



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Commande électrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**DERGHAL ABDERAHMANE ILYES**  
Le: lundi 20 juin 2022

## Diagnostic des défauts de roulement du moteur asynchrone par le paquet d'ondelettes

---

### Jury :

Dr. <b>CHERIET AHMED</b>	<b>Pr</b>	Université de Biskra	Président
Dr. <b>SAHRAOUI MOHAMED</b>	<b>Pr</b>	Université de Biskra	Examineur
Dr. <b>DERGHAL Hamid</b>	<b>MAA</b>	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021 - 2022



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Commande électrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**DERGHAL ABDERAHMMANE ILYES**  
Le: lundi 20 juin 2022

## **Diagnostic des défauts de roulement du moteur asynchrone par le paquet d'ondelettes**

---

Présenté par :

**DERGHAL ABDERAHMMANE ILYES**

Avis favorable de l'encadreur :

**DERGHAL Hamid**

*signature*

### **Avis favorable du Président du Jury**

**Pr.Cheriet Ahmed**

*Signature*

**Cachet et signature**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mon cher père.*

*À ma chère mère.*

*À mon cher frère.*

*À mes chères sœurs.*

*À tous mes proches et mes amis.*

*À tous mes professeurs.*

**DERGHAL ABDERAHMANE  
ILYES**

2021/2022.



## *Remerciements*

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Je tiens à remercier :*

*Mon père Dr. Hamid Derghal pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail :*

*Pr. Cheriet Ahmed (professeur à l'université de Biskra).*

*Pr. Sahraoui Mohamed (professeur à l'université de Biskra).*

*Mes remerciements vont également à tous les enseignants dans le département.*

## Résumé

Notre étude a pour but la détection des défauts de roulement par analyse vibratoire. L'outil de traitement du signal appliqué est basée sur la combinaison de deux méthodes : l'analyse multi résolution en ondelettes « AMRO » ou la transformée en ondelettes discrètes et paquets d'ondelettes et l'analyse d'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert. L'analyse multi-résolution en ondelettes (AMRO) est considérée comme un moyen de filtrage pour améliorer le rapport signal/bruit en filtrant le bruit aléatoire et les autres composantes de la machine pour n'avoir uniquement que la signature du défaut. La transformée de Hilbert a été ensuite employée pour l'extraction de l'enveloppe. Les résultats expérimentaux ont montré que l'approche proposée peut détecter efficacement les défauts de bague interne et externe des roulements à billes par rapport à l'analyse classique de Fourier (FFT).

**Mots Clés : roulement,analyse vibratoire ,analyse multi résolution,enveloppe ,FFT**

### ملخص :

الغرض من دراستنا هو تحديد عيوب المحمل عن طريق استعمال التحليل الاهتزازي. تعتمد اداة معالجة الاشارة المطبقة على الجمع بين اداتان وهما تحليل الموجيات متعدد الدقة او تحويل الموجيات المنفصلة وحزم الموجيات و تحليل المظروف الذي يستند على تحويل هيلبيرت. يعتبر تحليل الموجيات متعدد الدقة طريقة تستخدم لترشيح لتحسين نسبة  $\frac{\text{الاشارة}}{\text{الضوضاء}}$  عن طريق تصفية الضوضاء العشوائية و المكونات الاخرى للالة التي تحتوي فقط على توقيع العيب. ثم يتم استخدام تحويل هيلبيرت لاستخراج المغلف.

اظهرت النتائج التجريبية ان الطريقة المقترحة فعالة ويمكن ان يكتشف جيدا عيوب الحلقة الداخلية و الخارجية في الكرات مقارنة بتحليل فورييه التقليدي .

**الكلمات الرئيسية :** المحمل,التحليل الاهتزازي , تحليل متعدد الدقة , تحليل فورييه التقليدي.

## Liste des acronymes

Abréviation	Dénomination
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>CWT</b>	"Continue Wavelet Transform", Transformée en ondelette continue.
<b>DWT</b>	"Discrete Wavelet Transform". Transformée en ondelettes discrètes.
<b>FFT</b>	"Fast Fourier Transform". Transformée de Fourier rapide.
<b>FT</b>	"Fourier Transform". transformée de Fourier.
<b>STFT</b>	"Short Time Fourier Transform". Transformée de Fourier courte.
<b>WP</b>	"Wavelet Packets". Paquets d'ondelettes.
<b>WT</b>	"Wavelet Transform". Transformation de la fonction d'ondelette.
<b>DFT</b>	" Discrete Fourier transform". Transformée de Fourier discrète
<b>WPT</b>	" Wavelet Packets Transform ". Transformation en paquets d'ondelettes.
<b>CA</b>	Coefficient d'ondelette d'approximation.
<b>CD</b>	Coefficient d'ondelette de détail.
<b>MAS</b>	machine asynchrone
<b>DB</b>	Daubechies.
<b>PWM</b>	Pulse-width modulation
<b>TBF</b>	Temps de Bonne Fonction
<b>AMRO</b>	L'analyse multi-résolution en ondelettes
<b>TA</b>	Temps arrêt
<b>DWPT</b>	Discret wavelet transform
<b>WCRU</b>	western case reserve university

## Liste des tableaux

<b>TABLEAU N°</b>	<b>TITRE</b>	<b>PAGE</b>
<b>II.1</b>	les quatre niveaux de maintenance	<b>25</b>
<b>II.2</b>	L'indicateur de surveillance et l'amplitude correspondante	<b>30</b>
<b>III.1</b>	Transformations de translation et d'échelle dans une ondelette	<b>42</b>
<b>III.2</b>	Information de chaque paquet d'ondelettes pour le signal $X[n]$	<b>49</b>
<b>III.3</b>	Familles d'ondelettes	<b>50</b>
<b>IV.1</b>	Caractéristiques des roulements et des fréquences des défauts	<b>58</b>
<b>IV.2</b>	Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistant	<b>59</b>

## Liste des symboles

Symboles	Dénomination
$\psi(\mathbf{t})$	Ondelette mère
$\phi(\mathbf{t})$	fonction d'échelle
$a$	Paramètre d'échelle ou de dilatation.
$b$	Paramètre de translation.
$\psi_{\mathbf{a},\mathbf{b}}(\mathbf{t})$	Famille d'ondelette
$\psi_{j,k}(\mathbf{t})$	Famille d'ondelette dans le domaine discret
$E(\mathbf{k}, j)$	l'énergie des paquets ondelette
$\delta(\mathbf{t})$	Fonction Dirac
$N_r$	nombre de barres rotoriques.
$f_s$	la fréquence fondamentale.
$S$	le glissement.
$f_d$	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité dynamique.
$f_{mix}$	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
$V$	L'ordre des harmoniques de temps de la F.M.M.
$f_r$	Fréquence de rotation du rotor.
$f_{bext}$	Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe du roulement.
$f_{bint}$	Fréquence caractéristique du défaut de la bague interne du roulement.
$f_{bill}$	Fréquence caractéristique du défaut de la bille du roulement.
$f_{cage}$	Fréquence caractéristique du défaut de la cage du roulement
$f_b$	Fréquence caractéristique du défaut de barres
$f_{cc}$	fréquence de court-circuit
$P$	nombre paire des pôles
$n_d$	nombre d'ordre d'excentricité
$D_b$	diamètre d'un élément roulant
$D_c$	distance entre les centres des billes
$T$	période d'intervention prédéterminée.
$I_{ps}$	intervention préventive systématique
$x(\mathbf{n})$	Signal échantillonné ou processus modélisé.
$x(\mathbf{t})$	Signal temporel
$X(\mathbf{f})$	Transformée de Fourier de $x(\mathbf{t})$
$V_c$	Amplitude crête.
$V_{cc}$	(peak to peak en anglais) ou l'amplitude crête à crête.
$V_{eff}$	valeur efficace
$\tilde{f}(\mathbf{t})$	la transformée de Hilbert

## Liste des figures

<b>FIGURE N °</b>	<b>TITRE</b>	<b>PAGE</b>
<b>Figure I.1</b>	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b>	Stator	<b>5</b>
<b>Figure I.3</b>	Structure d'un Rotor en cage d'écureuil	<b>5</b>
<b>Figure I.4</b>	Structure d'un Rotor à bague	<b>6</b>
<b>Figure I.5</b>	Rhéostat connectée avec les trois bornes Rotorique	<b>6</b>
<b>Figure I.6</b>	roulement à bille	<b>7</b>
<b>Figure I.7</b>	Proportion des défauts	<b>7</b>
<b>Figure I.8</b>	Frottement rotor-stator d'un moteur à induction causé par un défaut d'excentricité	<b>9</b>
<b>Figure I.9</b>	<i>Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte</i>	<b>9</b>
<b>Figure I.10</b>	excentricité statique	<b>10</b>
<b>Figure I.11</b>	Excentricité dynamique	<b>10</b>
<b>Figure I.12</b>	excentricité mixte	<b>11</b>
<b>Figure I.13</b>	dégradation d'un roulement	<b>12</b>
<b>Figure I.14</b>	<i>Dimensions d'un roulement à billes</i>	<b>13</b>
<b>Figure I.15</b>	Représentation des différents défauts statoriques possibles	<b>15</b>
<b>Figure I.16</b>	Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone	<b>16</b>
<b>Figure I.17</b>	Court-circuit entre spires	<b>16</b>
<b>Figure I.18</b>	court-circuit entre phases	<b>17</b>
<b>Figure I.19</b>	Défaut d'une barre cassée	<b>18</b>
<b>Figure I.20</b>	<i>Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit</i>	<b>19</b>
<b>Figure II.1</b>	Schématisation des objectifs de la maintenance	<b>21</b>
<b>Figure II.2</b>	Les différents types de maintenance	<b>21</b>
<b>Figure II.3</b>	Evolution du niveau de performance en maintenance corrective	<b>22</b>
<b>Figure II.4</b>	Illustration du principe de la maintenance systématique	<b>23</b>
<b>Figure II.5</b>	Evolution du niveau de performance en maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle	<b>24</b>
<b>Figure II.6</b>	Classification des signaux	<b>27</b>
<b>Figure II.7</b>	<i>les différents types des signaux vibratoires</i>	<b>28</b>
<b>Figure II.8</b>	Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque	<b>29</b>
<b>Figure II.9</b>	Nature d'une vibration	<b>30</b>
<b>Figure II.10</b>	Traitement FFT d'une forme d'onde vibratoire complexe	<b>31</b>
<b>Figure II.11</b>	Prosimètre monte sur un palier	<b>32</b>
<b>Figure II.12</b>	schéma de vélocimétrie	<b>33</b>
<b>Figure II.13</b>	Schéma de principe d'un accéléromètre	<b>33</b>
<b>Figure II.14</b>	Choix directionnel pour la prise de mesure	<b>34</b>

<b>Figure III.1</b>	Schéma de la transformation de Fourier	<b>37</b>
<b>Figure III.2</b>	Fonction sinusoïdale discrétisée dans le temps	<b>38</b>
<b>Figure III.3</b>	Représentation temporelle et fréquentielle 'somme de deux sinusödes' $F_1 = x_1 + x_2$	<b>39</b>
<b>Figure III.4</b>	Représentation temporelle et fréquentielle 'succession de deux sinusödes' $F_1 = x_1 \oplus x_2$	<b>40</b>
<b>Figure III.5</b>	Schéma de la transformation de Fourier à intervalles (STFT)	<b>41</b>
<b>Figure III.6</b>	processus de mise à l'échelle et de traduction	<b>42</b>
<b>Figure III.7</b>	Schéma de la transformation en ondelettes	<b>42</b>
<b>Figure III.8</b>	Les étape de la transformation en ondelettes continue	<b>44</b>
<b>Figure III.9</b>	Décomposition du signal $s(n)$ , en approximations et détails	<b>45</b>
<b>Figure III.10</b>	Décomposition simple du signal $s$ en approximations et détails	<b>46</b>
<b>Figure III.11</b>	<i>Décomposition du signal <math>S</math> en multi-niveaux</i>	<b>47</b>
<b>Figure III.12</b>	Décomposition en paquet d'ondelettes	<b>48</b>
<b>Figure III.13</b>	Fonction d'ondelette de Haar	<b>51</b>
<b>Figure III.14</b>	ondelettes de daubechies	<b>52</b>
<b>Figure III.15</b>	Les ondelettes symlet	<b>52</b>
<b>Figure III.16</b>	Ondelette de MORLET	<b>52</b>
<b>Figure III.17</b>	Ondelette de MEYER	<b>53</b>
<b>Figure III.18</b>	Ondelette chapeau mexicain	<b>53</b>
<b>Figure III.19</b>	Famille d'ondelettes gaussiennes	<b>54</b>
<b>Figure IV.1</b>	Banc d'essai de roulements l'université Case Western Reserve	<b>57</b>
<b>Figure IV.2</b>	Signaux vibratoires de l'état normal	<b>59</b>
<b>Figure IV.3</b>	Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague intérieure du roulement	<b>59</b>
<b>Figure IV.4</b>	Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague extérieure du roulement	<b>60</b>
<b>Figure IV.5</b>	Spectre FFT défauts bague intérieur et bague extérieur mesurée à 1797 tr/mn et 1730 tr/mn	<b>60</b>
<b>Figure IV.6</b>	Méthode proposée pour le diagnostic des défauts dans les roulements à billes	<b>61</b>
<b>Figure IV.7</b>	(a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieur mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1	<b>63</b>
<b>Figure IV.8</b>	(a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieur mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1	<b>64</b>

<b>Figure IV.9</b>	(a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieur mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1	<b>65</b>
<b>Figure IV.10</b>	(a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieur mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1	<b>66</b>
<b>Figure IV.11</b>	L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre	<b>67</b>
<b>Figure IV.12</b>	L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 son spectre	<b>68</b>
<b>Figure IV.13</b>	L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre	<b>69</b>
<b>Figure IV.14</b>	L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre	<b>70</b>
<b>Figure IV.15</b>	Distribution d'énergie : Défaut de bague intérieur mesuré 1797 tr/min Défaut de bague intérieur mesuré 1730 tr/min, Défaut de bague extérieure mesuré 1797 tr/min, Défaut de bague extérieure mesuré 1730 tr/min, état sain	<b>71</b>
<b>Figure IV.16</b>	Spectre d'enveloppe de défauts de bague intérieur (a) Mesuré à 1797 tr/min,(b) Mesuré à 1730 tr/min	<b>72</b>
<b>Figure IV.17</b>	Spectre d'enveloppe de défaut de bague extérieure (a) Mesuré 1797 tr/min, (b) Mesuré 1730 tr/min	<b>73</b>

<b>TABLE DES MATIERES</b>		<b>Page</b>
	<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	
<b>CHAPITRE I : Les Défaits du moteur asynchrone</b>		
<b>Introduction Générale</b>		<b>01/02</b>
<b>I.1</b>	Introduction	<b>3</b>
<b>I.2</b>	Eléments de constitution de la machine asynchrone	<b>3</b>
<b>I.2.1</b>	Stator	<b>4</b>
<b>I.2.2</b>	Le rotor	<b>5</b>
<b>A</b>	Rotor Cage d'écureuil	<b>5</b>
<b>B</b>	Rotor bobiné	<b>6</b>
<b>I.2.3</b>	Les paliers	<b>6</b>
<b>I.3</b>	Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage	<b>7</b>
<b>I.3.1</b>	Défauts d'ordre mécaniques	<b>8</b>
<b>I.3.1.1</b>	Défauts Excentricité dans les moteurs à induction	<b>8</b>
<b>A</b>	Excentricité statique	<b>9</b>
<b>B</b>	Excentricité dynamique	<b>10</b>
<b>C</b>	Excentricité mixte	<b>11</b>
<b>I.3.1.2</b>	Défauts des roulements	<b>12</b>
<b>I.3.1.3</b>	Défaillances du flasque	<b>14</b>
<b>I.3.1.4</b>	Défaillances de l'arbre	<b>14</b>
<b>I.3.2</b>	Défauts d'ordre électrique	<b>15</b>
<b>I.3.2.1</b>	Défaillances des circuits électriques statoriques	<b>15</b>
<b>I.3.2.1.1</b>	Court-circuit entre spires	<b>16</b>
<b>I.3.2.1.2</b>	Court-circuit entre phases	<b>16</b>
<b>I.3.2.1.3</b>	Défauts de circuit magnétique	<b>17</b>

<b>I.3 .2 .1.4</b>	Défauts de la boîte à bornes	<b>17</b>
<b>I.3 .2 .2</b>	Défaillances des circuits électriques rotoriques	<b>17</b>
<b>I.3 .2 .2 .1</b>	Rupture du Barres	<b>18</b>
<b>I.3 .2 .2 .2</b>	Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit	<b>19</b>
<b>I.4</b>	Conclusion	19
<b>CHAPITRE II :Maintenance et analyse vibratoire</b>		
<b>II.1</b>	Introduction	<b>20</b>
<b>II.2</b>	La Maintenance	<b>20</b>
<b>II.2.1</b>	Définition de la maintenance	<b>20</b>
<b>II.2.2</b>	Objectifs de la maintenance	<b>20</b>
<b>II.2.3</b>	Les différents types de maintenance	<b>21</b>
<b>II.2.3.1</b>	Maintenance corrective	<b>22</b>
<b>A</b>	Maintenance corrective avec élimination des défauts	<b>22</b>
<b>B</b>	Maintenance corrective avec élimination des causes	<b>22</b>
<b>II.2.3.1.1</b>	Avantages de la maintenance corrective	<b>22</b>
<b>II.2.3.1.2</b>	Inconvénients de la maintenance corrective	<b>22</b>
<b>II.2.3.2</b>	Maintenance préventive	<b>23</b>
<b>II.2.3.3</b>	La maintenance preventive systématique	<b>23</b>
<b>II.2.3.4</b>	La maintenance préventive conditionnelle	<b>24</b>
<b>II.2.3.4.1</b>	Avantages de la maintenance préventive	<b>24</b>
<b>II.2.3.4.2</b>	Inconvénients de la maintenance préventive	<b>24</b>
<b>II.2.4</b>	Niveaux de maintenance	<b>25</b>
<b>II.2.5</b>	les fonctions de la maintenance	<b>25</b>
<b>II.3</b>	Généralité sur les signaux	<b>26</b>
<b>II.3.1</b>	Définition d'un signal	<b>26</b>
<b>II.3.2</b>	Classification des signaux	<b>26</b>
<b>II.3.3</b>	Types de signaux	<b>27</b>
<b>II.3.3.1</b>	Déterministe	<b>27</b>

<b>A</b>	Périodiques	<b>27</b>
<b>B</b>	Non périodiques	<b>27</b>
<b>II.3.3.2</b>	Signaux aléatoires	<b>28</b>
<b>II.4</b>	Analyse vibratoire	<b>28</b>
<b>II.4.1</b>	Définition d'une vibration	<b>28</b>
<b>II.4.2</b>	Caractéristiques d'une vibration	<b>29</b>
<b>A</b>	Fréquence	<b>29</b>
<b>B</b>	Amplitude	<b>29</b>
<b>C</b>	Nature d'une vibration	<b>30</b>
<b>II.4.3</b>	Représentation du signal vibratoire	<b>30</b>
<b>II.4.3.1</b>	Représentation temporelle	<b>30</b>
<b>II.4.3.2</b>	Représentation spectrale (ou fréquentielle)	<b>30</b>
<b>II.4.4</b>	Caractéristiques d'un signal vibratoire	<b>31</b>
<b>II.4.5</b>	Les capteurs de vibration	<b>31</b>
<b>A</b>	Capteur de déplacement	<b>32</b>
<b>B</b>	Capteurs de vitesse	<b>32</b>
<b>C</b>	Capteurs d'accélération (accéléromètres)	<b>33</b>
<b>II.4.6</b>	Choix de l'emplacement des capteurs	<b>33</b>
<b>II.5</b>	Conclusion	<b>35</b>
<b>CHAPITRE III : Transformées d'ondelettes</b>		
<b>III.1</b>	Introduction	<b>36</b>
<b>III.2</b>	Analyse de Fourier	<b>37</b>
<b>III .2.1</b>	Transformer en Séries de Fourier	<b>37</b>

<b>III .2.2</b>	Transformée de Fourier discrète	<b>38</b>
<b>III.2.3</b>	La transformée de Fourier rapide	<b>39</b>
<b>III.2.4</b>	<i>Exemple d'application de la transformée de Fourier FT</i>	<b>39</b>
<b>III.2.4.1</b>	<i>Signal stationnaire</i>	<b>39</b>
<b>III.2.4.2</b>	<i>Signal non stationnaire</i>	<b>39</b>
<b>III.2.5</b>	Analyse de Fourier par intervalles (STFT)	<b>40</b>
<b>III.3</b>	La Transformée en Ondelette	<b>41</b>
<b>III.3.1</b>	Historique	<b>41</b>
<b>III.3.2</b>	Définition	<b>41</b>
<b>III.3.3</b>	Transformée en ondelettes continues (CWT)	<b>43</b>
<b>III.3.3.1</b>	Calcul de la transformée en ondelettes continues	<b>43</b>
<b>III.3.4</b>	Transformée en ondelettes discrètes (DWT)	<b>44</b>
<b>III.3.4.1</b>	Décomposition simple	<b>46</b>
<b>III.3.4.2</b>	Décomposition multi niveaux	<b>47</b>
<b>III.4</b>	La transformée en paquet d'ondelette	<b>48</b>
<b>III.4.1</b>	Energie de la décomposition d'ondelette	<b>49</b>
<b>III.5</b>	La famille d'ondelettes (Mère ondelette)	<b>50</b>
<b>III.5.1</b>	Ondelette de HAAR	<b>51</b>
<b>III.5.2</b>	<i>Ondelette de Daubechies</i>	<b>51</b>
<b>III.5.3</b>	Les symlets	<b>52</b>
<b>III.5.4</b>	<i>Ondelette de MORLET</i>	<b>52</b>
<b>III.5.5</b>	<i>Ondelette de MEYER</i>	<b>53</b>
<b>III.5.6</b>	Ondelette Chapeau mexicain	<b>53</b>
<b>III.5.7</b>	<i>Ondelette gaussienne</i>	<b>54</b>

<b>III.6</b>	<i>Transformée de Hilbert (TH)</i>	<b>55</b>
<b>III.7</b>	<i>Conclusion</i>	<b>55</b>

<b>Chapitre IV: Diagnostic des défauts de roulement par transformée en ondelettes</b>		
<b>IV.1</b>	Introduction	<b>56</b>
<b>IV.2</b>	Présentation de banc d'essais	<b>56</b>
<b>IV.3</b>	Analyse spectrale de Fourier par FFT	<b>60</b>
<b>IV.4</b>	Application de l'AMRO pour diagnostiquer les défauts de roulement	<b>61</b>
<b>IV.5</b>	Application de l'analyse par paquets d'ondelettes pour diagnostiquer les défauts de roulement	<b>67</b>
<b>IV.6</b>	Méthode enveloppe spectrale avec filtrage passe bande	<b>72</b>
<b>IV.7</b>	Conclusion	<b>74/75</b>
Conclusion générale		
Références Bibliographiques		

# Introduction Générale

Les industries d'aujourd'hui possèdent une variété d'équipements rotatifs dans lesquels les roulements sont considérés comme les composants les plus essentiels. La fonction des roulements dans les équipements rotatifs est de permettre le mouvement de rotation de l'arbre par rapport à la structure fixe. Pendant le fonctionnement, les roulements sont soumis à des charges lourdes et dynamiques générées par les machines et transmises par les composants des roulements à éléments roulants.

