne la possibilité de déterminer les caractéristiques optimales des résonances par ces défauts, et cela permet de détecter la plupart des défauts qui existe.

Ce chapitre nous a montré également la nécessité d'étudier toutes les résonances détectées dans le but d'effectuer un diagnostic fiable et de discerner toutes les éventuelles défaillances qui peuvent affecter les machines tournantes.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Après tant d'analyses effectuées, dans le contexte économique actuel, la réduction des couts de productions est la clé de la survie et du développement de l'entreprise, réduire les couts de la maintenance et augmenter les taux de disponibilité des équipements devient un enjeu indispensable pour toute unité de production, l'augmentation de la durée de vie des équipements d'une machine tournante devient également un sujet de poids qu'il faut prendre en compte. C'est pourquoi définir un programme de maintenance permettant de relever un tel défi s'avère nécessaire.

La surveillance et le diagnostic des défauts d'une machine tournante par l'analyse vibratoire est une tâche délicate est compliquée qui demande de mettre en œuvre des outils spécifiques en matière de traitement de signal et personnel qualifié et spécialisé dans le domaine pour mener à bien toutes taches de recherche et de détection d'anomalies. De plus, cela nécessite une bonne connaissance de la machine, ses caractéristiques, et son historique afin d'hiérarchiser tous types de défauts susceptible de l'affecter, ainsi que les méthodes adéquate à entreprendre pour les surveiller.

Le diagnostic par l'analyse vibratoire permet pratiquement à elle seule de détecter les défauts susceptibles d'apparaître et d'affecter une machine tournante ; un défaut d'alignement, un défaut de balourd, des roulements usés ou endommagés..., qui se traduit par des variations d'efforts internes que subit la machine et conduisent à des modifications de son comportement vibratoire. En utilisant la méthode des paquets d'ondelettes, le traitement de ces signaux dans le domaine spectral a permis de diagnostiquer la présence de défauts sur des pignons (engrenages).

Ce travail nous a montré que l'analyse et le diagnostic vibratoire est une technique prometteuse et bien plus efficace que l'analyse de Fourier pour la détections des défauts susceptible d'apparaître dans une machine tournante dans le but de la maintenance conditionnelle.

## **Bibliographie**

- [1] : **(NF EN13306 , 2001) AFNOR** « Maintenance - Terminologie de la maintenance. »
- [2] : **(NF X 50-501 , 2007) AFNOR** « Maintenance - États de référence des biens : vocabulaire des activités de rénovation et de reconstruction. »
- [3] : **Jan Claude Ligeron** « cours de Fiabilité en Mécanique » M20S/IMdR2009 779 page
- [4] : **(X60-010, 1994) AFNOR** « Maintenance - Concepts et définitions des activités de maintenance »
- [5] : **(X 60-500) AFNOR** « Terminologie relative à la fiabilité - Maintenabilité – Disponibilité »
- [6] : **(Moigne, 2017 ) Chapitre 5.Maintenir.** Dans Supply Chain management, pages 185 à 209.
- [7] : **(FD X 60-000, 2002) AFNOR** « Maintenance industrielle – fonction maintenance ».
- [8] : **R. Keith Mobley**, « AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE”, Second Edition- ISBN : 978-0-7506-7531-4- A volume in Plant Engineering. »
- [9] **P. Chapouille.** Fiabilité. Maintenabilité. Techniques de l’ingénieur, 6 : T4300-T4305, 1980.
- [10] **C. Breneur**, Eléments de maintenance préventive de machines tournante dans le cas de défauts combinés d’engrenages et de roulements, Thèse INSA de Lyon, N° d’ordre 02 ISAL 0096, 2002.
- [11] **G. Duchemin.** La maintenance des machines et des moteurs, traité de maintenance, Techniques de l’ingénieur BM 4188, version 2005.
- [12] **Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2004).** « Conception et évaluation des performances d’un atelier de maintenance ». Journal Européen sur les Systèmes Automatisés, vol. 38, n°1-2/2004, pages 197-222.
- [13] **J. Morel.** Surveillance vibratoire et maintenance prédictive, traité mesure et contrôle, Techniques de l’ingénieur R6100, versioB 2005.
- [14] **CCI Alpes De-Haute-Provence.** Les fiches pratiques TIC, GMAO : gérer la maintenance de ses équipements.