L'état des roulements joue un rôle important dans un système à haute production où plusieurs machines rotatives contribuent au système de production. Toute défaillance inattendue d'un roulement dans une machine entraîne une augmentation des temps d'arrêt, des coûts de production et des accidents. Par conséquent, l'application de la maintenance prédictive et de la surveillance de l'état des roulements peut permettre de surmonter partiellement ces arrêts non désirés. La principale cause de défaillance des roulements est la fatigue des composants des roulements qui sont soumis à des charges cycliques. D'autres facteurs tels qu'une lubrification inadéquate, la poussière, la contamination, une mauvaise manipulation et des défauts de fabrication réduisent encore la durée de vie des roulements. En général, la fatigue des composants des roulements à éléments roulants entraîne des défauts localisés tels que des piqûres, des fissures et des écailles. Ces défauts s'agrandissent progressivement au fil du temps et entraînent un dysfonctionnement des composants supportés, voire une défaillance catastrophique. Ainsi, la maintenance prédictive basée sur l'état devient une stratégie efficace dans les industries modernes pour identifier et étudier les caractéristiques des défauts des roulements. L'identification des défauts des roulements au stade précoce de la défaillance est une tâche difficile, laborieuse et peu fiable pour les ingénieurs de l'industrie. Parmi les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts de roulements, l'analyse vibratoire est celle qui a trouvé la plus large application. Les chercheurs ont développé une grande variété de techniques d'analyse des signaux vibratoires afin de surveiller en permanence l'état des roulements et d'obtenir des performances sans temps d'arrêt. La surveillance de l'état des roulements comprend trois étapes fondamentales. Tout d'abord, les signaux vibratoires bruts sont collectés à l'aide d'un capteur de vibrations. La présence d'un défaut dans les composants du roulement génère des impulsions qui correspondent au signal de vibration. L'étape suivante

consiste à appliquer des techniques appropriées de traitement des signaux de vibration pour extraire les caractéristiques souhaitées. Sur la base des caractéristiques extraites, une décision est prise concernant la maintenance du système.

Plusieurs techniques sont à mentionner et qui peuvent être utilisées pour détecter et diagnostiquer les défauts de roulements telles que la transformée de Fourier rapide (TFR) ou (FFT), l'analyse de l'enveloppe (EA). L'analyse Multi-résolution en Ondelettes (AMRO) est un outil très puissant de traitement du signal qui est utilisé dans de nombreuses applications et précisément le filtrage des signaux. La transformé de Hilbert est une technique de traitement du signal utilisé pour l'extraction de l'enveloppe. Le présent travail, que nous avons effectué dans ce cadre est organisé dans ce mémoire sous forme de quatre chapitres :

- ✓ Dans le premier chapitre, nous avons présenté les défauts les plus connus pour les machines électriques tournantes.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à une étude sur les bases théoriques de la maintenance et l'analyse vibratoire.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré au traitement du signal et la transformée en ondelettes (TO).
- ✓ Le quatrième chapitre présente des applications relatives au diagnostic des défauts de roulement issus de la base de donnée (WCRU), en appliquant les méthodes (TO) et la démodulation d'enveloppe sur des signaux de roulements à billes présentant des défauts dans la bague intérieure et la bague extérieure pour différentes charges. Ensuite, les résultats obtenus seront discutés. En fin une conclusion générale

## **Chapitre 1 :**

# **Les Défaits du moteur asynchrone**

### **I.1 Introduction :**

La croissance utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore le transport ferroviaire. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise sans oublier les pertes de production occasionnées.

Dans les secteurs nucléaires il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes, du matériel et de l'environnement, car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement.

Dans ce premier chapitre, on va présenter :

- Rappel sur les éléments de constitution d'une machine asynchrone.
- Un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine asynchrone d'écureuil. [1]

### **I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone :**

Dans cette partie, nous souhaitons présenter brièvement la composition de la machine à induction, Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes : [2]

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

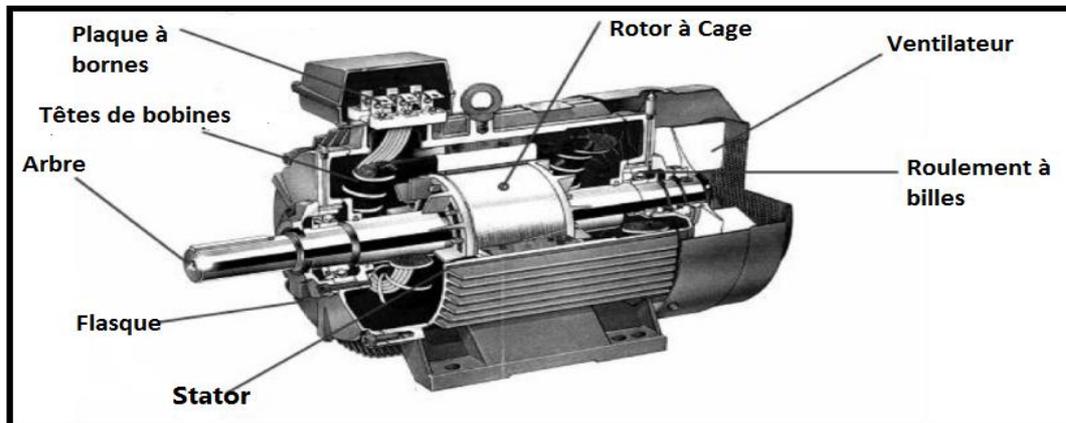


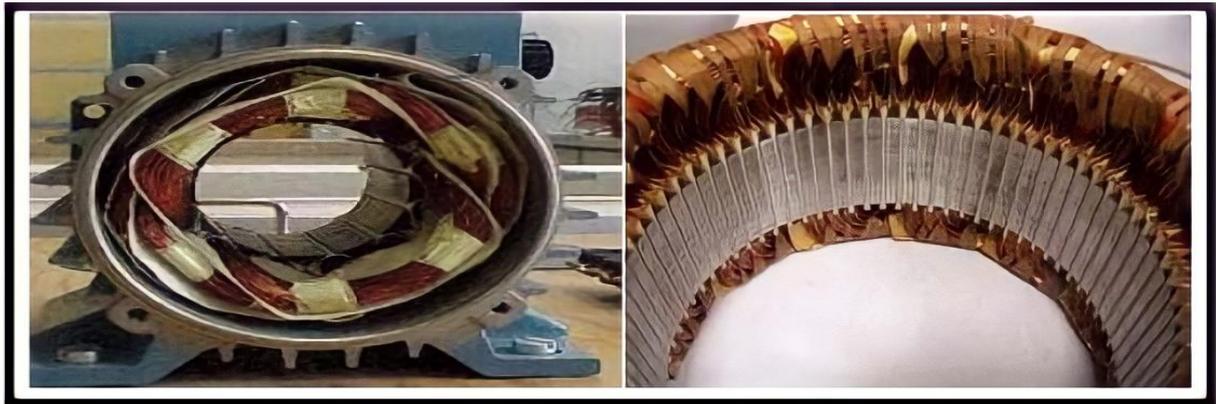
Figure I.1: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

### I.2.1 Stator

Le stator d'un moteur à induction est constitué de plaques d'acier sur lesquelles sont placés les enroulements du stator, Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, elles sont découpées en sections. Ces tôles sont généralement vernies pour limiter les effets du courant de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. L'isolation entre l'enroulement électrique et le noyau du stator est réalisée à l'aide de matériaux isolants.

Le stator de la machine à induction est également équipé d'une boîte à bornes dans laquelle l'alimentation électrique est connectée. [3][4]



**Figure I.2:** Stator [5]

### I.2.2 Le rotor :

C'est la partie mobile du moteur, qui tourne pendant le fonctionnement.

Le circuit magnétique du rotor est composé de tôles d'acier qui, généralement, proviennent du même endroit que celles utilisées pour construire le stator. Il existe deux types de rotors dans les machines à induction : les rotors bobinés et les rotors à cage d'écureuil. [3]

#### A) Rotor Cage d'écureuil :

Le rotor à cage est simplement constitué de barres en cuivre pour les gros moteurs ou en aluminium pour les petits logées dans des encoches rotoriques. Ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités par un anneau de court-circuit. eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.[4][6]



**Figure I.3:** Structure d'un Rotor en cage d'écureuil. [5]

### B) Rotor bobiné :

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé connecté en étoile et les trois bornes restantes sont reliées à trois bagues collectrices qui, par l'intermédiaire de balais, permettent la connexion externe de résistances pour limiter le courant du rotor.

L'insertion de ces résistances permet de réduire le courant de démarrage tout en maintenant un bon couple, qui peut même être maximal au démarrage.

Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil leur coût de maintenance plus élevés. qui ont presque disparu aujourd'hui grâce aux systèmes de démarrage électronique pour le moteur à rotor en cage.[5][7]

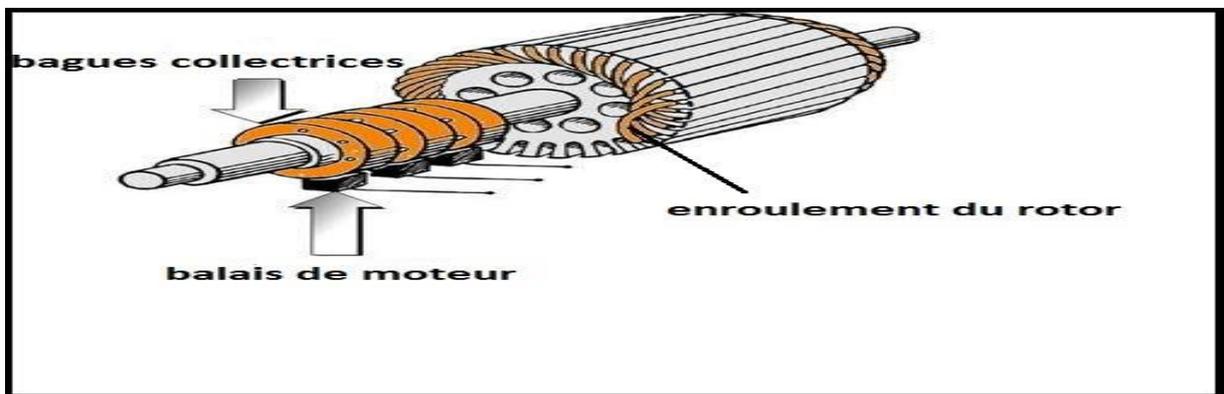


Fig. I.4. Structure d'un Rotor à bague [7]

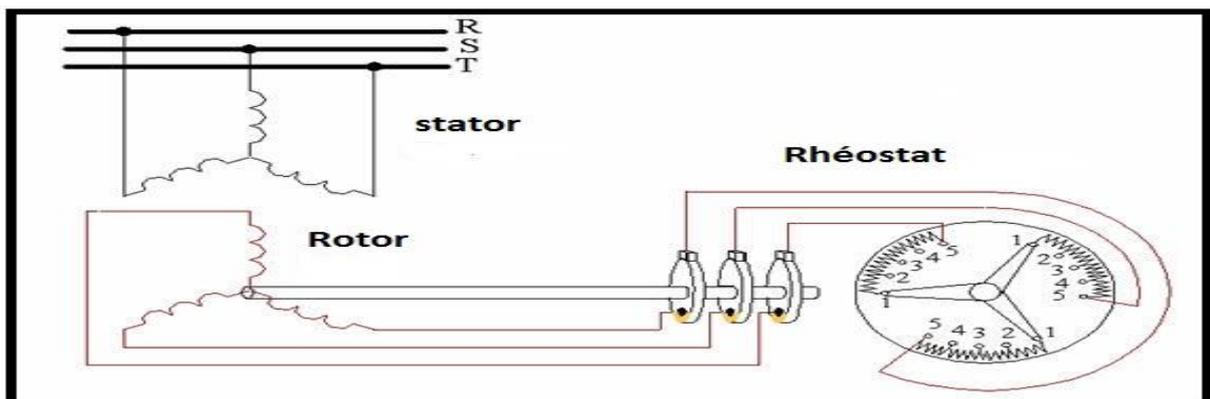


Figure I.5: Rhéostat connectée avec les trois bornes Rotorique [7]

### I.2.3 Les paliers :

Les paliers sont composés de roulements à billes et de flasques, les roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre, pour le guidage en rotation de l'arbre moteur. Les flasques, moulés

en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la Figure I.6. L'ensemble ainsi établi constitue alors la MAS à cage d'écureuil. [4][8]



Figure I.6 : roulement à bille [8]

### I.3 Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) a donné les résultats suivants (Figure I.7) :

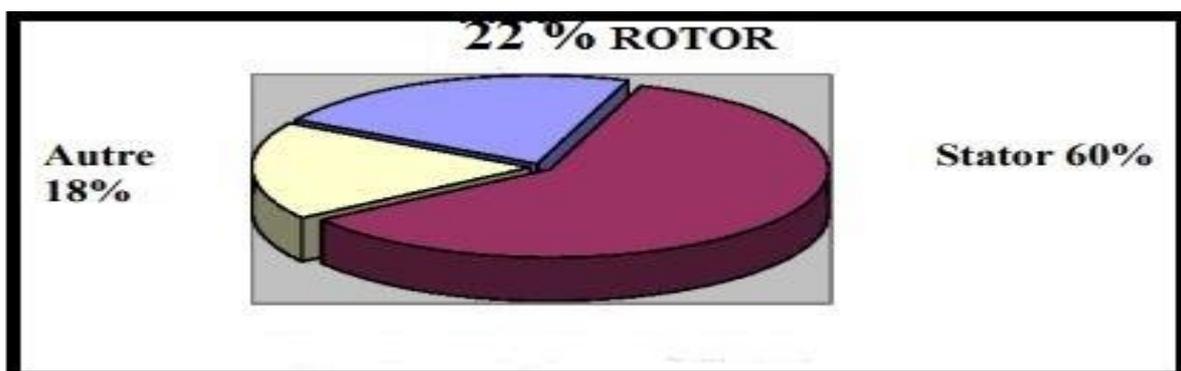


Figure I.7: Proportion des défauts [20]

D'autre part les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988 les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur

est comme suit :

Enroulements stator: 51%      Tôlerie stator: 9%  
Défaits au rotor: 22%      Roulements: 8%  
Autres: 10%

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne les résultats suivants:

Enroulements stator: 13%      Couplage mécanique: 4%  
Défaits au rotor: 8%      Roulements: 41%  
Autres: 34%

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [20]

### I.3.1 Défaits d'ordre mécaniques

Les pannes mécaniques sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone, et sont le plus souvent liées à l'endommagement du rotor ou des composants connexes, et les principales défaillances mécaniques, on peut souligner les suivantes détérioration des roulements, rupture des barres et des anneaux du rotor, irrégularités de l'entrefer (excentricités statiques et dynamiques) et le déséquilibre. Et nous allons mentionner quelques-uns des défauts qui apparaissent dans les machine ci-dessous. [9] [10]

#### I.3.1.1 Défaits Excentricité dans les moteurs à induction

L'excentricité est un type de défaut d'asymétrie du rotor caractérisée par un entrefer irrégulier entre le stator et le rotor car la construction du moteur ne pas être parfaite, ce qui a une mauvaise influence sur la précision de la rotation de sortie du moteur .la présence de l'excentricité augmente les niveaux de vibration dans les direction axiale et radiale en raison du déséquilibre magnétique créé entre rotor et stator, s'il n'est pas corrigé en temps voulu, peuvent entraîner un mouvement excessif de l'enroulement du stator, entraînant une augmentation des frottements (Figure.I.8) ,et par conséquent l'endommagement de tout le moteur , une éventuelle rupture entre les spires et la masse, l'usure des roulements, la déviation ou l'augmentation de la déflexion de l'arbre et donc la

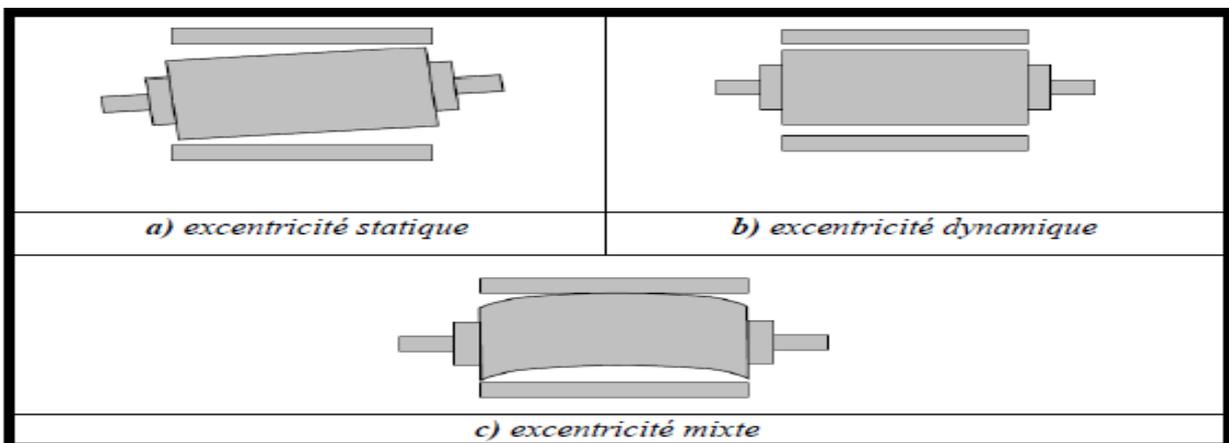
friction entre le rotor et le stator (pertes mécaniques), même l'existence d'une excentricité statique du montage peut provoquer une flexion de l'arbre donnant lieu à une excentricité dynamique, et en outre les processus thermiques auxquels le rotor est soumis peuvent le déformer.

De plus l'inhomogénéité de l'entrefer entraîne des valeurs de réluctance variables ce qui peut générer des harmoniques dans le champ magnétique. [11] [12]



**Figure I.8.** Frottement rotor-stator d'un moteur à induction causé par un défaut d'excentricité [12]

Il existe trois formes d'excentricité : l'excentricité statique, l'excentricité dynamique, et combinaison des deux, appelée excentricité mixte. Comme le montre la figure. I.9.



**Figure I.9 :** Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte [9]

### A) Excentricité statique

Cette excentricité se produit lorsque le centre transversal du rotor ne coïncide pas avec le centre transversal du stator, est modélisée en décalant la position du rotor de 10%, 30% et 50% respectivement. de plus, l'axe de rotation est défini comme l'axe du rotor, car la largeur de

l'entrefer ne doit pas varier avec la position du rotor dans l'excentricité statique et la position de l'entrefer radial minimum est fixe, c'est-à-dire que pendant toute la rotation du rotor, il y a toujours un point où l'entrefer est minimal et un point où il est maximal, comme le montre la figure. I.10 [13][14]

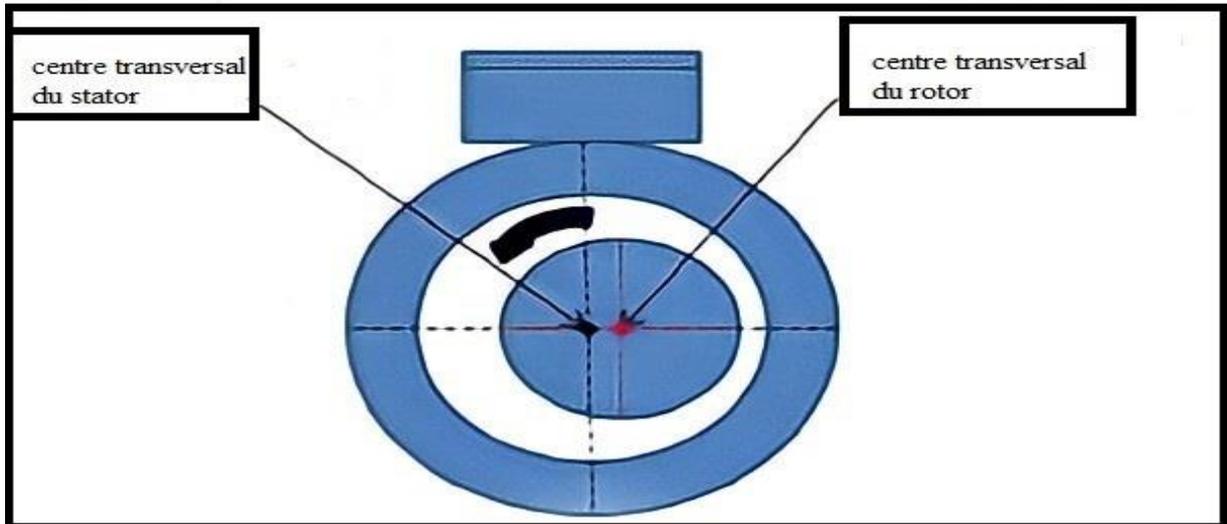


Figure I.10: excentricité statique [11]

### B) Excentricité dynamique

L'excentricité dynamique est modélisée en déplaçant la position du rotor comme dans l'excentricité statique, mais cette fois, l'axe de rotation reste l'axe du stator, cela signifie que l'axe de rotation ne coïncide pas avec l'axe du rotor. Ainsi, vu de n'importe quel point de l'entrefer entre le stator et l'air, et la largeur de l'entrefer a une valeur minimale qui varie dans temps et l'espace en fonction la position du rotor comme le montre la figure. I.11. [13][14]

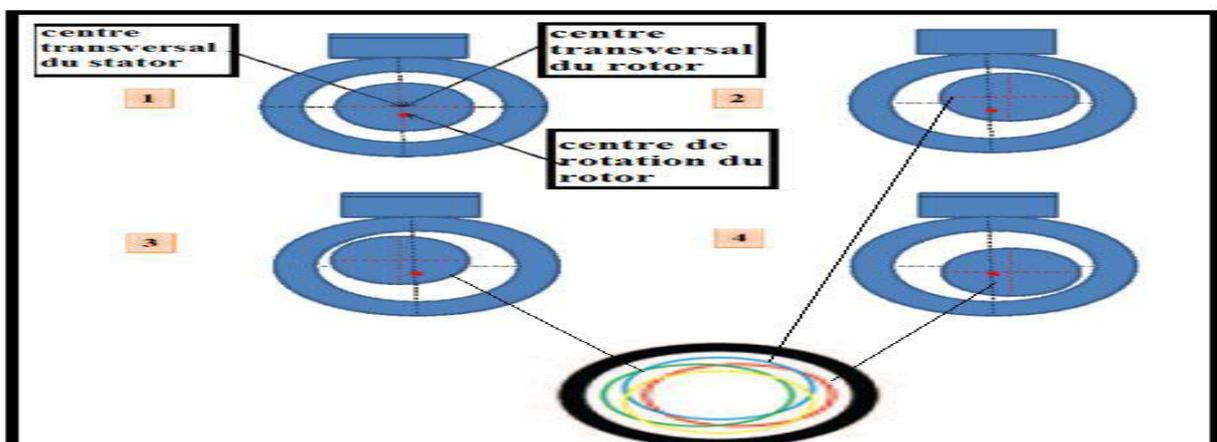


Figure I.11: Excentricité dynamique [11] [13]

### C) Excentricité mixte :

L'excentricité mixte est une combinaison de l'excentricité statique et de l'excentricité dynamique. Dans ce modèle, la largeur de l'entrefer change avec la position du rotor, comme dans le cas de l'excentricité dynamique, mais ce changement se produit plus près d'un côté du stator, comme le montre (figure I.12). En outre, l'axe de rotation est défini en tout point entre les axes du stator et du rotor et le centre du stator et rotor et l'axe de rotation sont déplacés uns par rapport aux autres.

L'excentricité mixte peut causer des dommages au moteur en raison fréquences induites par la combinaison de l'excentricité statique et dynamique dans le courant d'alimentation d'un moteur à induction. [11][13]

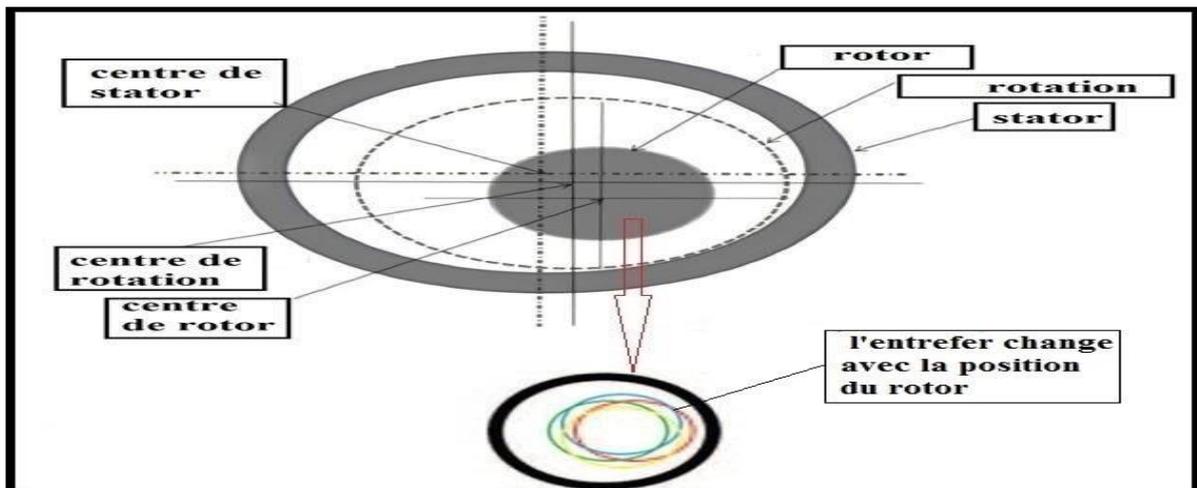


Figure I.12: excentricité mixte [13]

L'apparition de l'excentricité de l'entrefer peut introduire la composante harmonique spécifique dans le spectre du courant du stator, à des fréquences ( $f_d$ ) données par l'expression ci-dessous.

$$f_d = \left[ (kN_r \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm v \right] f_s \quad (\text{I.1})$$

Où :

- $N_r$  le nombre de barres rotoriques.
- $f_s$  est la fréquence fondamentale.
- $S$  est le glissement.

- $n_d$  le nombre d'ordre d'excentricité :  $n_d = 0$  pour l'excentricité statique et  $n_d = 1, 2, 3 \dots$  pour l'excentricité dynamique.
- $p$  le nombre de paires de pôles,
- $\nu$  l'ordre des harmoniques de temps de la F.M.M, ( $\nu = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$  etc.)

De plus, si les l'excentricité statique et l'excentricité dynamique se produisent simultanément, on peut observer une harmonique spécifique autour de la fréquence fondamentale donnée par :

$$f_{mix} = f_s \pm m f_r \quad (\text{I.2})$$

Où

$$f_r = \frac{1-s}{p} f_s \text{ et } m = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{I.3})$$

### I.3.1.2 Défaits des roulements :

Les roulements sont des dispositifs largement utilisés dans industries pour réduire le frottement des parties rotatives des machines, Il est considéré comme l'un des plus importants composants des machines tournantes, en outre le taux de défaillance élevé par rapport aux autres composants de la machine. En effet, selon des recherches antérieures, on sait que les roulements sont à l'origine de 40 à 50 % des défaillances de machines, et leur défaillance peut entraîner une panne totale de la machine et générant ainsi des pertes de productivité imprévues pour les installations de production. [15]

Les défaillances des roulements résultent généralement d'un montage incorrect, d'une mauvaise lubrification, mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication, et la dégradation d'un roulement dans les machines tournantes se traduit généralement par un écaillage des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée. Comme le montre la figure I.13. [16]



Figure I.13: dégradation d'un roulement [16]

En présente dans la figure I.14 le dimensionnement d'un roulement à billes :

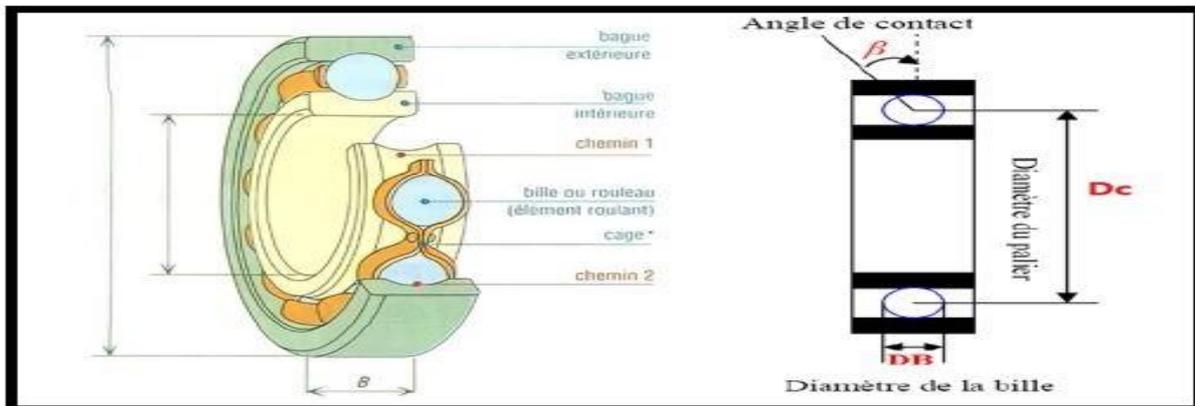


Figure I.14: Dimensions d'un roulement à billes [9]

Les défaillances des roulements qui sont généralement couverts par la catégorie des défauts liés à l'excentricité, en raison les défauts de roulement peuvent se manifester sous forme de défauts d'asymétrie du rotor et qui peuvent définir la relation entre les vibrations des roulements et les spectres du courant statorique , Ce qui peut s'expliquer par excentricité de l'entrefer produit des anomalies dans la densité du flux d'entrefer, Puisque les roulements à billes supportent le rotor, n'importe quel défaut de roulement produira un mouvement radial entre le rotor et le stator de la machine.

D'autre part, les défauts au niveau des roulements dépend aussi de la partie défectueuse, soit dans la partie intérieure ou dans la partie extérieure, et ont plus les défauts liés aux roulements à billes peuvent être classés comme suit : défaut de la bague extérieure, défaut de la bague intérieure, défaut de la bille, défaut de la cage et les fréquences générées par les différents défauts des roulements à billes, sont exprimées par :

- **Défaut de la bague intérieure :**

$$f_{bint} = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (\text{I.4})$$

- **Défaut de la bague extérieure :**

$$f_{bext} = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (\text{I.5})$$

- **Défaut de la bille :**

$$f_{bill} = \frac{D_c}{D_b} f_r \left( 1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right) \quad (\text{I.6})$$

- **Défaut de la cage :**

$$f_{cage} = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (\text{I.7})$$

Où

$D_b$  le diamètre d'un élément roulant,  $D_c$  la distance entre les centres des billes diamétralement opposées,  $N_b$  est le nombre d'éléments roulants,  $\beta$  angle de contact des billes avec les bagues du roulement pour supporter des charges radiales et axiales ,et  $f_r$  est la fréquence de rotation du rotor.[9][17]

### I.3.1.3 Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [3]

### I.3.1.4 Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des micro-fissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance. [3]

### I.3.2 Défaits d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

#### I.3.2.1 Défaillances des circuits électriques statoriques

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques, Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est :

$$f_{cc} = f_s \left[ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad (\text{I.8})$$

On peut clarifier les différents défauts possibles de court-circuit par la Figure. **I.15**.

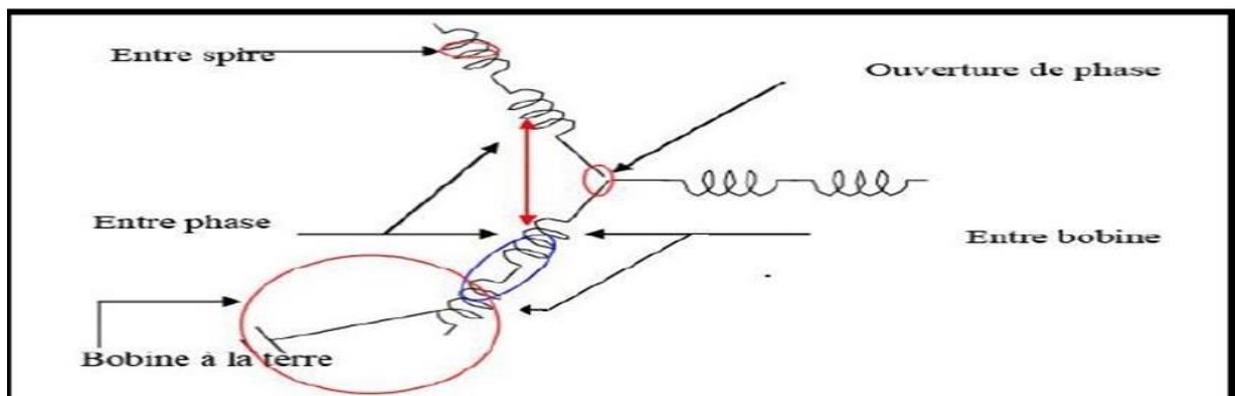


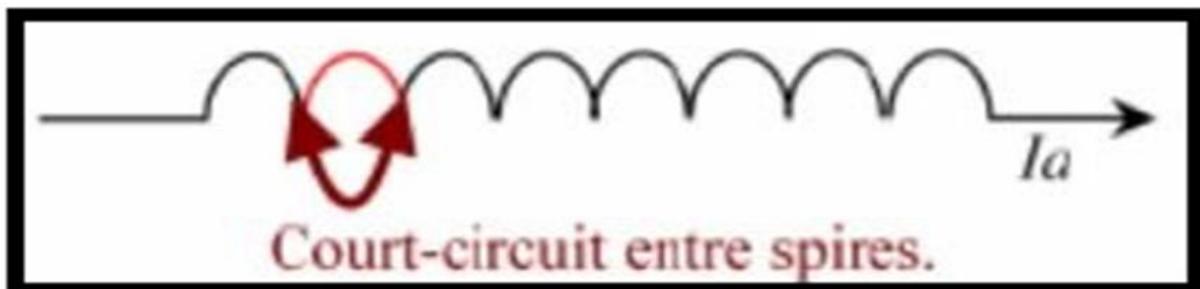
Figure I.15 : Représentation des différents défauts statoriques possibles [17]



**Figure I.16 :**Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone [17]

### I.3 .2 .1.1 Court-circuit entre spires

Ce défaut entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Les courts-circuits entre spires de la même phase apparaissent, soit au niveau des têtes de bobines, soit dans les encoches. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants [02]



**Figure I.17 :**Court-circuit entre spires [02]

### I.3 .2 .1.2 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la

disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. [18]

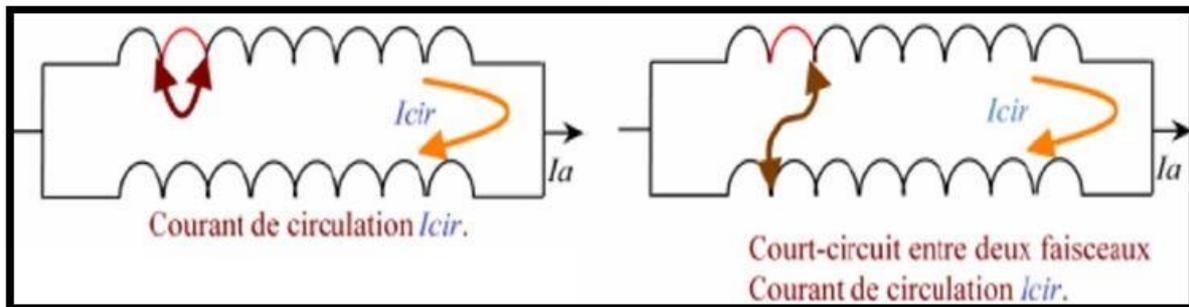


Figure I.18: court-circuit entre phases [02]

### I.3 .2 .1.3 Défaits de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant. [18]

### I.3 .2 .1.4 Défaits de la boîte à bornes

Les vibrations excessives de différentes origines peuvent conduire à un desserrement des boulons de la boîte à bornes, ce qui mène à une rupture d'une phase en cours de fonctionnement. La contamination par des corps étrangers (poussière, graisse, ...) peut aussi induire un arc entre les prises de connexion. Il en résulte une rupture d'une phase ou un court-circuit entre les phases. [19]

### I.3 .2 .2 Défaillances des circuits électriques rotoriques

Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit en aluminium ou en cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne. Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. [20]

### I.3 .2 .2 .1 Rupture du Barres

Lorsqu'une rupture se produit au niveau des barres ou à la jonction entre les barres et l'anneau de court-circuit, l'amplitude des harmoniques à certaines fréquences est révélatrice d'un défaut.

Lorsque nous alimentons le moteur à partir d'un variateur de fréquence, les fréquences de défaut caractéristiques sont modifiées par rapport à l'alimentation du moteur directement à partir du réseau. Nous devons maintenant analyser l'amplitude des harmoniques aux fréquences suivantes:

$$f_b = f_s(k \pm 2ns) \quad (\text{I.9})$$

Où:

- "s" est le glissement du moteur au moment où nous tirons du courant du stator.
- $f_s$  est la fréquence d'alimentation des courants du moteur.
- $n=1,2,3,\dots$ ,
- k est un facteur qui dépend de la stratégie de commutation du convertisseur de fréquence. PWM, six étapes, etc.[21]



Figure I.19 : Défaut d'une barre cassée.[20]

### I.3 .2 .2 Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique.[22]



*Figure I.20 : Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit [20]*

## I.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les différents éléments de base du moteur d'induction à cage d'écureuil (stator, rotor, paliers), Avec une mention de dysfonctionnement du moteur en mode de fonctionnement, soit mécanique, soit électrique, ou bien encore magnétique. Qui, grâce à une compréhension approximative du comportement de ces défauts, peut générer une contribution supplémentaire pour l'industrie.

## Chapitre 2 :

### Maintenance et analyse vibratoire

#### II.1 Introduction :

Les machines industrielles vibrent d'où la nécessité d'interpréter leurs vibrations dans le but de déterminer les différentes anomalies. Les vibrations sont fréquemment utilisées dans le domaine de la maintenance, qui dépend, par exemple, de la prédiction d'un point de défaillance susceptible de se produire dans le futur en analysant les vibrations émises, Cela en fait un outil plus efficace dans l'industrie.

Ce chapitre vise à donner un aperçu des différents types de maintenance avec les avantages et inconvénients pour chaque type, Un rappel des principes de base de l'analyse vibratoire.

#### II.2 La Maintenance

##### II.2.1 Définition de la maintenance

Selon d'AFNOR X60 010 (Association Française de Normalisation), la maintenance est : « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé » en lui ajoutant « au coût optimal ». La définition de la maintenance fait donc apparaître quatre notions :

- Maintenir : qui suppose un suivi et une surveillance.
- Rétablir : qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.
- État : qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- Coût optimal : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique. [37]

##### II.2.2 Objectifs de la maintenance

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la figure II.1, sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.

- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité) [38]

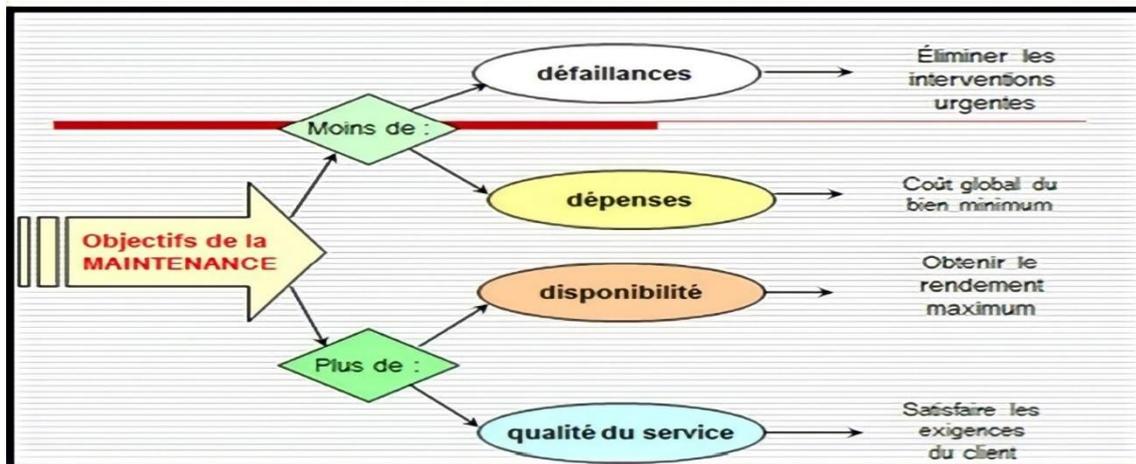


Figure II.1 : Schématisation des objectifs de la maintenance [38]

### II.2.3 Les différents types de maintenance :

Il existe deux principales familles de maintenance que l'on peut repérer sur la figure II.2 : la maintenance corrective (rétablir) et la maintenance préventive (maintenir). La maintenance corrective est celle que le système subit lorsque la panne est déjà présente et qu'il faut réparer. La maintenance préventive est celle qui permet d'anticiper et de prévenir les défaillances [38]

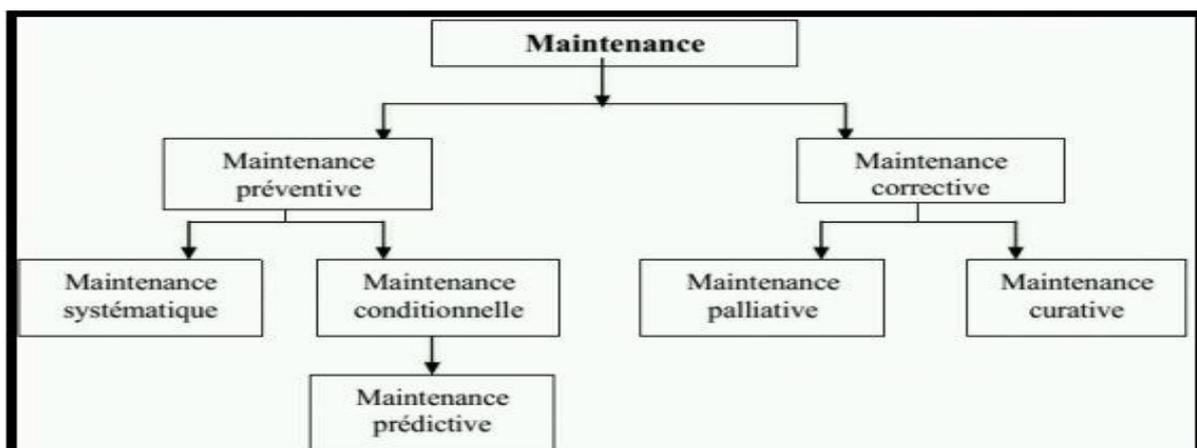


Figure II.2. Les différents types de maintenance [37]

### II.2.3.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective repose sur l'intervention en cas de panne, qui se manifeste par l'effondrement d'un équipement ou d'une installation, c'est-à-dire l'interruption soudaine de la production. On peut distinguer deux variétés : [39]

#### A) Maintenance corrective avec élimination des défauts

Dans ce cas, l'entretien consiste à effectuer des réparations d'urgence, en remplaçant les éléments endommagés. Elle est normalement effectuée sous une forte pression afin d'éviter les baisses de production.

Ce type de maintenance ne consiste pas seulement à remplacer les éléments défectueux mais aussi à éliminer la cause de la panne. Elle offre donc des solutions plus durables ainsi qu'une disponibilité et une fiabilité accrues à long terme.

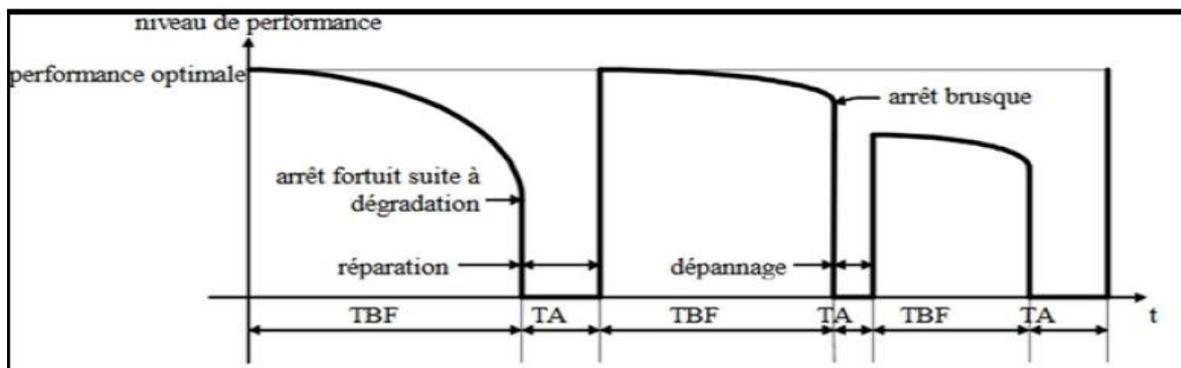


Figure II.3 : Evolution du niveau de performance en maintenance corrective [41]

#### II.2.3.1.1 Avantages de la maintenance corrective

- Aucune capacité analytique élevée ou infrastructure technique ou administrative n'est requise.
- Elle élimine les avaries et les altérations qui empêchent le bon fonctionnement de quelques éléments matériaux grâce à la réparation.

#### II.2.3.1.2 Inconvénients de la maintenance corrective

- Des interruptions de production imprévisibles qui peuvent entraîner des dommages et des ruptures de chaîne de proportions inconnues.
- Réduction de la durée de vie utile des équipements et des installations.
- Risque de défaillance d'articles difficiles à obtenir. [39]

- Nécessité d'un stock important de pièces détachées.

### II.2.3.2 Maintenance préventive

Cette forme de maintenance est née de la nécessité de remédier aux inconvénients de la maintenance corrective. L'objectif de la maintenance préventive est de réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'une machine, Les opérations de cette maintenance sont effectuées par des interventions prévues, préparées et programmées selon des critères différents pour éviter une défaillance possible. La maintenance préventive comprend généralement un certain nombre d'activités caractéristiques : [39] [40]

- Nettoyage et entretien réguliers.
- Lubrification des endroits de frottement.
- Entretien des équipements et protection contre les agents environnementaux.
- La révision partielle ou globale.
- L'analyse des signaux vibrations (mesure) et des huiles.
- Réparation et remplacement des points du système identifié comme des points faibles.

### II.2.3.3. La maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique inclut les actions de maintenance requises par les dispositions légales et/ou réglementaires. Elle inclut au minimum la planification formelle, la description claire et précise du travail à effectuer (lubrification, changement de filtres, remplacement des roulements, etc.) et l'enregistrement du travail accompli. Cette définition est illustrée dans la figure II.4 avec : [41]

$T$  : la période d'intervention prédéterminée.

$I_{ps}$  : chaque intervention préventive systématique.

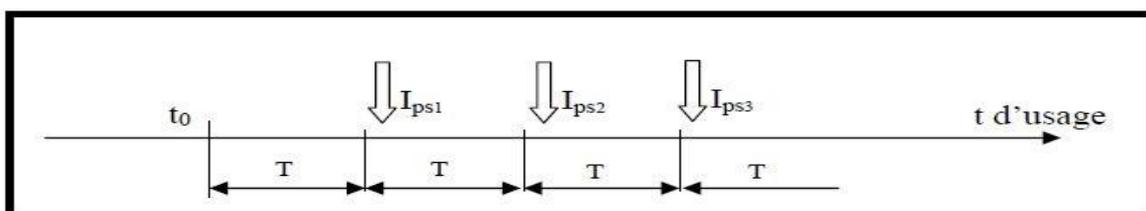
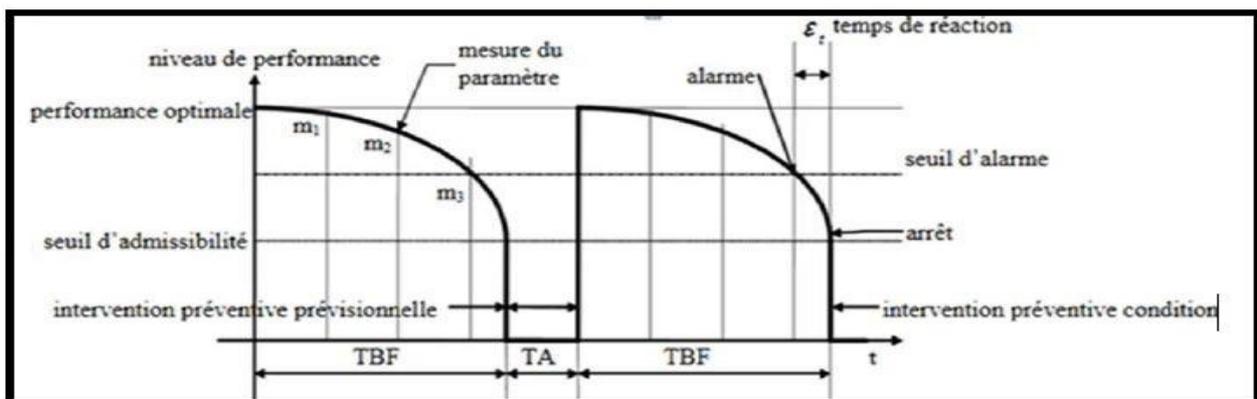


Figure II.4: Illustration du principe de la maintenance systématique [42]

La maintenance préventive systématique est souvent la première stratégie de maintenance Préventive qui est mise en place dans un secteur productif car c'est celle qui a priori, parait la Plus simple à mettre en œuvre, mais, elle peut parfois s'avérer onéreuse par le caractère Systématique des interventions et des remplacements de pièces sans signe avant- coureur de Défaillance. [42]

### II.2.3.4. La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (Autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, Mesure de température, Mesure des vibrations des bruits), révélateur de l'état de Dégradation du bien. La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. La maintenance conditionnelle permet donc d'éviter les inconvénients de la maintenance systématique [43]



**Figure II.5 :** Evolution du niveau de performance en maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. [41]

#### II.2.3.4.1 Avantages de la maintenance préventive

Le principal avantage de la maintenance préventive est la réduction du temps d'arrêt, obtenue en introduisant une certaine périodicité dans l'observation et la réparation du système.