- [15] **CHAOUCH Wafa**. CONTRIBUTION A LA MAINTENANCE D'UNE CHARGEUSE ST1030 DANS LES CONDITIONS SOUTERRAINES, mémoire fin d'étude, Université Larbi Tébessi, TEBESSA
- [16] **F. Monchy**, Maintenance : méthodes et organisation, Dunod DL, Paris 2000.
- [17] **G. Zwingelstein**, Diagnostic de défaillance, Hermès Paris 1997.
- [18] **André CHARDONNET – Dominique THIBAUDON**, Le guide de PDCA de Deming, Éditions d'Organisation, 2003 ISBN : 2-7081-2839-6.
- [19] **Dr. Rémi Bachelet**, Maître de conférence à centrale Lille.
- [20] **Michel RIDOUX**. AMDEC- Moyen Technique de l'ingénieur, AG4220, 07/ 1999.
- [21] **A. Boulanger et C. Pachaud**. Analyse vibratoire en maintenance, Surveillance et diagnostic des machines.
- [22] **M. El Badaoui, M. Guillet, N. Nejjar, J. Danière**. Diagnostic d'un train d'engrenage par analyse cepstrale synchrone. 16<sup>ème</sup> colloque GRETI sur le traitement du signal et des images, 15-19 septembre 1997, Grenoble. France.
- [23] **F. Bolaers, O. Cosinard et L. Rasolofondraibe**. Advanced detection of rolling spalling from de-noising vibratory signals. Control engineering practice, 12 (2004) :181-190.
- [24] **Nabti Mohamed Tahar** « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques » thème de magister université FARHAT Abas Sétif, 2011.
- [25] **Landolsi Foued**. Cours de Diagnostic vibratoire « études des principaux défauts »
- [26] **Maurin Fixation - Emile Maurin**. Mémento techniques de fixation. Edition 04 septembre 2021.
- [27] **Dr. YOUNES Ramdane**. Les roulements. Université Badji Mokhtar. Annaba.
- [28] **T. Emmanuel**. Etude et modélisation de la fatigue de contact en présence d'indentation dans le cas de roulement tout acier et hybrides. Compiègne, France. Septembre 2012.
- [29] **A. Chevalier**. Guide du dessinateur industriel, Hachette Technique, 2004.
- [30] **G. Henriot**. Traité théorique et pratique des engrenages, Tome 1, Dunod, Paris, 1979.

- [31] **Elba, M. Badaoui.** Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l'analyse cepstrale. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Roanne, 1999.
- [32] **Georges Henriot.** ENGRENAGES : Conception - Fabrication - Mise en œuvre. 8<sup>e</sup> Edition, Dunod, Paris 2021.
- [33] **F. Christophe.** Défaillance des engrenages la comprendre pour mieux l'éviter. Fluides et transmission, n° 99, Avril 2007.
- [34] **T. Frederic.** Ondelette pour le signal numérique, éd. HERMES, Paris, 1998.
- [35] **C. Gasquet, P. Witomski.** Analyse de Fourier et application : Filtrage, Calcul numérique et Ondelette, Dunod, Paris 2000.
- [36] **S. Mallat,** "Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models", IEEE Trans, On Accoustic Speech and Signal Proc, Vol. 37, N°. 12, pp. 2091-2110, Decembre 1989.
- [37] **Boukhennoufa Nabil.** Définition et représentation des signaux chapitre 1. Université de Batna.
- [38] **Alain Boulenger • Christian Pachaud.** Aide-mémoire « Surveillance des machines par analyse des vibrations » ; Dunod\_2009
- [39] **S. Zozor et C. Vignat,** Forme entropique du principe d'incertitude et cas d'égalité asymptotique, Colloque GRETSI, 11-14 septembre (2007), Troy.
- [40] **O. ÖZGÖNENEL, G. ÖNBILGIN, C. KOCAMAN,** "Transformer Protection Using the Wavelet Transform," TÜBITAK, Turk J Elec Engin, VOL.13, N°.1, pp.119- 135, 2005.
- [41] **Z. Li, X.Yan, C. Yuan, Z. Peng, L. Li,** "Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method", Mechanical Systems and Signal Processing, 25, pp. 2589–2607, 2011.
- [42] **C. Chui.** "An introduction to wavelets", Academic Press, 1992.
- [43] **A. Djebala,** "Application de la Transformation par Ondelette à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécanique", thèse de Doctorat en Construction Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2008.
- [44] **Meyer, Y.** (1990). Construction de bases orthonormées d'ondelettes. In Colloquium Mathematicum (Vol. 60, No. 1, pp. 141-149). Institute of Mathematics Polish Academy of Sciences. Groupe d'études du Traitement du Signal et des Images.

[45] **M. Misiti, Y Misiti, G. Oppenheim, and J.M. Poggi.** Les ondelettes et leurs applications. Hermes science, Paris, 2003.