#### II.2.3.4.2 Inconvénients de la maintenance préventive

Les inconvénients de cette forme de maintenance découlent de la difficulté d'estimer correctement le temps nécessaire pour effectuer les interventions : si le fonctionnement normal d'un système est interrompu et que sa durée de vie utile est inutilement altérée, sa réserve d'utilisation sera totalement gaspillée, en plus de produire une accumulation inutile d'activités

préventives qui augmentent les dépenses et réduisent la disponibilité. En revanche, si la programmation préventive est retardée par rapport à la panne, la maintenance corrective remplace la maintenance préventive. [39]

### II.2.4. Niveaux de maintenance

La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, quatre niveaux de maintenance (Tableau II.1) :

**Tableau II.1 : les quatre niveaux de maintenance [44]**

	niveau 1	niveau 2	Niveau3	niveau 4
travaux	- réglages simples - pas de démontage ni ouverture	opérations mineures de maintenance préventive	identification et diagnostic de pannes	travaux importants de maintenance corrective ou préventive
lieu	sur place	sur place	sur place ou dans atelier de maintenance	atelier spécialisé avec outillage général
personnel	exploitant du bien	technicien habilité	technicien spécialisé	équipe avec encadrement technique spécialisé
exemple	remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence	changement d'un relais	identification de l'élément défaillant	intervention sur matériel dont la remise en seste soumise à qualification

### II.2.5 : les fonctions de la maintenance : (norme FD X 60-000)

- **Etude** : Sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de la maintenance choisie. Elle implique la mise en oeuvre d'un plan de maintenance avec des Objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

- **Préparation :** La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées. Une telle préparation devra bien sûr s'inscrire dans le respect des objectifs généraux tels qu'ils sont définis par la politique de maintenance : coût, délai, qualité, sécurité, ... [43]
  
- **Ordonnancement :** La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux.
  
- **Réalisation :** La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, dans les délais préconisés, pour réaliser dans les règles de l'art, une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié. [45]
  
- **Gestion :** La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, la gestion des interventions, la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines, et la gestion du budget [41]

### II.3 Généralité sur les signaux :

#### II.3.1 Définition d'un signal :

Un signal est la représentation physique de l'information qu'il transporte de sa source à son destinataire. Il sert de vecteur à une information. Il constitue la manifestation physique d'une grandeur mesurable (courant, tension, force, température, pression, etc.). Les signaux sont des grandeurs électriques variant en fonction du temps  $x(t)$  obtenues à l'aide de capteurs. [37]

#### II.3.2 Classification des signaux :

Les signaux peuvent être classés selon leurs propriétés :

- signaux continus ou discrets.

- Signaux déterministes ou aléatoires.
- Signaux périodiques ou apériodique.

Comme illustré par la figure II.6 le signal peut être :

- signal à amplitude et temps continu (signal analogique)
- signal à amplitude discrète et temps continu (signal quantifié)
- signal à amplitude continue et temps discret (signal échantillonné)
- signal à amplitude discrète et temps discret (signal logique ou numérique)

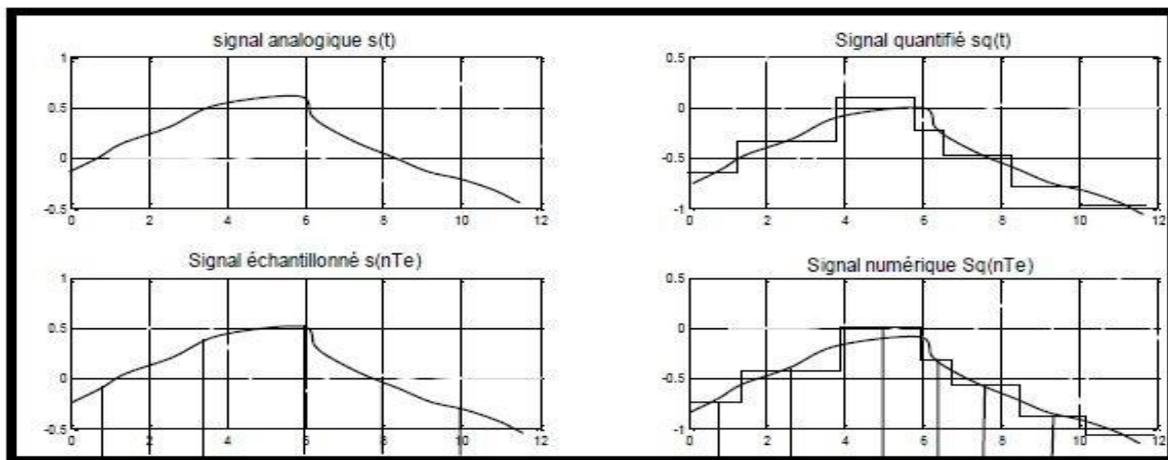


Figure II.6: Classification des signaux [37]

### II.3.3 Types de signaux :

La figure II.7 représente les différents types des signaux vibratoires.

#### II.3.3.1. Déterministe

Des signaux (périodique ou non périodique) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat, ainsi est possible de déterminer son amplitude pour tout instant « t »

**A) Périodiques :** un signal est dit périodique si les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement au bout d'une période  $T$  constante.

$$\text{On a donc pour tout } x(t + T) = x(t) \quad t \in R \quad (\text{II.1})$$

**B) Non périodiques :** un signal est dit non périodique s'il n'est pas périodique, mais, existe à tout instant « t ».

### II.3.3.2 Signaux aléatoires :

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

- La notion de signal c'est à dire une mesure qui dépend d'un ou plusieurs paramètres D'espace, le plus souvent le temps.
- La notion d'aléatoire qui fait que, à un instant t donné, la mesure n'est pas certaine

Mais dépend du hasard. Cet aspect est appelé l'aspect stochastique et on parle indifféremment De signal aléatoire ou de signal stochastique.

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible. [37] [44]

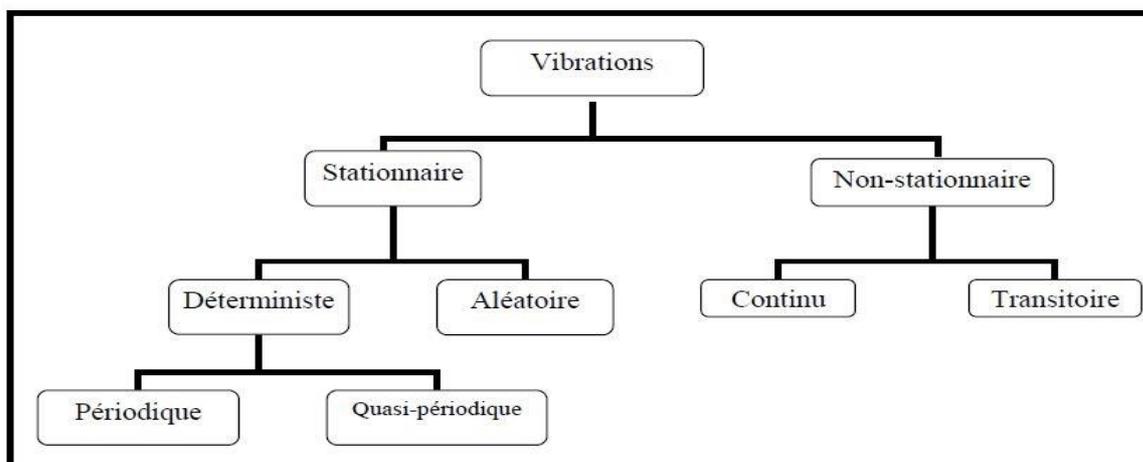


Figure II.7 : les différents types des signaux vibratoires [42]

## II.4 Analyse vibratoire :

Le mouvement ou la vibration d'une machine est principalement dû à l'interaction des forces dans la machine. Sur la base de ce précepte, l'analyste doit être clair sur le concept des forces qui peuvent provoquer le mouvement et toujours garder cela à l'esprit lorsqu'il effectue une analyse des vibrations. Les exemples typiques sont : le déséquilibre, le désalignement, l'excentricité, le desserrage des composants, la lubrification inadéquate, etc. L'objectif de l'analyste est d'identifier les forces indésirables qui interagissent au sein de la machine. [46]

### II.4.1 Définition d'une vibration :

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

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;

- Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps ;
- Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps. [45]

### II.4.2 Caractéristiques d'une vibration :

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

#### A. Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné.

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 hertz. [41]

#### B. Amplitude

L'amplitude d'une onde est la valeur de ses écarts au point d'équilibre. On peut définir :

- L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ( $V_c$ ) ou Niveau crête.
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ( $V_{cc}$ ) (peak to peak) ou niveau Crête à crête.
- L'amplitude efficace ( $V_{eff}$ ), aussi appelée RMS (root mean square) ou niveau efficace (Voir Fig. II.8).

$$v_{eff} = \frac{v_c}{\sqrt{2}} = \frac{V_{cc}}{2\sqrt{2}} \quad (\text{II. 2})$$

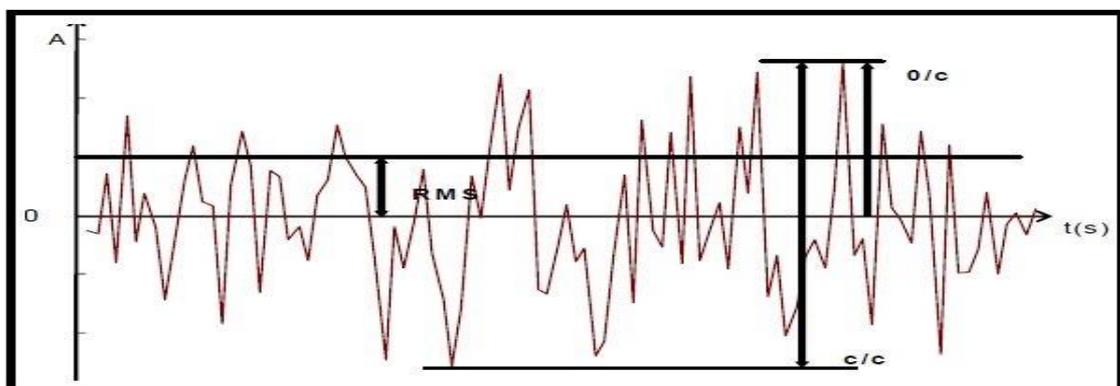


Fig. II.8: Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque [42]

Ainsi les mesures d'amplitudes sont généralement prisées comme suis :

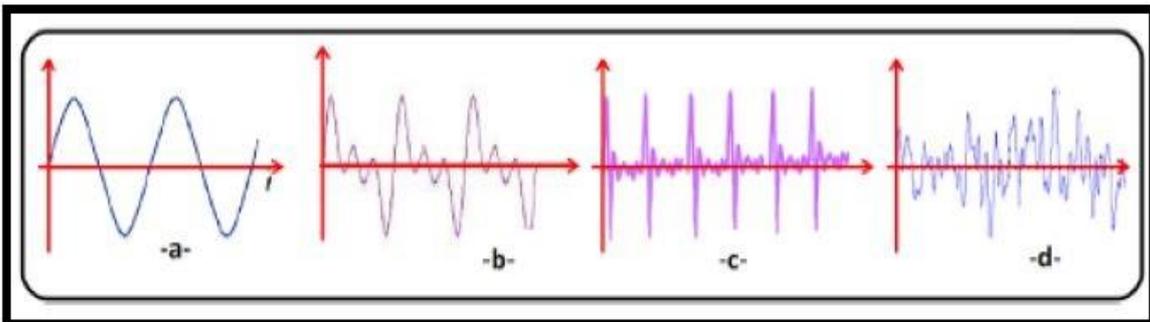
**Tableau II.2:** L'indicateur de surveillance et l'amplitude correspondante [42]

Indicateur de surveillance	Amplitude généralement mesurée en
Déplacement $x$	Valeur/crête ( $V_C$ ) Valeur crête à crête ( $V_{CC}$ )
Vitesse $v$	Valeur crête Valeur efficace ( $V_{eff}$ )
Accélération $\gamma$	Valeur efficace ( $V_{eff}$ )

### C. Nature d'une vibration

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

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [Figure II.9: a] ou sinusoïdal complexe [Figure II.9: b]
- Les vibrations périodiques de type impulsionnel [Figure II.9:c]
- Les vibrations aléatoires de type impulsionnel [Figure II.9: d]



**Figure II.9:** Nature d'une vibration [41]

### II.4.3 Représentation du signal vibratoire

Le signal vibratoire délivré par un capteur peut être représenté de différentes façons.

#### II.4.3.1 Représentation temporelle

La représentation de chaque événement en fonction de sa progression dans le temps.

Cette représentation est d'ailleurs utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une Machine en fonction de ses paramètres de fonctionnement.

#### II.4.3.2 Représentation spectrale (ou fréquentielle)

Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la

Représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence. [47]

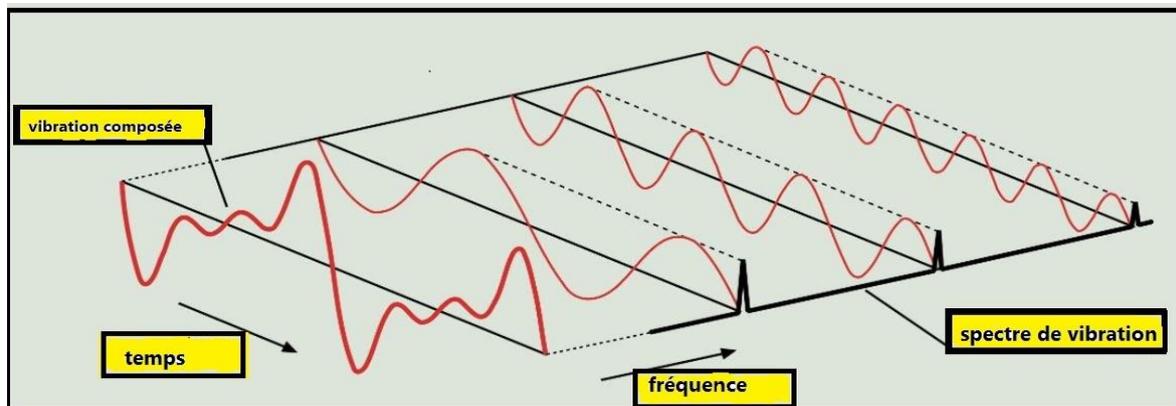


figure II.10: Traitement FFT d'une forme d'onde vibratoire complexe [48]

### II.4.4 Caractéristiques d'un signal vibratoire :

Les signaux vibratoires ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes :

- Une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrènements, les mouvements existants au sein d'un roulement...
- Une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement, ...)

Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. [49]

### II.4.5. Les capteurs de vibration :

Les capteurs de vibration ont pour but de transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Selon la gamme des fréquences étudiées, un capteur doit mesurer soit le déplacement, la vitesse, ou l'accélération. Ces trois grandeurs peuvent être appréhendées par des systèmes différents les uns des autres et on distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- Déplacement : principe des courants de Foucault.

- Vitesse : principe électrodynamique.
- Accélération : principe piézo-électrique.

### A) Capteur de déplacement :

Le capteur de déplacement est un instrument qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier (figure II.11). Il s'agit d'un capteur "non-contact", c'est-à-dire que le capteur n'entre jamais en contact avec la surface en vibration.

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle.

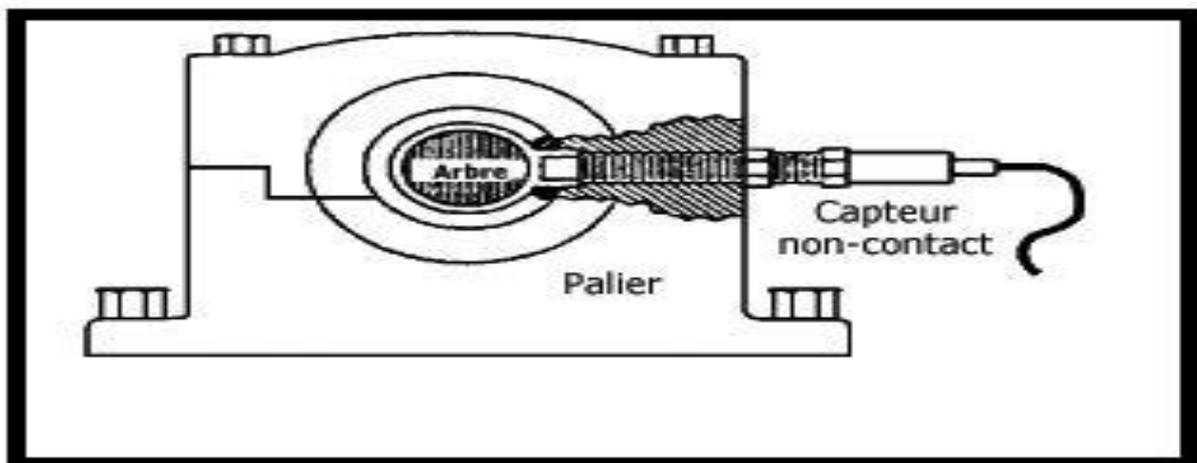


Figure II.11 : Prosimètre monte sur un palier [41]

### B) Capteurs de vitesse :

Le capteur de vitesse produit un signal électrique directement proportionnel à la vitesse de la vibration, est se compose essentiellement d'une bobine supportée par des ressorts et d'un aimant permanent fixé au boîtier du capteur (figure II.12 ). L'aimant fournit un puissant champ magnétique autour de la bobine suspendue. Lorsque le capteur est fixé sur une machine qui vibre, l'aimant permanent suit le mouvement de la vibration pendant que la bobine demeure stationnaire.

Dans ces conditions, le mouvement du champ magnétique qui traverse la bobine génère une tension dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse de la vibration. Le signal est ensuite transmis du capteur au mesureur de vibrations.

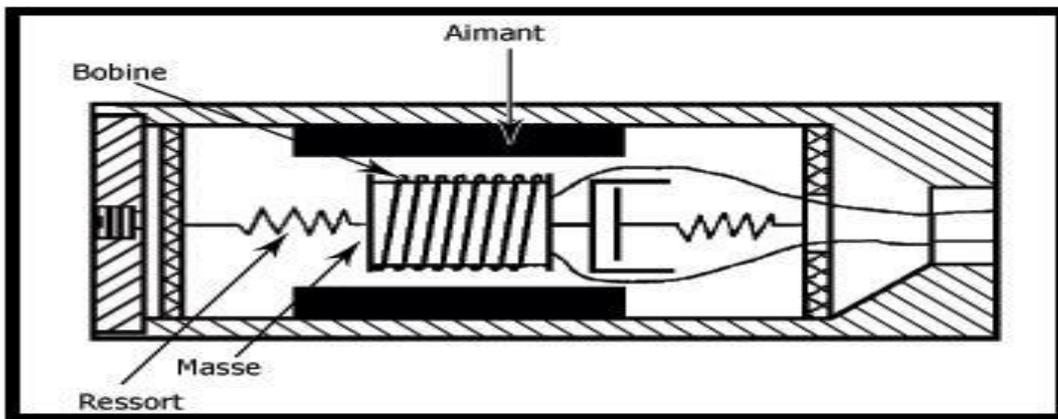


Figure II.12: schéma de vélocimétrie [50]

### C) Capteurs d'accélération (accéléromètres) :

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézoélectrique est placé entre la base et la masse, la masse présentant la propriété de transformer une sollicitation mécanique (pression ou cisaillement) en charge électrique. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézo-électrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses.[51]

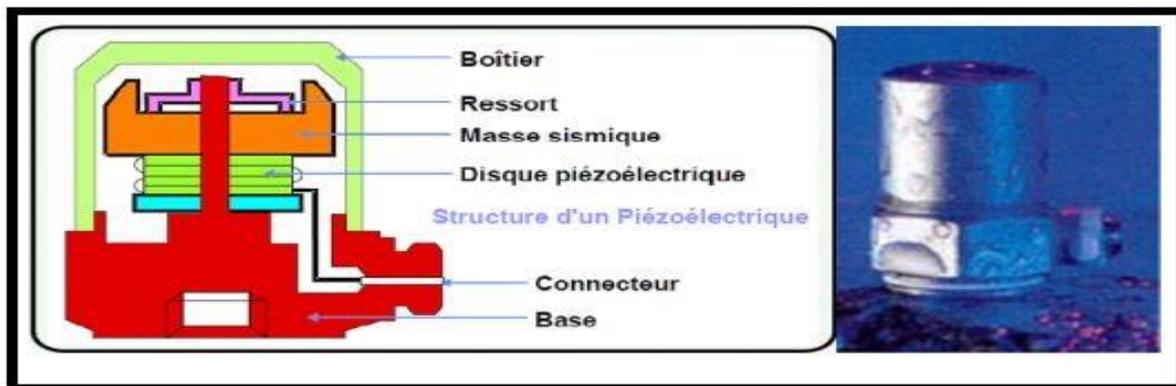


Figure II.13. Schéma de principe d'un accéléromètre [51]

### II.4.6. Choix de l'emplacement des capteurs :

L'emplacement et le montage du capteur de vibrations constituent la partie la plus critique de la collecte de données sur les vibrations. A cet égard, le point de mesure, c'est-à-dire l'endroit de la machine où les vibrations doivent être mesurées, doit être choisi en tenant compte de différents critères. Dans les machines tournantes, les vibrations sont générées par des forces

cycliques internes qui ne peuvent être mesurées directement. Ce qui est réellement mesuré est la transmission de ces forces cycliques à travers la structure de la machine.[52]

### A) Règles de sélection du point de mesure

- Il doit être situé le plus près possible du support de l'arbre (palier ou roulement).
- Il doit être accessible et identifiable.
- Elle ne doit pas être mesurée les vibrations sur des couvercles, des pièces mobiles, des arbres rotatifs.
- Le point de mesure doit présenter une surface adaptée au placement du capteur.
- Les points doivent être nommés ou numérotés de manière claire, et placés sur l'itinéraire dans le sens de la transmission de l'énergie. [52]

### B) Orientation du point de mesure

Pour chaque point de mesure, deux orientations radiales par rapport à l'axe de la machine et une orientation axiale, En outre, il est important d'éviter les mesures tangentielles. Par exemple les efforts liés à la rotation de l'arbre comme un balourd ou un désalignement et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial. [37][52]

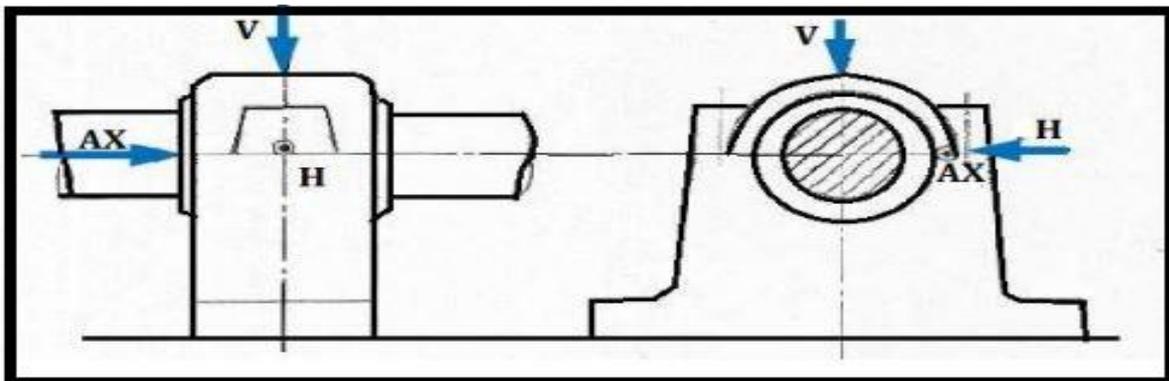


Figure. II.14: Choix directionnel pour la prise de mesure [51]

### **II.5. Conclusion**

Ce chapitre est un aperçu de la maintenance et de l'analyse des vibrations des machines, L'importance de l'analyse des vibrations réside dans l'application correcte de la maintenance, Ainsi, une machine ou un élément sera réparé ou remplacé au bon moment, c'est-à-dire après avoir atteint le maximum de sa durée de vie utile, mais avant qu'il ne tombe en panne et ne provoque un arrêt non planifié, Les avantages de l'analyse des vibrations dans la maintenance peuvent être résumés en deux points, D'une part, il permet de détecter et d'identifier les défauts naissants sans devoir arrêter ou démonter la machine et, d'autre part, il permet de suivre l'évolution du défaut dans le temps jusqu'à ce qu'il atteigne des niveaux inacceptables.

# Chapitre III : Transformées d'ondelettes

## III.1 Introduction

Les transformations sont la base du traitement du signal, ils vise à améliorer et réduire les bruits. La transformée de Fourier est considérée comme la transformation linéaire la plus connue. Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal et par ses propriétés de lui appliquer facilement des opérateurs de filtrage. Cependant, très tôt dans l'histoire du traitement de signal, il est apparu que la décomposition obtenue n'est pas toujours satisfaisante.

Pour cette raison Gabor découvrait la première forme de la représentation temps-fréquence, sa technique consiste à découper le signal en différentes plages ou fenêtre de longueur fixe. Chaque segment du signal limité par une fenêtre est étudié séparément des autres par l'analyse de Fourier. L'inconvénient majeur de ce procédé est que la longueur de la fenêtre étant fixée, il n'est pas possible d'analyser simultanément des phénomènes dont les échelles de temps sont différentes. En 1982, J. Morlet ouvre la voie conduisant à la solution en construisant l'analyse en ondelettes. Les recherches tant théoriques qu'appliquées se sont très largement développées ces dernières années au point que les ondelettes sont maintenant très à la mode et qu'on a parfois voulu en faire l'outil le plus adapté à tous les problèmes. [23]

La transformée en ondelettes est une technique de traitement du signal non stationnaire qui permet de cartographier un signal transitoire en une représentation temps-fréquence. Cette méthode permet de filtrer et d'extraire les caractéristiques fondamentales d'un signal (telles que le temps, la fréquence, l'amplitude, etc.) au moyen d'une analyse multi-résolution, dans laquelle les caractéristiques d'intérêt peuvent être analysées en détail.

La transformation en ondelettes et la transformation de Fourier (FT) sont toutes deux des outils utilisés pour traiter un signal afin d'en modifier la nature, d'observer facilement des modèles ou d'analyser des comportements. Mais l'analyse en (WT) est efficace pour l'analyse des signaux car elle permet de représenter le signal dans une échelle de temps et Elle diffère de la transformation fourier en fournissant une analyse à résolution adaptative, où des fenêtres

étroites sont utilisées pour analyser les données à haute fréquence et des fenêtres larges pour analyser les données à basse fréquence, mais c'est mieux que la transformation de Fourier. En raison de l'inefficacité de (FT) dans l'analyse du signal n'est pas constante et il n'est pas possible de représenter l'instant exact auquel une certaine fréquence change [24]

### III.2 Analyse de Fourier

Cette analyse a été utilisée dans de nombreuses branches des sciences et constitue un outil puissant dans le traitement des signaux périodiques. Elle est basée sur la transformation d'une fonction définie dans le domaine temporel en une autre fonction définie dans le domaine fréquentiel, et cette transformation permet de décomposer un signal en ses composantes sinusoïdales de différentes fréquences. Comme le montre la figure III.1.

Dans de nombreux cas, l'analyse par transformée de Fourier est extrêmement utile, mais dans certaines applications sur d'autres signaux, il n'est pas utilisé. En effet, lorsqu'on passe un signal dans le domaine fréquentiel, on perd les informations liées au temps, plus précisément, lorsqu'on observe un signal par transformée de Fourier, il est impossible de déterminer quand un certain événement se produit ou quand une certaine fréquence est présente. [25][26]

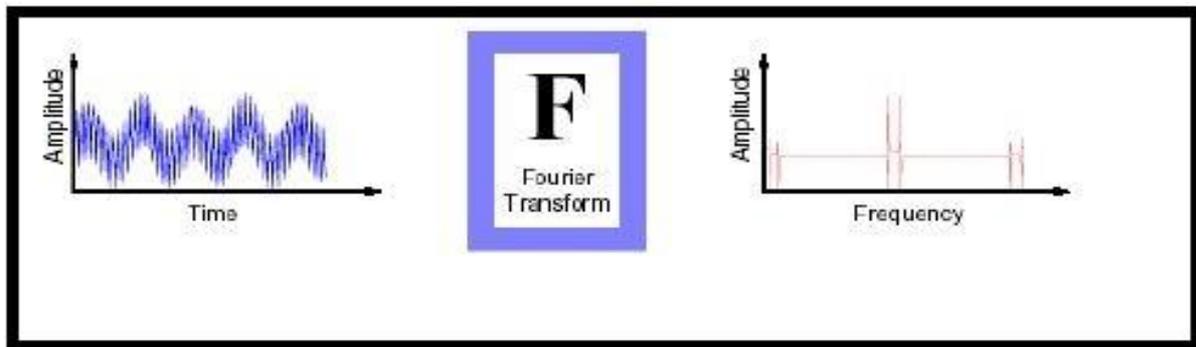


Figure. III.1: Schéma de la transformation de Fourier [26]

#### III .2.1. Transformer en Séries de Fourier

Au 19<sup>ème</sup> siècle 1822, le mathématicien français J. Fourier a montré qu'une fonction périodique pouvait être décomposée en une somme infinie de fonctions exponentielles périodiques complexes. Soit  $x(t)$  et  $X(f)$  deux signaux représentant la même grandeur

physique, mais dans deux domaines différents.  $x(t)$  représente le signal original dans le domaine temporel et  $X(f)$  est la transformée de Fourier du signal dans le domaine fréquentiel.

La transformée de Fourier permet le passage entre deux domaines de représentations complémentaires ; temporelle et fréquentielle grâce à l'intégrale qui porte son nom et qui s'exprime, pour une fonction  $x(t)$ , par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.1})$$

De même, si l'on veut retrouver  $x(t)$  à partir de  $X(f)$ , il faut connaître le spectre pour toutes les fréquences jusqu'à l'infini : [27]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (\text{III.2})$$

### III .2.2. Transformée de Fourier discrète

En mathématiques, la transformée de Fourier discrète (DFT) est un outil de traitement numérique du signal, qui nécessite une fonction d'entrée d'une séquence temporelle discrète et finie, où cette séquence est typiquement générée à partir de l'échantillonnage d'une fonction continue. La (DFT) est l'équivalent discret de la transformation de Fourier continue, si le signal  $x(t)$  est échantillonné à des intervalles également espacés de  $\Delta t$  pour produire une séquence discrète  $x_n = x(n\Delta t)$  pour  $n \in \mathbb{Z}$ , la séquence échantillonnée peut être représentée comme produit de la fonction temps d'origine  $x(t)$  et d'un ensemble infini de fonctions Dirac  $\delta(t)$  également espacées comme il est montré sur la figure III.2, et que l'on peut présenter par : [28]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - n\Delta t))\exp(-j2\pi ft)dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n \exp(-j2\pi fn\Delta t) \quad (\text{III.3})$$

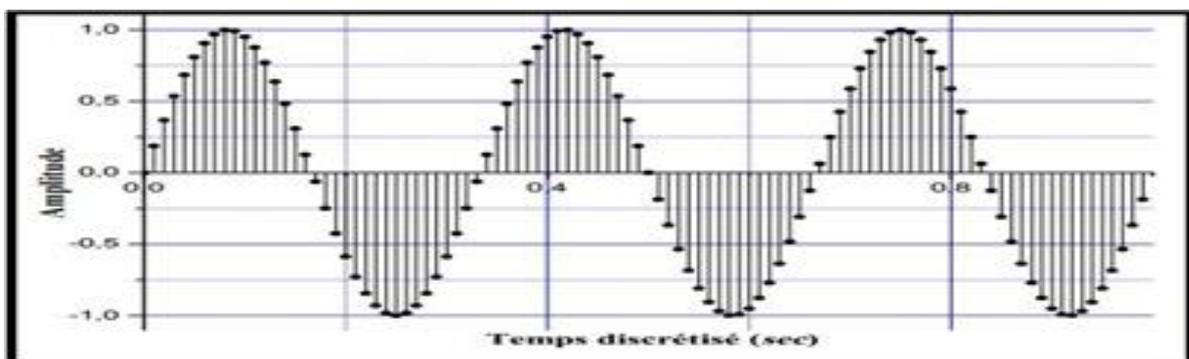


Figure. III.2 : Fonction sinusoidale discrétisée dans le temps [28]

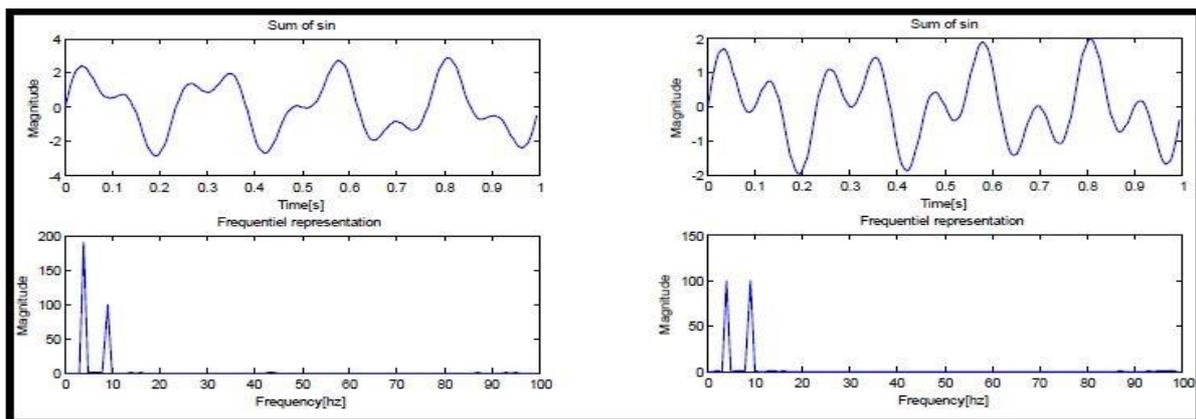
### III.2.3 La transformée de Fourier rapide :

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un outil fondamental du traitement des signaux numériques, qui est un algorithme permettant de calculer la transformée de Fourier discrète (DFT). Son importance réside dans le fait qu'il élimine une grande partie des calculs répétitifs auxquels la (DFT) est soumise, ce qui permet d'obtenir un calcul plus rapide, en plus de permettre une plus grande précision dans le calcul de la (DFT) en réduisant les erreurs d'arrondi. Cependant, la (FFT) est une procédure plus efficace pour calculer la (DFT), car le calcul direct de la (DFT) implique un nombre d'opérations proportionnel à  $n^2$  (où  $n$  est le nombre d'échantillons), alors que la (FFT) nécessite d'utiliser un nombre d'opérations proportionnel à  $n \cdot \log_2(n)$ . [29][30].

### III.2.4 Exemple d'application de la transformée de Fourier FT :

#### III.2.4.1 Signal stationnaire:

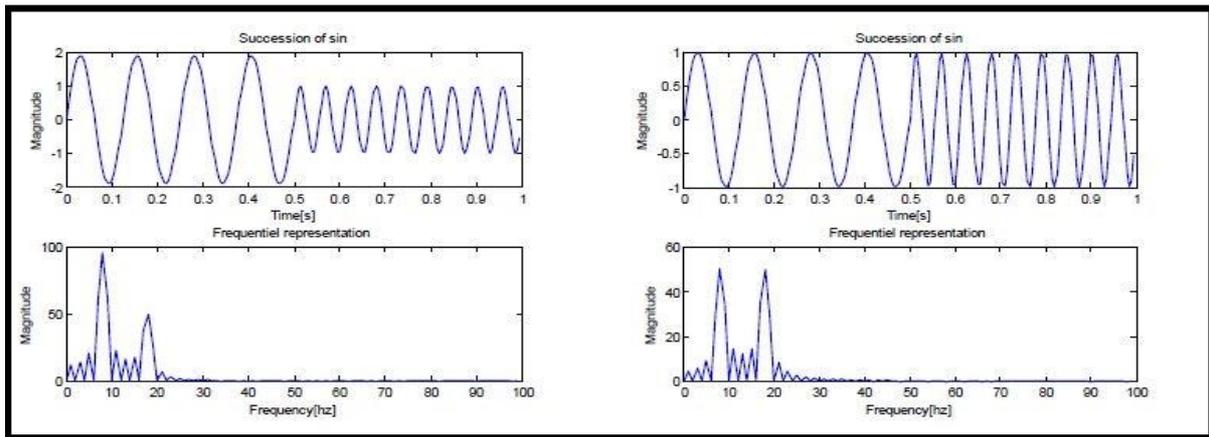
Dans notre exemple schématisé par la figure III.3 on a appliqué la transformée de Fourier d'un signal stationnaire composé d'une somme de deux sinusôides de différentes fréquences et de différentes amplitudes (partie gauche) et le même signal de même amplitude (partie droite). [9]



**Figure. III.3:** Représentation temporelle et fréquentielle 'somme de deux sinusôides'  $F_1 = x_1 + x_2$  [9]

#### III.2.4.2 Signal non stationnaire:

Dans le deuxième exemple on passe à un signal non stationnaire (succession de deux sinusôides) de différente amplitude (à gauche) et de même amplitude (à droite).

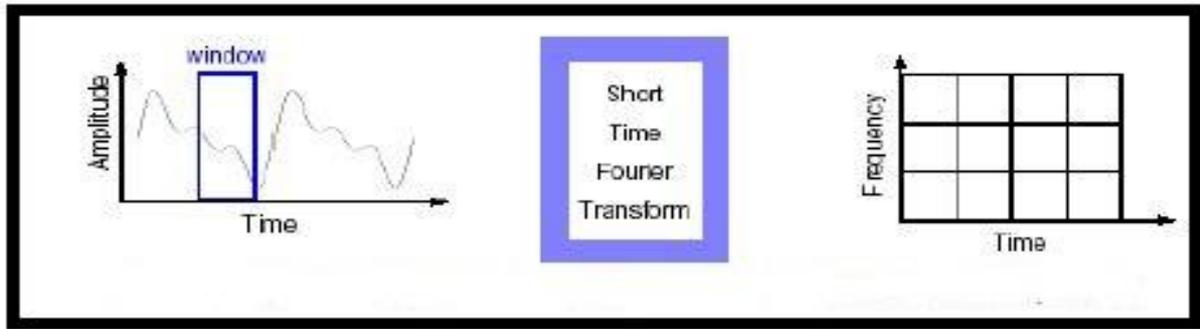


**Figure. III.4:** Représentation temporelle et fréquentielle 'succession de deux sinusoides'  $F_1 = x_1 \oplus x_2$  [9]

D'après les deux exemples précédents, on remarque que la transformée de Fourier nous donne une bonne connaissance combien de fréquences existe mais sans aucune information où ses fréquences sont localisées dans le temps. Donc l'analyse est globale, d'où la difficulté d'obtenir une information localisée dans le temps. Donc on ne peut pas étudier des signaux dont la fréquence varie au cours du temps. (Les signaux non stationnaires). L'idée suivante consiste à représenter notre signal en fonction du temps et de fréquence. On a donc une description fréquentielle. On passe alors à la transformée de Fourier à fenêtre glissante (Short Time Fourier Transform) STFT.[1]

### III.2.5. Analyse de Fourier par intervalles (STFT)

Dans un effort pour corriger la déficience présentée au point précédent, Denis Gabor a adapté en 1946 la Transformée de Fourier pour pouvoir analyser une petite section du signal à un certain moment (au moyen d'une sorte de fenêtre). Cette adaptation est connue sous le nom de STFT, qui fait passer un signal du plan temporel au plan temps-fréquence bidimensionnel, comme le montre schématiquement la figure. III.5 [26], et Le STFT peut être considéré comme une version améliorée du FT. Cette transformation permet de surmonter les inconvénients de la FT et donc de l'analyse des signaux non stationnaires en divisant le signal en petits segments dans lesquels le signal peut être supposé stationnaire et en calculant la FT de chaque segment séparément, mais les informations ne peuvent être obtenues qu'avec une précision limitée par la taille de la fenêtre. Plus la largeur de la fenêtre est étroite, plus la résolution dans le domaine temporel augmente et plus la résolution dans le domaine fréquentiel diminue. [25].



**Figure. III.5:** Schéma de la transformation de Fourier à intervalles (STFT) [26]

### III.3. La Transformée en Ondelette

#### III.3.1 Historique

Elle a été introduit dans le langage mathématique par Jean Morlet et Alex Grossmann en 1984. Terme initialement français, il a été ensuite traduit en anglais par wavelet, avec le terme wave (onde) et le diminutif let (petite). En 1986, Yves Meyer, reconnu comme un des fondateurs de la théorie des ondelettes, rassembla toutes les découvertes précédentes, il en a dénombré 16, puis définit les ondelettes orthogonales. En 1986 Stéphane Mallat fit le lien entre les ondelettes et l'analyse multi résolution. Enfin, en 1987, Ingrid Daubechies mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies [27].

#### III.3.2 Définition :

L'analyse en ondelettes représente l'étape logique suivante après la STFT : une technique de fenêtrage avec des régions de taille variable. L'analyse en ondelettes permet d'utiliser de grands intervalles de temps dans les segments où une plus grande précision est requise à basse fréquence. [26], la transformée en ondelettes est un outil efficace pour l'analyse locale de signaux non stationnaires et transitoires rapides.

Toutes les fonctions de base de (WT) sont générées à partir de la dilatation, (variable d'échelle (a) et de la translation), qui est responsable du changement de position du signal dans le temps, (variable d'échelle (b).) [31]

Tableau III.1: Transformations de translation et d'échelle dans une ondelette [31]

Translation	Changement d'échelle	Translation et changement d'échelle
$\psi(t - b)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t}{a}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t - b}{a}\right)$

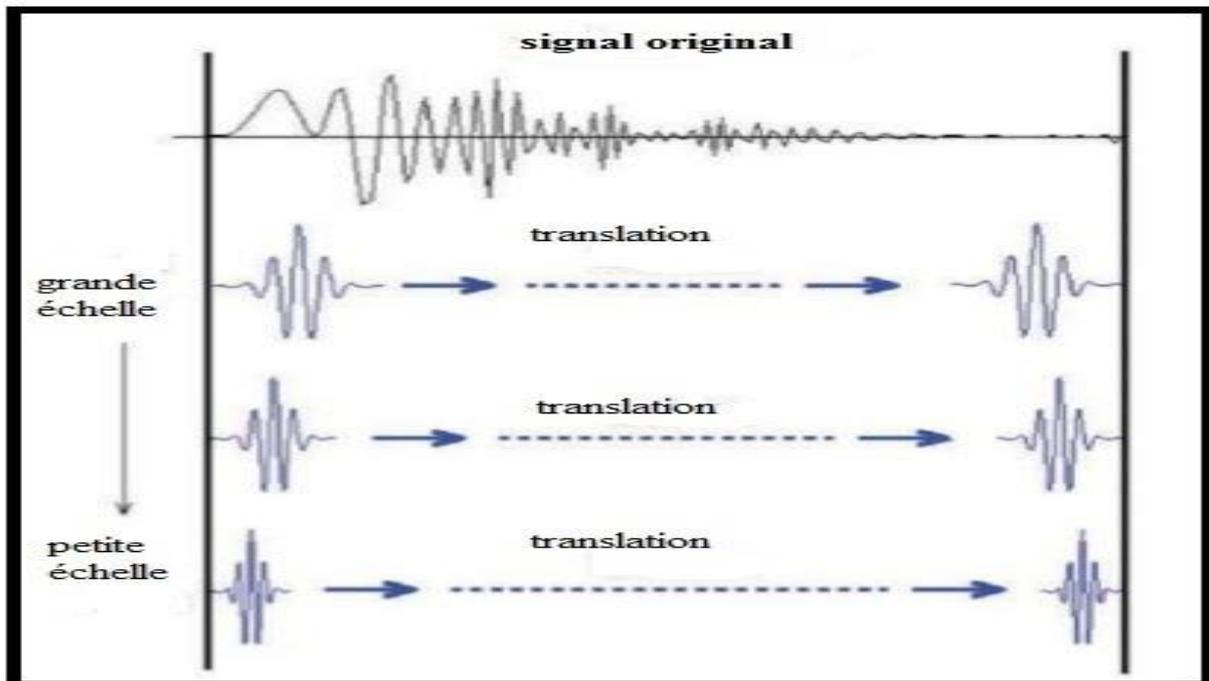


Figure. III.6: processus de mise à l'échelle et de traduction [25]

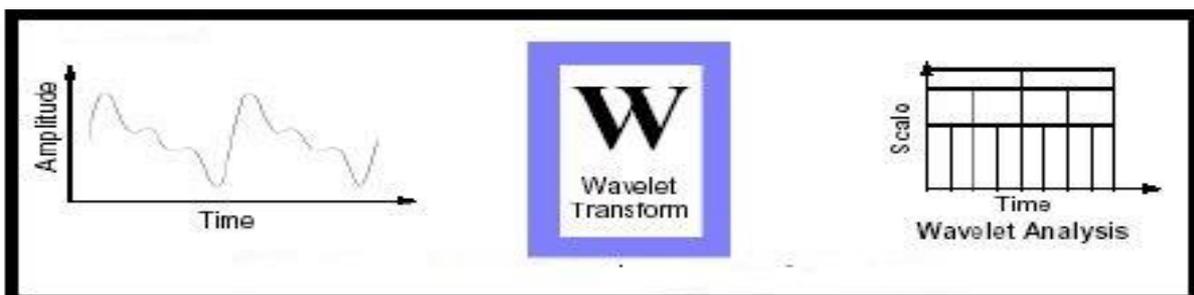


Figure. III.7. Schéma de la transformation en ondelettes.[26]

La transformée en ondelette et représente un signal dans une séquence de coefficients d'ondelettes finies, et peut être défini par la fonction d'ondelette  $\psi(t)$  (également appelée ondelette mère  $\psi(t)$  ).

Une ondelette est une forme d'onde de la durée limitée qui a une valeur moyenne zéro :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{III.4})$$

Lorsqu'on parle d'une "ondelette mère", on indique le fait que les fonctions utilisées sont dérivées d'une fonction principale, c'est-à-dire que l'ondelette mère est le modèle ou le prototype à partir duquel les autres fonctions sont générées. Ainsi, chaque famille d'ondelettes est définie par l'expression suivante : [24]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0 \quad (\text{III.5})$$

- $b$  : Facteur de translation.
- $a$  : Facteur de dilatation « Echelle ».
- $\psi_{a,b}(t)$ : Ondelette mère.
- $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ : Ondelettes enfants.
- $\frac{1}{\sqrt{a}}$ : Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles.

Les (WT) peuvent être classés en deux groupes selon la manière dont les paramètres de déplacement et d'échelle sont discrétisés. Ces deux groupes sont connus sous le nom de TW continu (CWT) et TW discret (DWT).

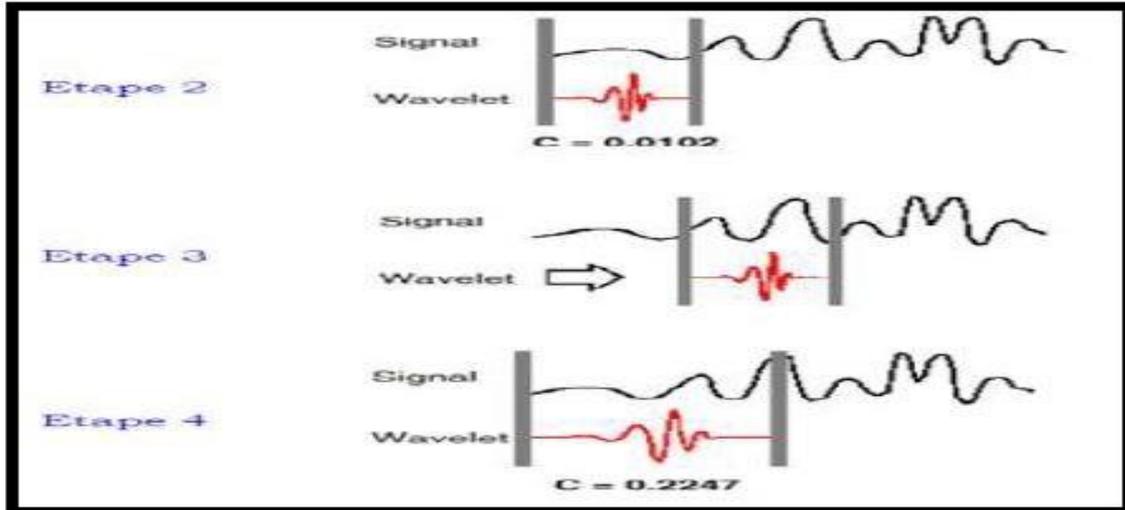
### III.3.3. Transformée en ondelettes continues (CWT)

Le concept de ce type de transformation est développé de manière similaire à la STFT, dans le sens où le signal est multiplié par une fonction ondelette similaire à la fonction fenêtre de la STFT.

La principale différence entre la STFT et la CWT est que la largeur de la fenêtre est variable au fur et à mesure que la transformation se développe pour chaque composante du spectre, Et ses propriétés sont dans les équations. (III.4) et (III.5) et tableau (III.1) ci-dessus.

#### III.3.3.1 Calcul de la transformée en ondelettes continues :

Une fois que l'ondelette mère (Haar, Daubechies, Morlet, Mexican Hat, en autres) qui sert de modèle pour toutes les fenêtres utilisées dans le processus, a été sélectionnée, les étapes nécessaires pour obtenir une méthode simple de calcul de la CWT sont énumérées. [25]



**Figure. III.8 :** Les étapes de la transformation en ondelettes continue [23]

1. On prend une Ondelette et on l'a comparé à une section au début du signal original.
2. On calcule le coefficient  $C(a, b)$  qui représente le degré de corrélation de l'ondelette avec cette portion du signal.
3. On translate l'ondelette vers la droite et on répète les étapes (1) et (2) jusqu'à ce que le signal soit couvert en entier.
4. On dilate l'Ondelette et on répète les étapes une (1) à trois (3).
5. On recommence l'opération pour toutes les étapes à différentes échelles. [23]

### III.3.4 Transformée en ondelettes discrètes (DWT)

La conception d'une version discrète du WT consiste essentiellement à définir un réseau discret approprié de paramètres  $\{(a_j; b_{jk})\}$  illustré dans (III.6), D'échelles et de translations, respectivement. Ainsi la famille d'ondelettes  $\psi_{j,k}$  montrée dans (III.7), et ainsi les paramètres d'échelle et de translation prennent des valeurs discrètes .

L'inconvénient de DWT est qu'elle produit un nombre élevé de coefficients pour représenter un signal exigeant un temps de calcul élevé pour reconstituer le signal d'origine. [24] [32]

$$a_j = 2^{-j}; b_{jk} = 2^{-j}j, k \in Z \tag{III.6}$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k), j, k \in Z \tag{III.7}$$

L'algorithme de la transformée en ondelettes discrètes (DWT) est le suivant :

Étant donné un signal S de longueur N, la DWT comprend au plus  $\log_2 N$  étapes. La première étape produit, à partir de S, deux ensembles de coefficients : les coefficients d'approximation A, et les coefficients de détail D. Ces vecteurs sont obtenus en convoluant S avec le filtre passe-bas pour l'approximation, ET avec le filtre passe-haut pour les détails. [31]

La transformation en ondelettes est considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine s(n), traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux. Respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails comme le montre la figure III.9.[1]

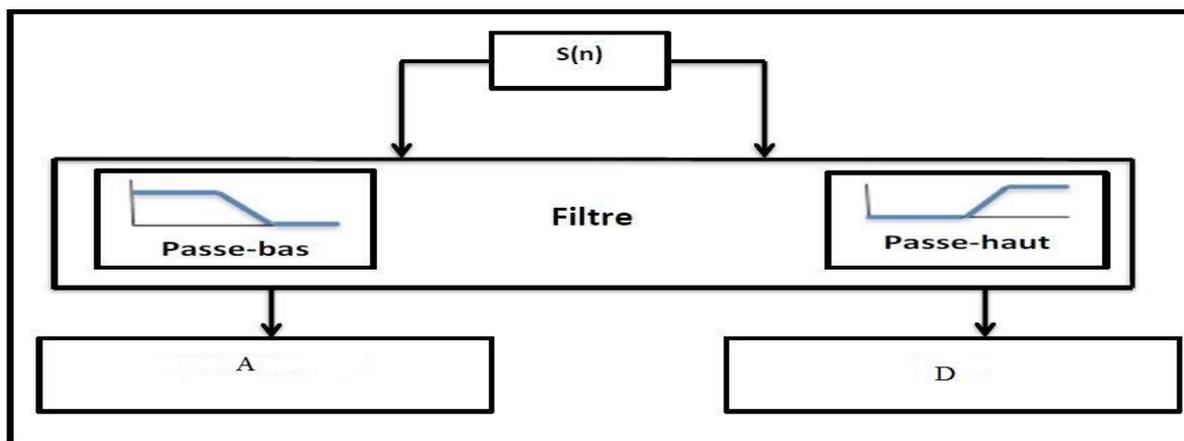


Figure.III.9: Décomposition du signal s(n), en approximations et détails. [1]

Dans la majorité des signaux, les composantes de basse fréquence qui donnent au signal la plupart de ses informations, ou qui lui confèrent une sorte d'identité, Les composantes haute fréquence, quant à elles, sont chargées d'intégrer des caractéristiques plus particulières. C'est pourquoi les composantes d'un signal sont subdivisées en deux catégories :

- Approximations (basse fréquence)
- Détails (haute fréquence)

### III.3.4.1 Décomposition simple

Comme il a été noté précédemment le signal  $s(n)$ , est divisé en deux signaux mais, actuellement pour faire cette opération dans un signal réelle, on trouve deux signaux de même taille que le signal original, c'est-à-dire le nombre de données originales est doublé car pour chaque échantillon  $S$ , une paire d'échantillons  $A$  et  $D$  est générée, ce qui entraîne un coût mathématique et de calcul élevé pour la somme de  $A$  et  $D$  égale à  $S$ .

Supposons, pour l'instant, que le signal original  $s(n)$  contient 1000 échantillons. Le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons

L'image de droite montre comme exemple une idée de décomposition d'un signal  $S$  composé de 1000 données, qui en passant par le banc de filtres et le sous-échantillonnage(Downsampling), est divisé en deux signaux, un signal haute fréquence composé des coefficients de détail ( $cD$ ) et un signal basse fréquence composé des coefficients d'approximation ( $cA$ ) [1] [26] .

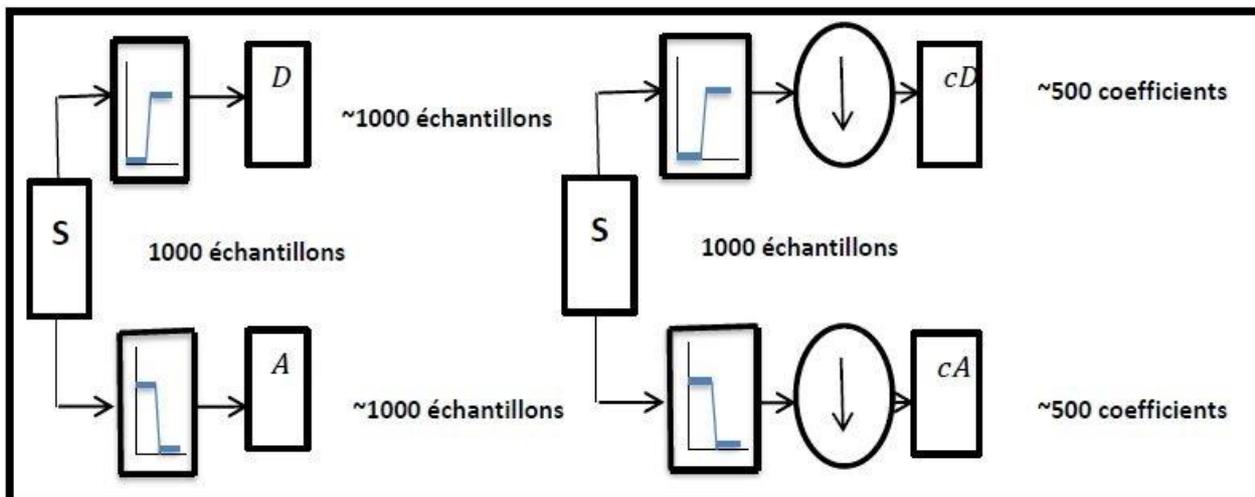


Figure .III.10: Décomposition simple du signal  $s$  en approximations et détails [1]

Lorsqu'il est nécessaire de travailler avec des signaux plus complexes, l'analyse avec seulement deux bandes de fréquences n'est pas suffisante, il faut donc une décomposition impliquant plus de niveaux. L'idée de la décomposition à plusieurs niveaux, qui est brièvement décrite comme suit

### III.3.4.2 Décomposition multi niveaux

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal  $S$  en plusieurs niveaux comme illustré à la figure. III.11. Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en plusieurs composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer. [33]

Le signal  $S(n)$  est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolution. Les premiers coefficients de décomposition sont  $A_1$  et  $D_1$ , où  $A_1$  est la version approximative du signal original  $S(n)$  et  $D_1$  est la représentation détaillée du signal original  $S(n)$  qui est défini dans la figure III.10 [9]

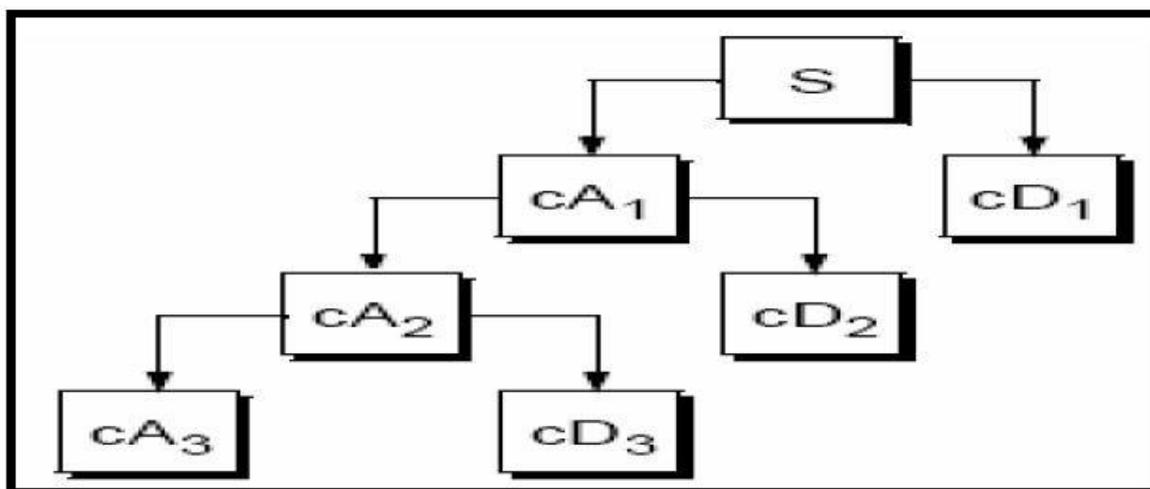


Figure. III.11 : Décomposition du signal  $S$  en multi-niveaux [9]

Notez que  $CD_1$  s'avère être la composante de fréquence la plus élevée du signal, et  $CA_3$  la composante de fréquence la plus basse. En décomposant le signal en plus grand nombre de bandes de fréquence, on obtient des informations plus détaillées sur  $S$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} S = cA_1 + cD_1 \\ S = cA_2 + cD_2 + cD_1 \\ S = cA_3 + cD_3 + cD_2 + cD_1 \end{array} \right. \quad \text{(III. 8)}$$

Le principal inconvénient de l'analyse multirésolution est la perte d'information due au fait que seuls les coefficients d'approximation sont décomposés dans les niveaux successifs, les coefficients de détail ne générant aucune information supplémentaire aux niveaux de décomposition successifs. On peut dire que la décomposition optimale des bandes de fréquences les plus élevées du signal n'est pas possible avec l'analyse multirésolution.

### III.4. La transformée en paquet d'ondelette

Pour résoudre le problème de l'analyse multirésolution fait place à une étude plus complète appelée analyse par paquets d'ondelettes ou transformée par paquets d'ondelettes (WPT). Grâce à ce type d'étude, le problème susmentionné peut être résolu, de sorte que, pour le même signal, en utilisant la même méthodologie, tant les coefficients d'approximation que les coefficients de détail peuvent être décomposés au niveau requis, obtenant ainsi plus d'informations sur le signal.

Si l'on considère le signal  $S$  ou  $X[n]$  comme un signal discret avec une bande de fréquence comprise entre  $0-\pi$ [Hz] et un nombre d'échantillons  $N$ , le tableau "III" .2 montre les informations contenues dans chaque paquet selon le niveau de décomposition 3 : [34]

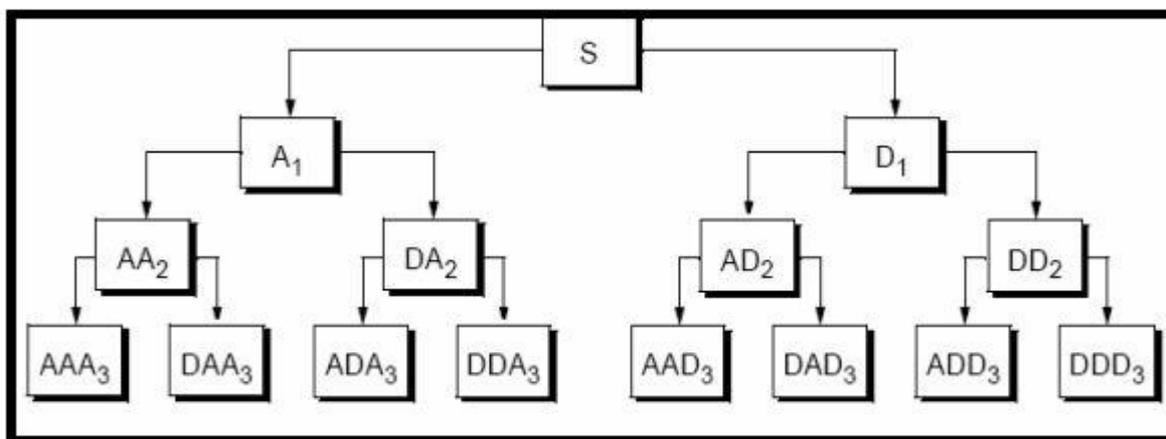


Figure. III.12 : Décomposition en paquet d'ondelettes [9]

$$\begin{cases} \text{Niveau 1} & s(n) = A_1(n) + D_1(n) \\ \text{Niveau 2} & s(n) = AA_2(n) + A_2(n) + AD_2(n) + DD_2(n) \\ \text{Niveau 3} & s(n) = AA_3(n) + DAA_3(n) + ADA_3(n) + DDA_3(n) + AD_3(n) \\ & + DAD_3(n) + ADD_3(n) + DDD_3(n) \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

**Tableau III.2** : Information de chaque paquet d'ondelettes pour le signal  $X[n]$ . [34]

paquet [HZ]	NIVEAU	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS	BANDE DE FRÉQUENCES
A1	1	$N/2$	$0 - \pi/2$
D1	1	$N/2$	$\pi/2 - \pi$
AA2	2	$N/4$	$0 - \pi/4$
DA2	2	$N/4$	$\pi/4 - \pi/2$
AD2	2	$N/4$	$\pi/2 - 3\pi/4$
DD2	2	$N/4$	$3\pi/4 - \pi$
AAA3	3	$N/8$	$0 - \pi/8$
DAA3	3	$N/8$	$\pi/8 - \pi/4$
ADA3	3	$N/8$	$\pi/4 - 3\pi/8$
DDA3	3	$N/8$	$3\pi/8 - \pi/2$
AAD3	3	$N/8$	$\pi/2 - 5\pi/8$
DAD3	3	$N/8$	$3\pi/4$
ADD3	3	$N/8$	$7\pi/8 - \pi$
DDD3	3	$N$	$-7\pi/8$

### III.4.1 Energie de la décomposition d'ondelette

Pour le calcul de l'énergie des paquets, nous utiliserons l'expression **III.10** dans laquelle on observe que pour tout paquet  $j$  au niveau de décomposition  $k$ , on peut obtenir la valeur énergétique par la somme du carré de tous ses coefficients. [35]

$$E(k, j) = \sum_i \{w_i(k, j)\}^2 \tag{III.10}$$

### III.5. La famille d'ondelettes (Mère ondelette) :

La fonction  $\psi_{a,b}(t)$  est appelée ondelette mère pour les deux raisons suivantes :

- Le terme ondelette signifie "petite onde". La petitesse fait référence au fait que la longueur est finie et que la fonction est de nature oscillatoire.
- Le terme mère est dû au fait qu'il s'agit d'un prototype permettant de générer d'autres fonctions de fenêtre dans d'autres régions.

Le choix de l'ondelette dépend des caractéristiques du signal et de la nature de l'application. Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Le tableau (III.3) contient les familles les plus usuelles : [31][35]

**Tableau III.3:** Familles d'ondelettes [35]

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	db
Symlets	sym
Coiflets	coif
Ondelettes biorthogonales	bior
Ondelette de Meyer	meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	dmey
Ondelettes de Battle et Lemarié	btlm
Ondelettes gaussiennes	gaus
Chapeau mexicain	mexh
Ondelette de Morlet	morl
Ondelettes gaussiennes complexes	cgau
Ondelettes de Shannon complexes	shan
Ondelettes B-spline fréquentielles complexes	fbsp
Ondelettes de Morlet complexes	cmor

### III.5.1. Ondelette de HAAR:

L'onde de Haar est la première et la plus simple des ondelettes orthogonales proposées par Alfred Harr, en 1909, elle a une structure simple d'onde carrée comme le montre la figure III.13, et ainsi l'ondelette de HAAR est la seule ondelette discontinue qui a un seul moment nul elle ressemble à la fonction escalier, donc si on effectue une projection d'un signal sur cette base on aura une allure escalier. La fonction ondelette de Haar  $\psi(t)$  est définie par l'expression suivante, illustrée dans (III.11), [24][36]

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} < t \leq 1 \\ 0 & t \notin [0,1] \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

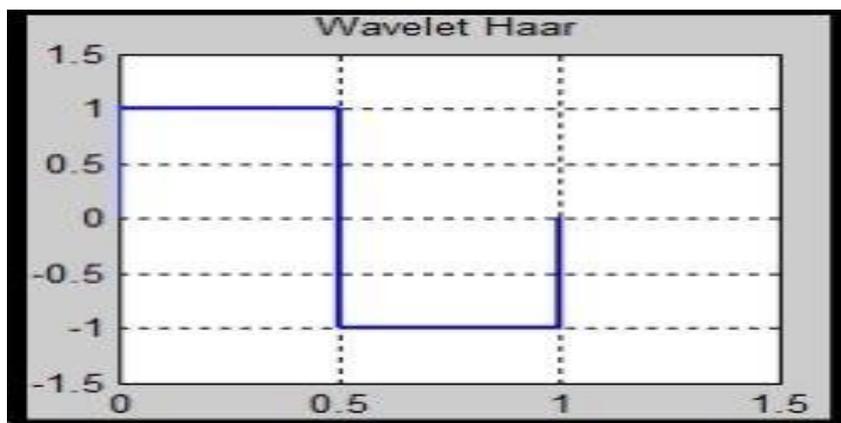


Figure. III.13: Fonction d'ondelette de Haar [24]

La fonction d'échelle est définie par l'expression (III.12)

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0,1] \\ 0 & t \notin [0,1] \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

### III.5.2. Ondelette de Daubechies:

Cette famille d'ondelettes à un paramètre permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire. Pour N, c'est l'ordre de l'ondelette dbN. Pour N = 1, db1 est appelée ondelette de Haar, les ondelettes Db sont utilisées dans le traitement des signaux discrets et sont considérées comme les ondelettes mères les plus utilisées en raison de leur propriété orthogonale, qui est puissante pour la localisation. [24] [27]

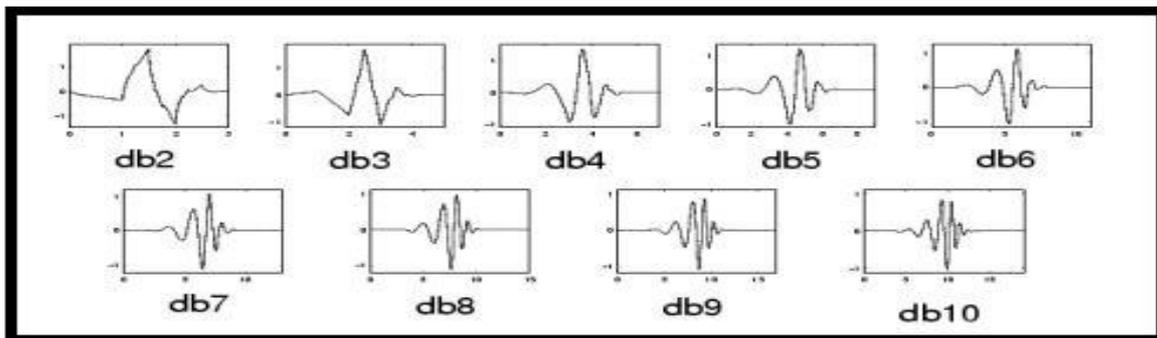


Figure. III.14: ondelettes de daubechies [36]

**III.5.3. Les symlets**

Sont une famille d'ondelettes symétriques proposée par Ingrid Daubechies comme une modification de la famille Db, Les propriétés de ces deux familles d'ondelettes sont très similaires, à la seule différence que les symlets ont une approximation symétrique.[24]

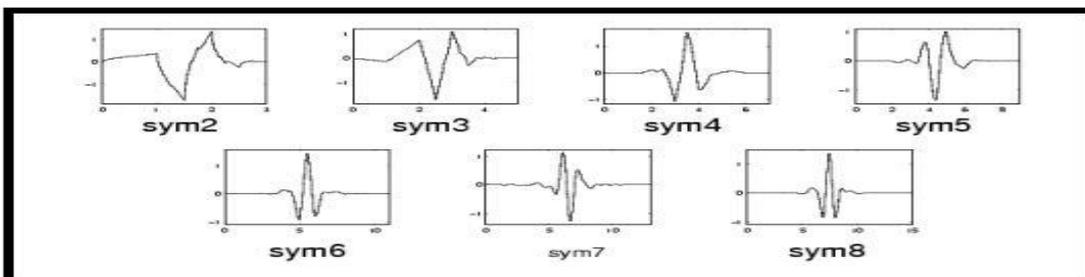


Figure. III.15: Les ondelettes symlet [36]

**III.5.4. Ondelette de MORLET**

L'ondelette de Morlet est définie comme une fonction exponentielle complexe, illustrée dans ou comme une onde sinusoïdale complexe contenant une enveloppe gaussienne, La fonction d'ondelette est visualisée dans la figure

$$\psi(t) = Ce^{\left(-\frac{t^2}{2}\right)} \cos(5t) \tag{III.13}$$

Où C est une constante utilisée pour la normalisation en vue de la reconstruction.

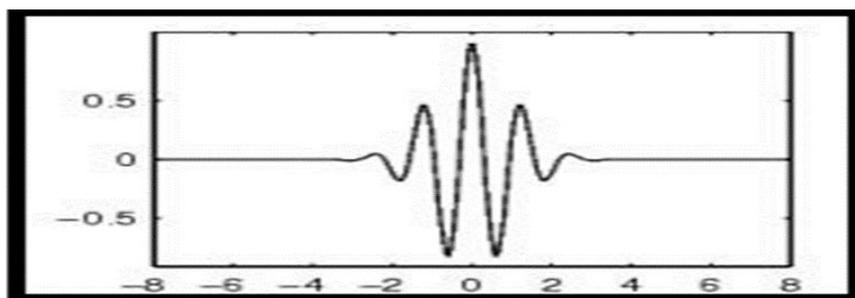


Figure. III.16 : Ondelette de MORLET [36]

### III. 5. 5. Ondelette de MEYER

L'ondelette de Meyer est l'une des premières ondelettes. Elle a été construite par Y.Meyer au milieu des années 1980. Il s'agit d'une ondelette orthogonale qui n'a pas un support compact. La forme de cette ondelette est donnée par la figure III.17. [27]

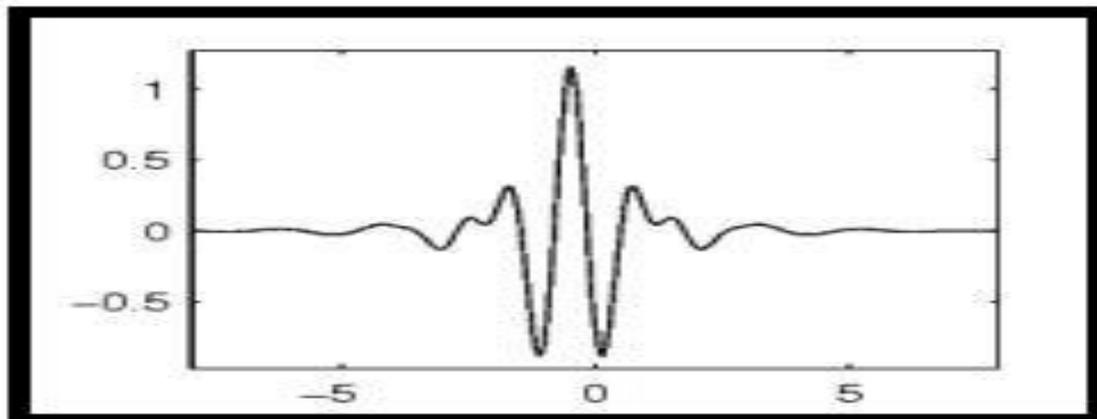


Figure. III.17 : Ondelette de MEYER [36]

### III. 5. 6. Ondelette Chapeau mexicain

L'ondelette chapeau mexicain est défini comme la dérivée seconde de la fonction de distribution gaussienne, indiquée dans (III.14), Comme l'ondelette de Morlet, elle est symétrique et n'a pas de fonction d'échelle associée, donc n'est pas orthogonale, La fonction ondelette est illustrée à la figure III.18 [24]

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\pi^4}} e^{-\frac{t^2}{2}} (1 - t^2) \quad (\text{III.14})$$

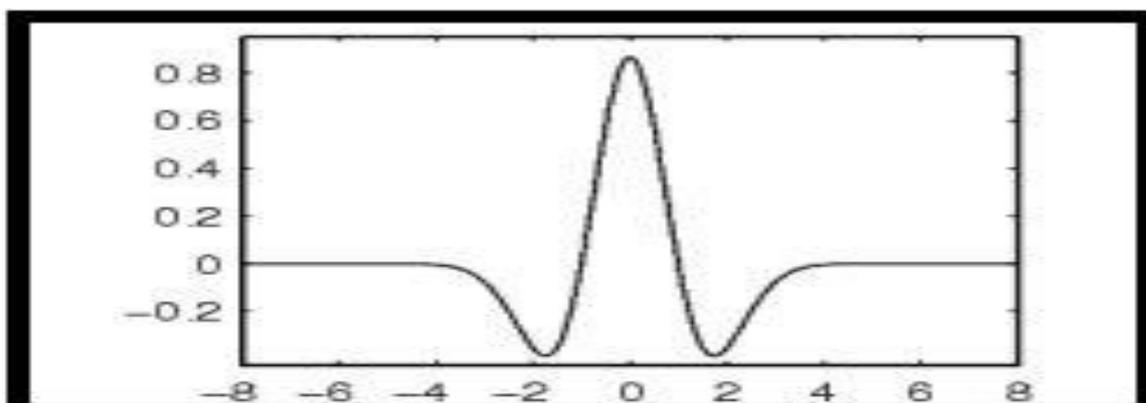


Figure. III.18: Ondelette chapeau mexicain [36]

### III.5.7. Ondelette gaussienne

La famille d'ondelettes gaussiennes est définie comme la première dérivée de la fonction de densité de probabilité gaussienne illustrée dans (III.15) ; si on la dérive à un ordre supérieur, on obtient la seconde dérivée gaussienne qui, comme indiqué ci-dessus. La famille des ondelettes gaussiennes est illustrée à la figure. III.19, du niveau 2 au niveau 5.

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}\pi^4} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)(1-t^2)} \quad (\text{III.15})$$

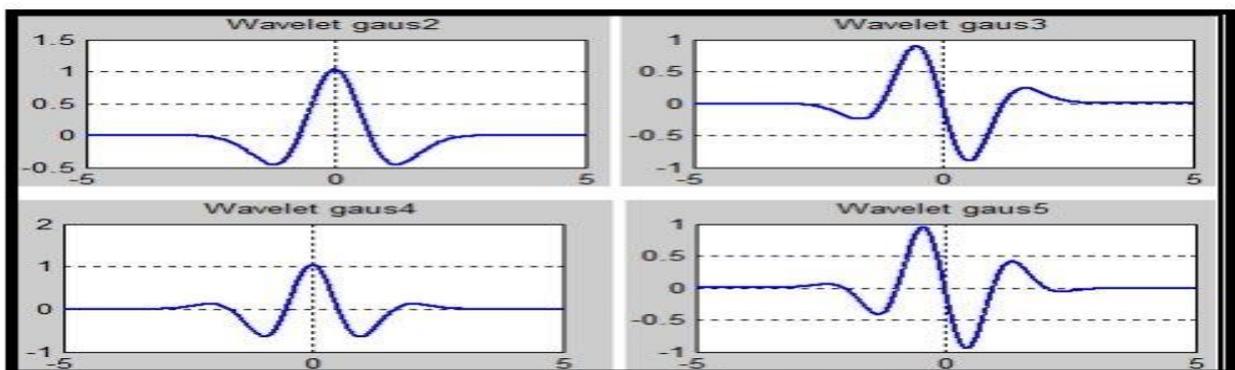


Figure. III.19. Famille d'ondelettes gaussiennes [24]

#### ❖ Choix de la meilleure ondelette

Le critère de choix de la meilleure ondelette mère reste un problème à déterminer.

Malheureusement, il n'y a pas d'ondelette qui soit meilleur que les autres, tout dépend de l'application. Dans certain cas, l'ondelette la plus simple (haar) sera optimale. Pour d'autres applications, ce sera le pire des choix possibles.

En pratique le choix de la meilleur ondelette se base sur :

- **La forme d'ondelette analysante** : plus la fonction ressemble à l'événement à traiter, plus l'analyse sera efficace.
- **Les propriétés mathématiques** (moments nul, régularité,)
- Une ondelette qui permet un traitement de signal efficace est acceptable, même si elle n'est pas la meilleure possible. De toute façon, une ondelette optimale pour les signaux mesurés lors d'une certaine expérimentation dans un domaine donné ne le serait pas nécessairement lors d'une autre prise de mesures pour un autre domaine [27]

### • III.6 Transformée de Hilbert (TH)

Les techniques de traitement des signaux sur la base de transformée de Hilbert ont été utilisés pour extraire les composantes de modulation qui sont capables de caractériser les modes de défaillance du roulement .

La transformée de Hilbert est donné par l'équation (III.16):

$$\tilde{f}(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{f(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (\text{III.16})$$

Où  $\tilde{f}(t)$  est la transformée de Hilbert de  $f(t)$  et  $\tau$  une variable temporelle.

$\tilde{f}(t)$  est la convolution de  $f(t)$  avec la fonction:  $1/\pi.t$ , soit:

$$\tilde{f}(t) = f(t) \times \frac{1}{\pi.t} \quad (\text{III.17})$$

Cette fonction dans le domaine complexe, n'est autre que le signal:

$$\hat{f}(t) = f(t) + j\tilde{f}(t) \quad (\text{III.18})$$

Le module de  $\hat{f}(t)$  définit l'enveloppe de  $f(t)$ , soit sa démodulation:

$$|\hat{f}(t)| = \sqrt{f(t)^2 + \tilde{f}(t)^2} \quad (\text{III.19})$$

### III.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases théoriques de la transformée en ondelettes. Après avoir rappelé la transformée de Fourier et ses limitations vis-à-vis des signaux non stationnaires. Une solution à ce problème a été introduite : la transformée de Fourier à fenêtre glissante. Mais, celle-ci n'est pas pleinement adéquate à cause du choix de la fenêtre d'analyse qui pourra compromettre les notions de résolution et de stationnaires du signal analysé. Cela nous a conduit à introduire la transformée en ondelette comme outil très performant dans l'analyse des signaux non stationnaires, nous avons exposé une vue générale d'ondelettes ainsi que les paquets d'ondelettes, vu leur importance et leur utilisation dans le cadre de ce projet.

## Chapitre IV:

### Diagnostic des défauts de roulement par transformée en ondelettes.

#### IV.I. Introduction :

Dans ce chapitre, les méthodes de traitement des signaux seront appliquées en analysant fourier et la transformation en paquets d'ondelettes. L'objectif principal est d'identifier les fréquences de défaillance caractéristiques de chaque composant d'un roulement, ou dans le cas où cela n'est pas possible, d'observer un schéma permettant de diagnostiquer les défauts. Parfois, il peut être assez difficile d'observer des indices de l'existence d'un défaut. À cette fin, les parties suivantes travailleront avec des signaux obtenus à partir de la base de données de la Case Western Université.

#### IV.2 Présentation de banc d'essais

Le site Web suivant : "<https://engineering.case.edu/bearingdatacenter>", permet d'accéder à la base de données des essais de roulements à billes, Dans cette base de données, nous pouvons trouver des signaux provenant de roulements de type Drive End Bearing et Fan End Bearing, échantillonnés à 12 [kHz] et 48 [kHz] et ( le nombre de points total est de  $N_p = 243938$ pts pour la fréquence échantillonnés égale 12 [Khz]). Pour chaque type de roulement, il existe également des signaux caractéristiques de roulements en fonctionnement normal (Normal Baseline), et des signaux de roulements présentant une défaillance dans chacun de leurs composants (Outer ring , Inner ring, Rolling Element), Chacun de ces tests a été réalisé Pour différents couples résistants (donc différentes vitesses de rotations).

Les couples sont respectivement 0,1,2,3Hp dont des vitesses respectives sont 1797 , 1772,1750,1730tr/min, L'avantage de l'utilisation des signaux de cette base de données réside dans la documentation de toutes sortes de détails sur la façon dont elle a été réalisée, ce qui peut être utile pour observer l'évolution des défauts.

L'équipement utilisé se compose d'un moteur électrique à induction, d'un capteur de couple qui

enregistre le couple autour de l'arbre à tout moment pendant le fonctionnement, deux accéléromètre à base magnétique placés à la position 12 heures "verticale, des deux cotés (côté de l'entraînement et du côté du ventilateur de la cage du moteur) pour enregistré les signaux vibration , d'un dynamomètre chargé de faire varier la charge du système et des commandes électroniques correspondantes du banc d'essai. Tout ceci peut être vu dans la figure IV.1 ci-dessous :



**Figure IV.1** Banc d'essai de roulements l'université Case Western Reserve

Les données ont été enregistrées pour :

- Les roulements sans défaut.
- Les défauts uniques du cotés l'entraînement (12.000 et 48.000 points/second).
- Les défauts uniques du cotés ventilateur (12.000 points/second.)  
La vitesse [tr/min] et la puissance [Hp] pour chaque essai ont été enregistrées manuellement en utilisant le couple transducteur/encodeur

Dans ce travail, les roulements que nous avons considérés, sont les roulements de côté l'entraînement et les signaux de type palier d'extrémité d'entraînement échantillonnés à une fréquence d'échantillonnage de 12 [kHz] seront utilisés. La raison pour laquelle nous ne travaillons qu'avec les signaux échantillonnés à 12 [kHz] est que l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage de 48 [kHz] pourrait compliquer l'analyse des signaux. Les caractéristiques des roulements des deux cotés (accouplement), y compris les fréquences du défaut et la géométrie du roulement sont énumérées ci-dessous : (**Tableau IV.1.**)

**Tableau IV.1.** Caractéristiques des roulements et des fréquences des défauts

Caractéristique du roulement coté accouplement :6205-2RS JEM SKF, roulement à Billes de cannelure profonde.

Taille : (inches)

Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de Bille	Diamètre primitive
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

Fréquences du défaut: (ce coefficient multiplié par la fréquence de rotation en *Hz* )

Bague Intérieur	Bague Externe	Cage	Élément Roulant
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

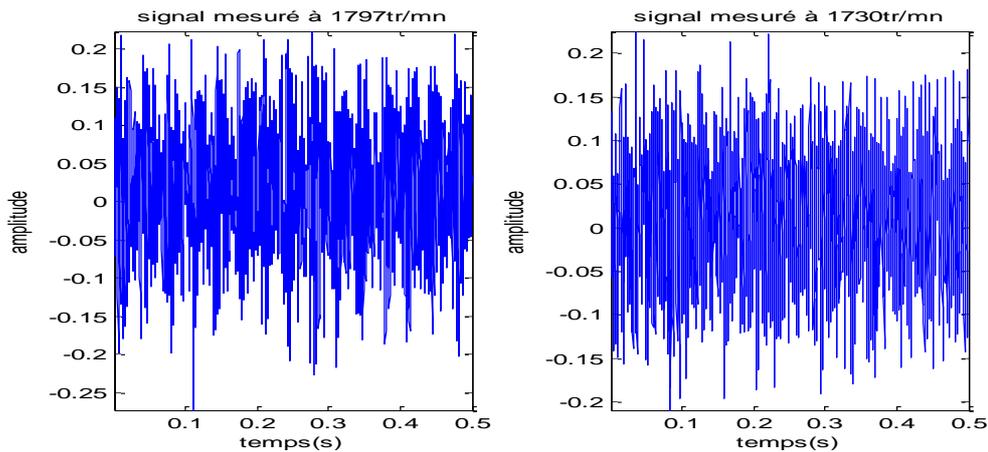
Les fréquences caractéristiques sont :

- Fréquence de la bague intérieure :  $f_{bi} = 5.415 \times f_r$  **IV.1**
- Fréquence de la bague extérieure :  $f_{be} = 3.584 \times f_r$  **IV.2**
- Fréquence de la cage :  $f_{cage} = 0.3982 \times f_r$  **IV.3**
- Fréquence de la bille :  $f_{bill} = 4.7135 \times f_r$  **IV.4**

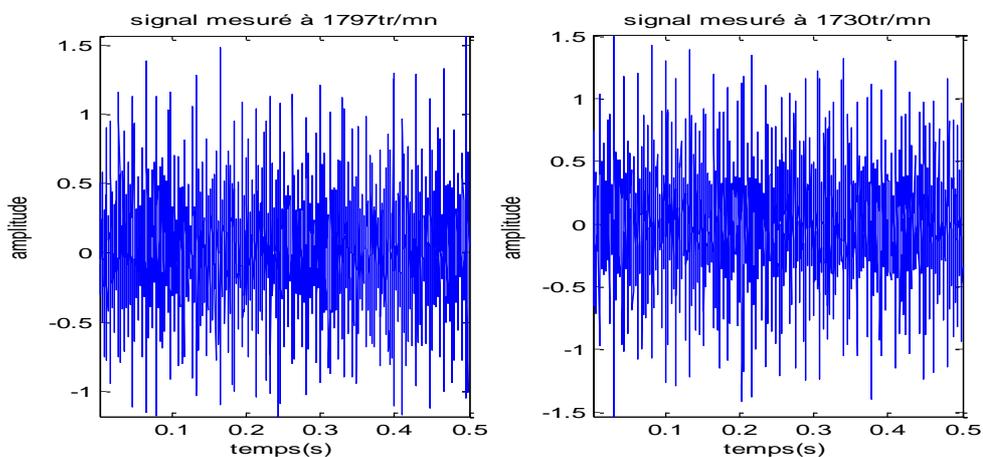
**Tableau IV.2.** Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistant

Fréquence de rotation	29.95 Hz, (0Hp)	29.53 Hz, (1Hp)	29.16 Hz, (Hp)	28.83 Hz, (3Hp)
Bague intérieure	162.18 Hz	159.9 Hz	157.9 Hz	156.11 Hz
Bague extérieure	107.01 Hz	105.83 Hz	104.50 Hz	103.32 Hz
La cage	11.89 Hz	11.75 Hz	11.61 Hz	11.48 Hz
Les billes	140.74 Hz	139.18 Hz	137.44 Hz	135.89 Hz

Les figures IV.2, IV.3 et IV.4 représentent les signaux de vibration de l'état normal, du défaut de bagues intérieure et du défaut de bagues extérieure respectivement.



**Figure IV.2 :** Signaux vibratoires de l'état normal



**Figure IV.3 :** Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague intérieure du roulement

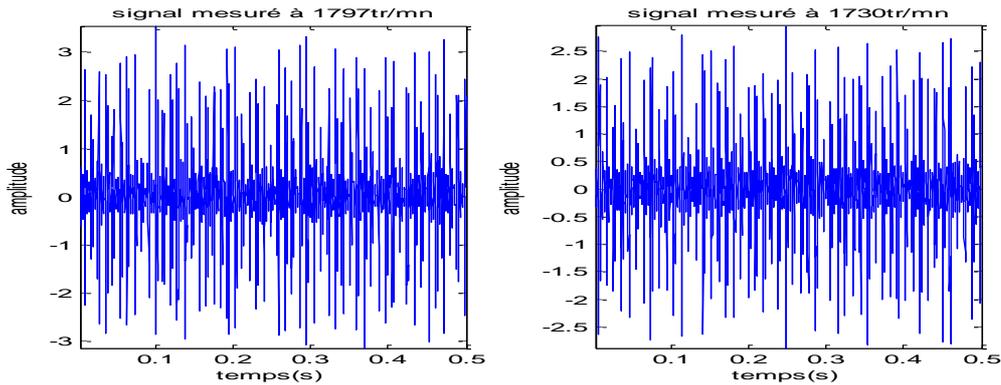


Figure IV.4 : Signaux vibratoires d'un défaut sur la bague extérieure du roulement

### IV.3 Analyse spectrale de Fourier par FFT :

Pour faire des comparaisons ultérieures avec d'autres méthodes d'analyse, on choisit pour commencer l'analyse spectrale de Fourier comme outil d'analyse de référence. Pour faire cette étude, on choisit deux types de défauts : défaut de la bague intérieure du roulement et le bague extérieure, mesurés à deux différentes charges ou vitesses de rotation à savoir, 1797 tr/min (0 HP) et 1730 tr/min (3 HP).

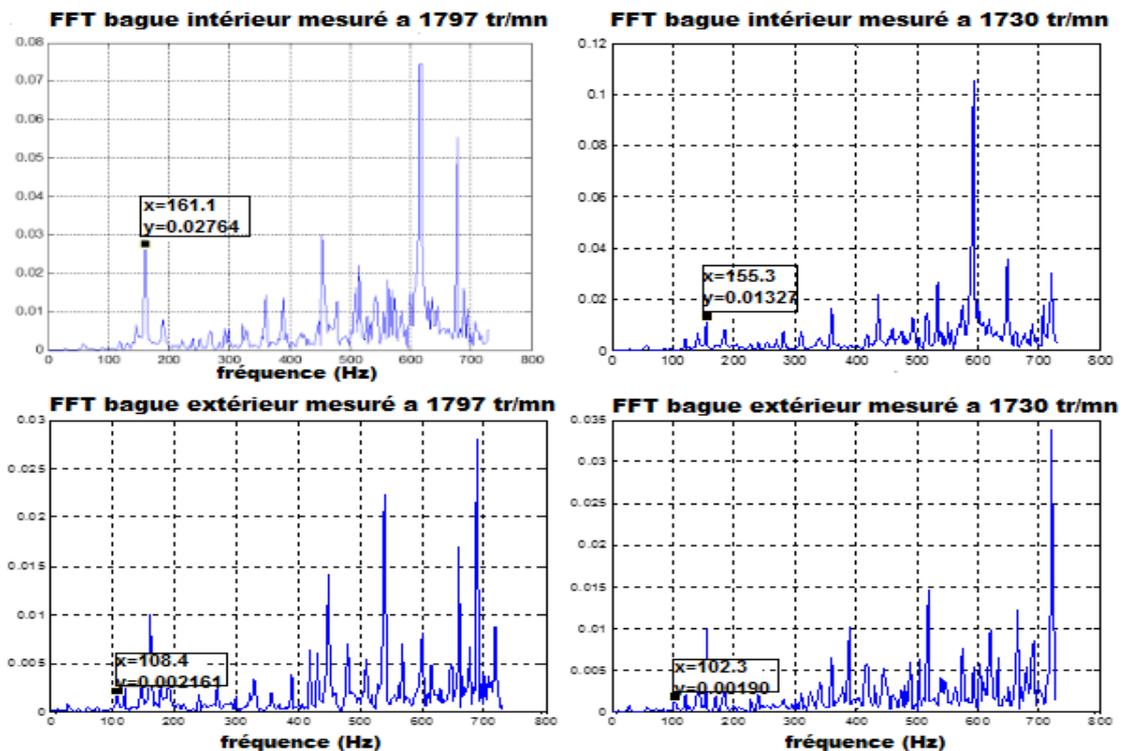
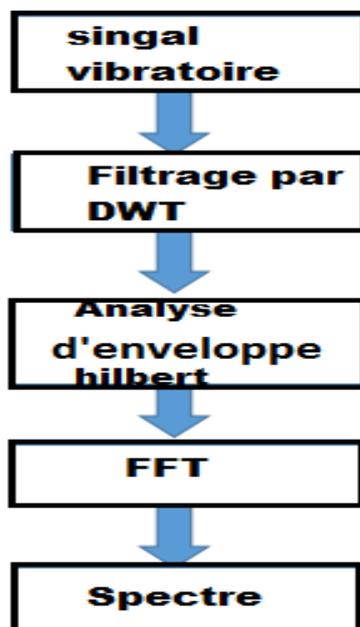


Figure IV.5 : spectre FFT défauts bague intérieure et bague extérieure mesurés a 1797tr/mn et 1730 tr/mn

On constate l'existence des fréquences représentatives du défaut de bague intérieure 161.1 Hz et 155.3 Hz pour les vitesses respectivement 1797tr/mn et 1730tr/mn qui sont très proches des valeurs calculées 162.18 Hz et 156.11 Hz données par le tableau **IV.1**. Pour les défauts de la bague extérieure Les niveaux des amplitudes des fréquences sont très faibles : 108.4 Hz et 102.5 Hz respectivement pour les vitesses 1797tr/mn et 1730tr/mn qui sont très proches des valeurs théoriques données par le tableau **IV.1**. On conclue que l'analyse de Fourier n'a pas toujours les mêmes performance de détecter Les fréquences de différents types de défauts a causes de la nature des signaux de défauts et l'existence des signaux de bruit et résonance. Dans le paragraphe suivant, on va appliquer d'autres méthodes plus aptes à détecter ces défauts, qui sont l'analyse multi résolution d'ondelettes (AMRO) combinée avec L'analyse d'enveloppe.

#### **IV.4 Application de l'AMRO pour diagnostiquer les défauts de roulement.[53]**

L'organigramme de la méthode proposée basée sur un filtrage par les ondelettes suivies par l'analyse en enveloppe est représenté dans la figure **IV.6**.



**Figure IV.6 :** Méthode proposée pour le diagnostic des défauts dans les roulements à billes

Les décompositions des signaux des défauts de roulement obtenus par l'analyse Multi résolution en utilisant l'ondelette mere de Daubechie 4 (db4) et de niveau 4 de décomposition sont illustrées sur les figures **IV.7 (a) et IV.8 : (a)** Les spectres de défauts de roulement obtenus par cette même méthode sont illustrés sur les Figures **IV.5 et IV.6**

On peut voir clairement sur les figures **IV.7 (b) et IV.8 (b)** les pics de fréquence à 161.1 Hz et 155.3 Hz et de leurs multiples. Les pics de fréquence à 161.1 Hz et 155.3 Hz sont très proches de fréquences calculées de défaut de bague intérieure à 162,18 Hz et 156.11Hz telles que mentionnées dans le tableau **IV.1**. Cela indique clairement un défaut de bague intérieure.

Quant à les figures **IV.9(b) et IV.10 (b)**, On peut voir clairement les pics de fréquence à 108.4 Hz et 102.5 Hz et de leurs multiples. Les pics à 108.4 Hz et 102.5Hz sont très proches des fréquences calculées de défaut de bague extérieure à 107.01 Hz et 103,32 Hz telles que mentionnées, précédemment, dans le tableau **IV.1**. Cela indique clairement un défaut de bague extérieure.

Par ailleurs, les défauts de roulement peuvent également être identifiés à l'aide de l'analyse multi- résolution. Malheureusement, la technique reste contraignante au vu de la difficulté dans le choix approprié de l'ondelette mere et du niveau de décomposition.

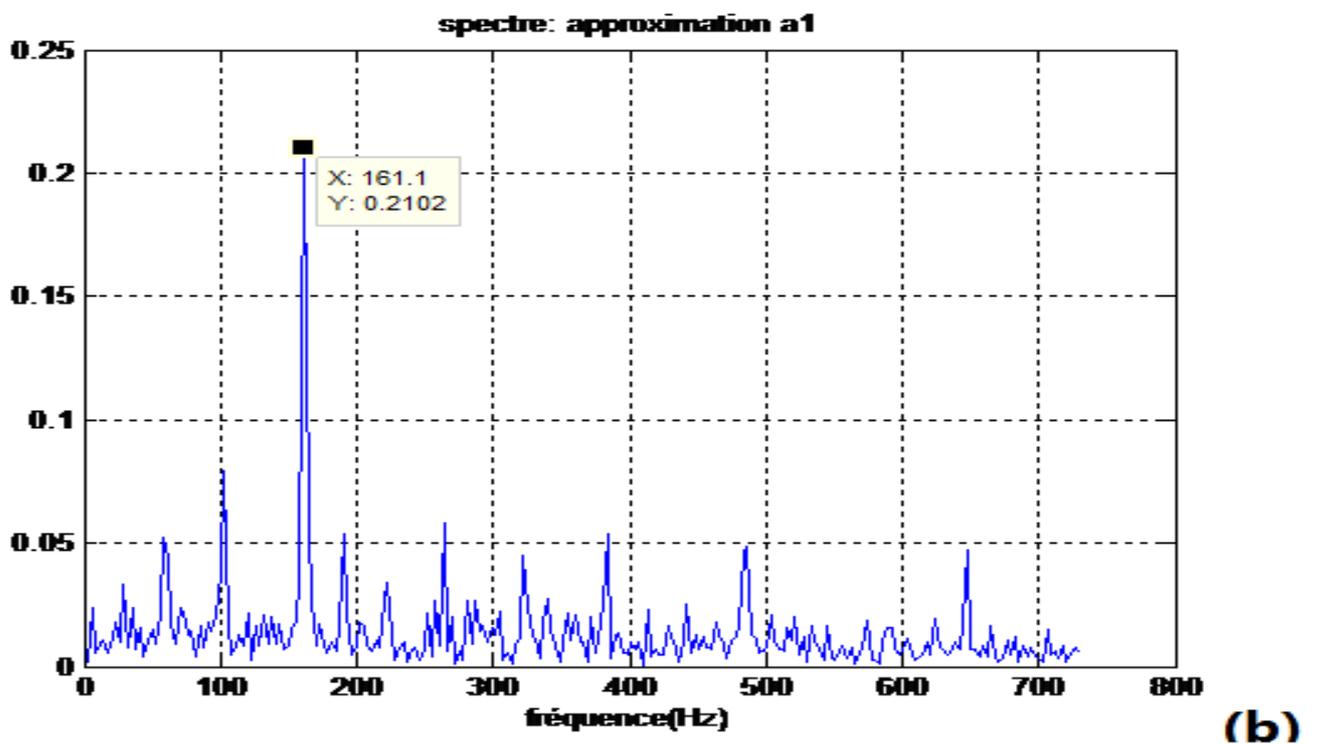
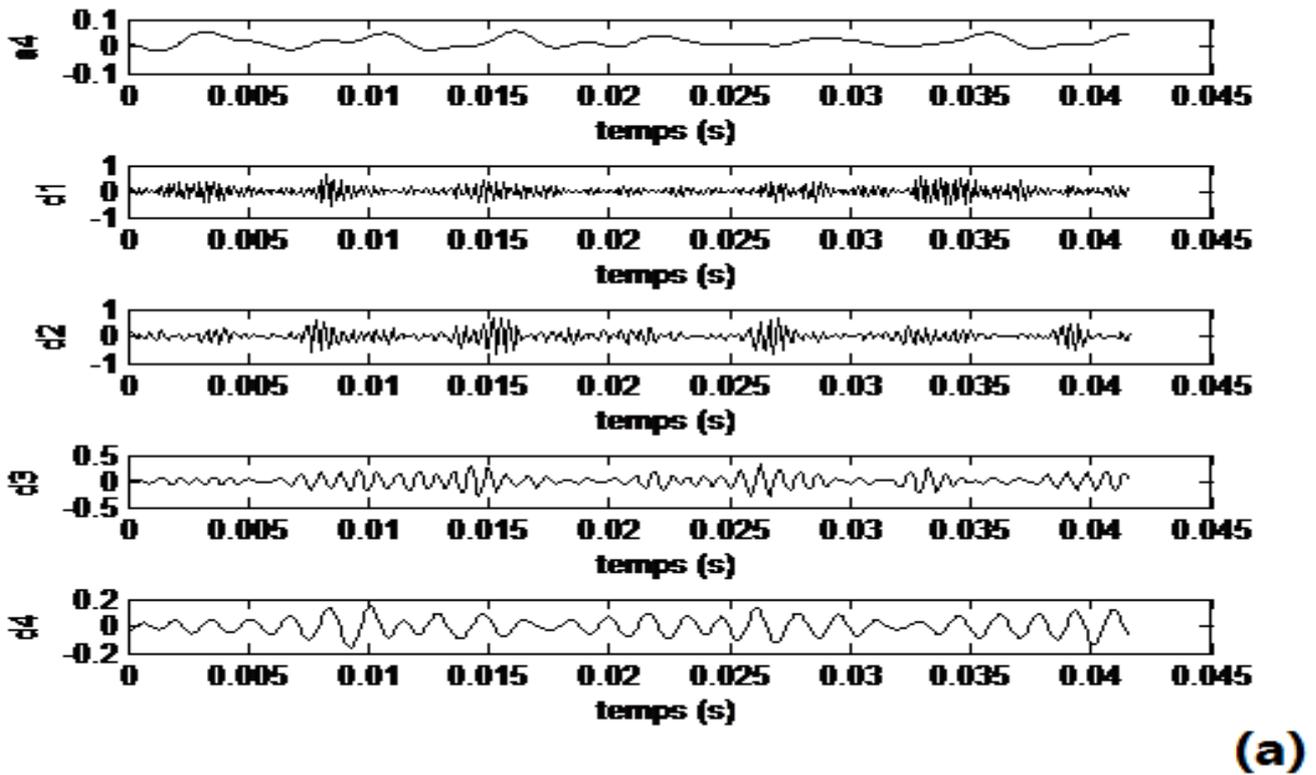


Figure IV.7 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieure mesuré à 1797tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1

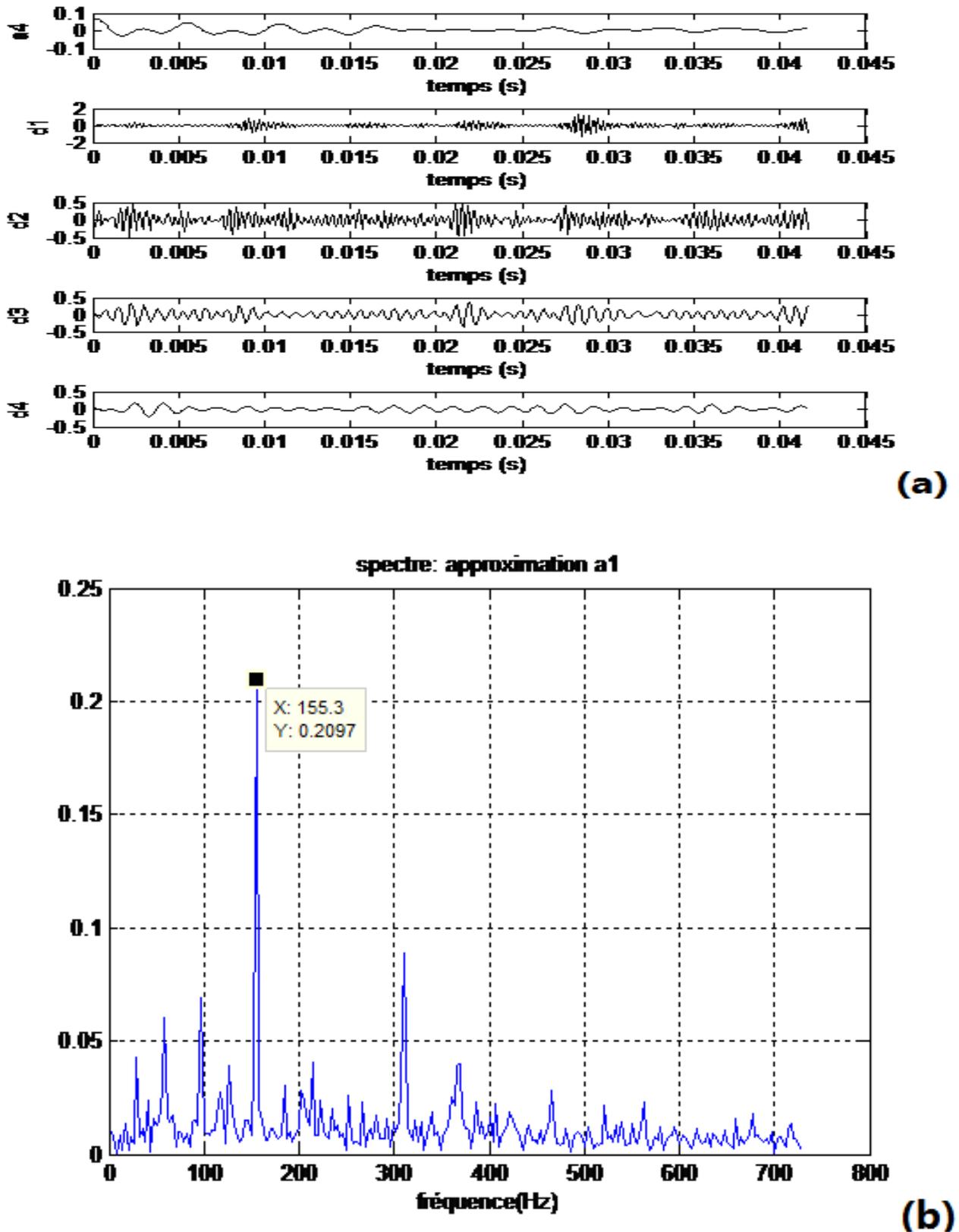


Figure IV.8 : (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1

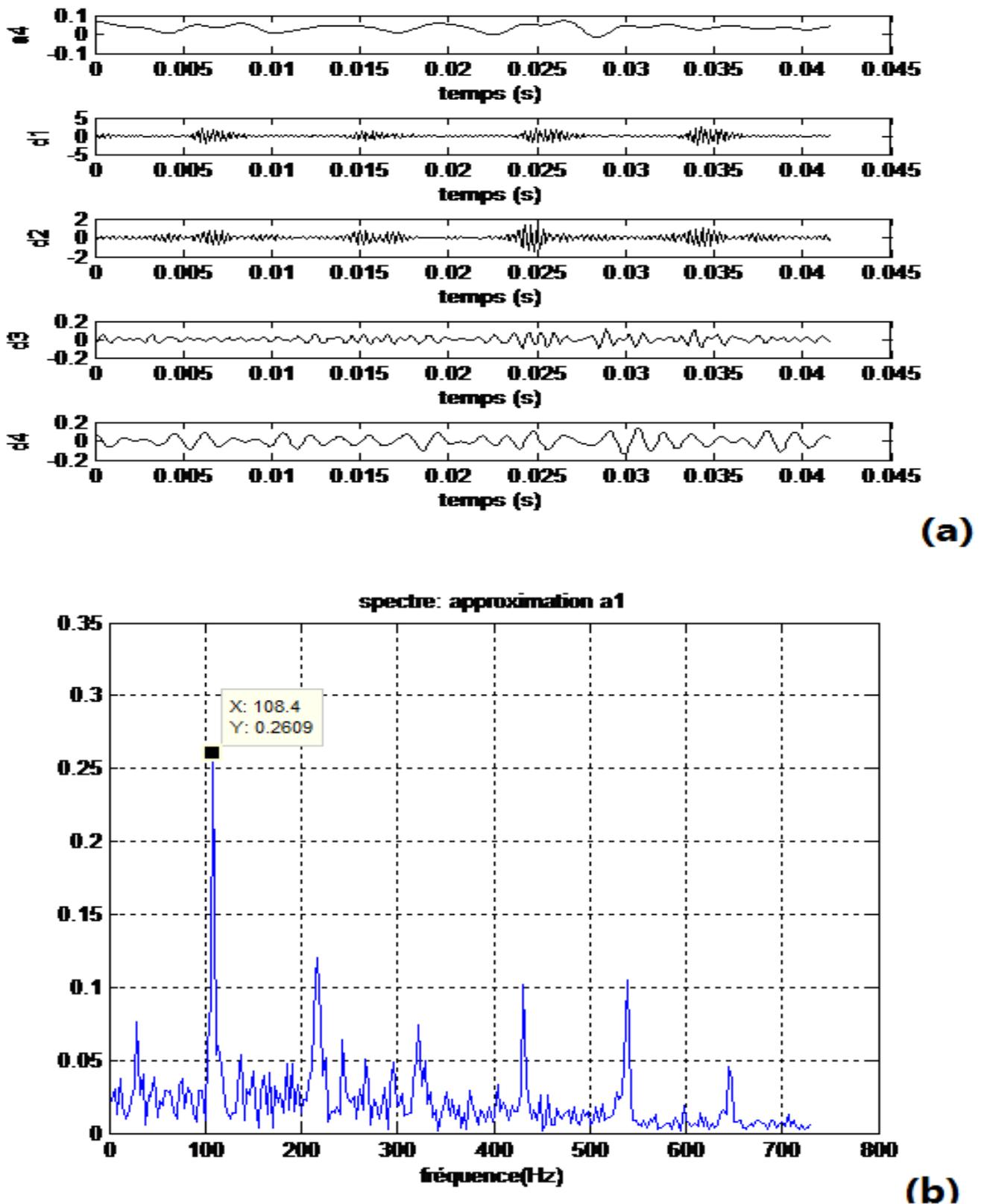


Figure IV.9: (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1

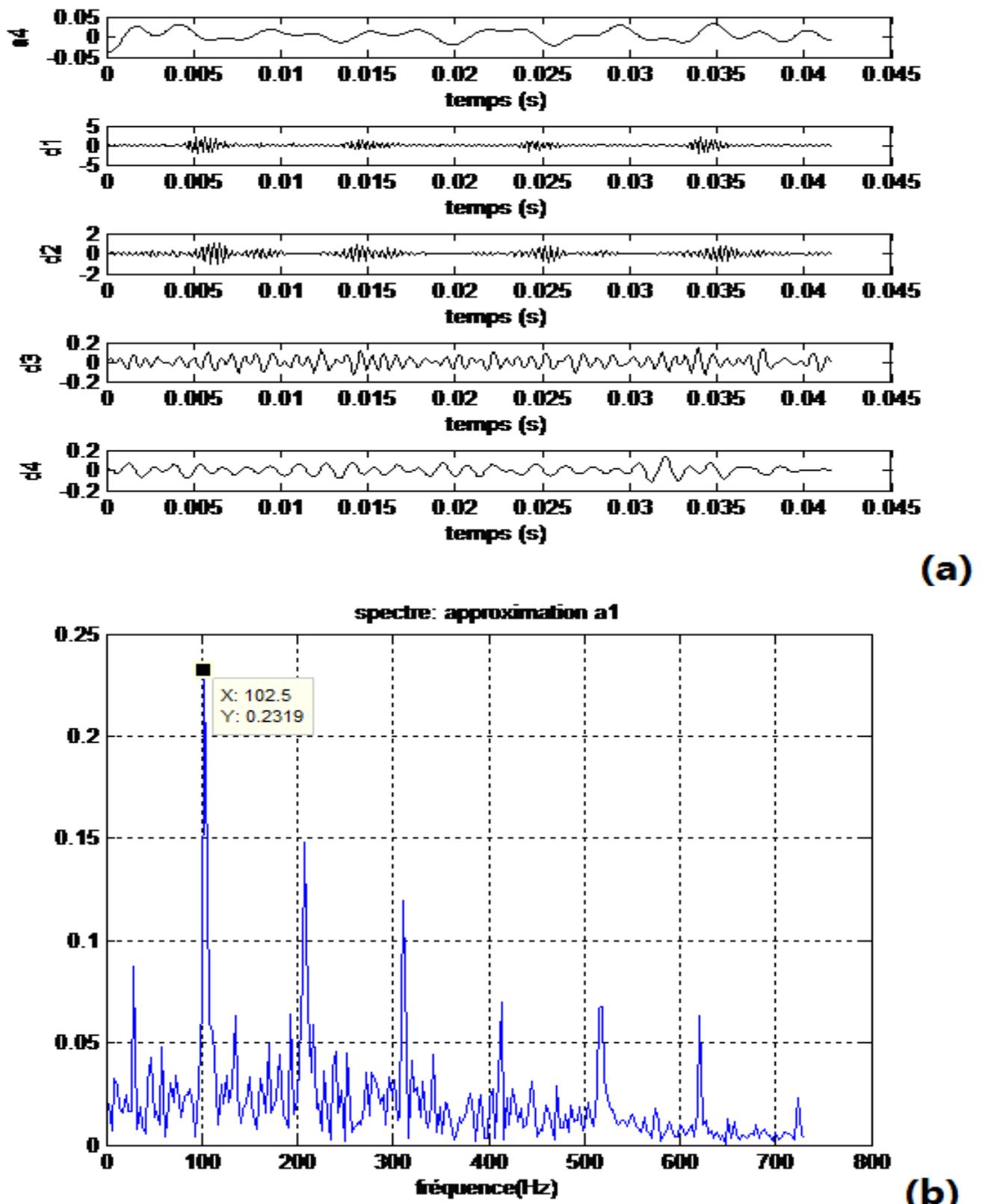


Figure IV.10: (a) L'analyse Multi-résolution d'un défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux (b) Spectre de défaut approximation a1

### IV.5 Application de l'analyse par paquets d'ondelettes pour diagnostiquer les défauts de roulement

Les décompositions des signaux des défauts de roulement et de leurs Spectres obtenus par l'analyse de paquets d'ondelettes en utilisant l'ondelette mère de Daubechie 4 sont illustrées sur les figures IV.11 et IV.12.

A partir de les figures IV.11 et IV.12, on observe les pics de fréquence à 161.1 Hz et 155.3 Hz et leurs multiples. Il est remarqué que les pics de fréquence à 161.1 Hz et 155.3 Hz sont très proches des pics de fréquences calculées d'un défaut de bague intérieure à 162.18 Hz et 156.11 Hz telles que mentionnées dans le tableau IV.1 Ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un défaut de bague intérieure.

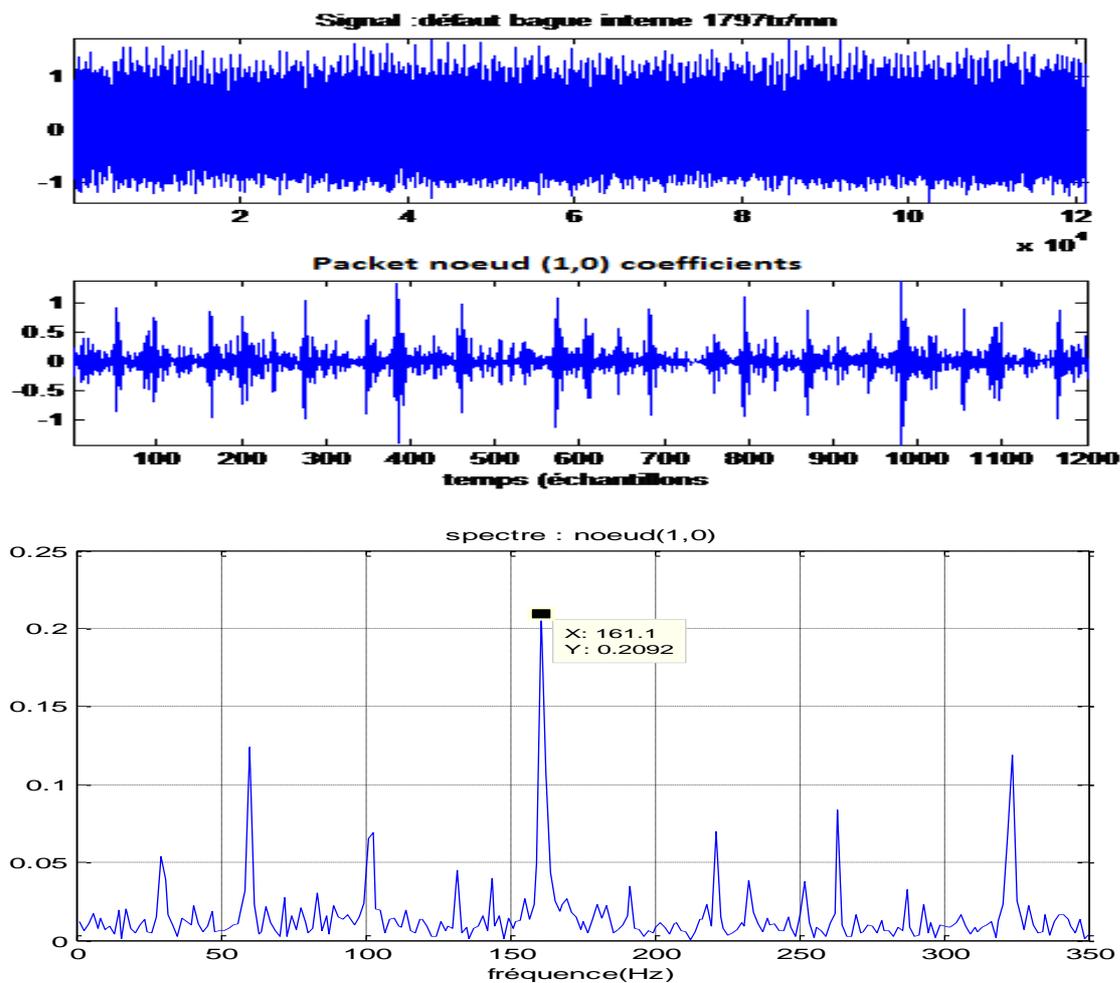
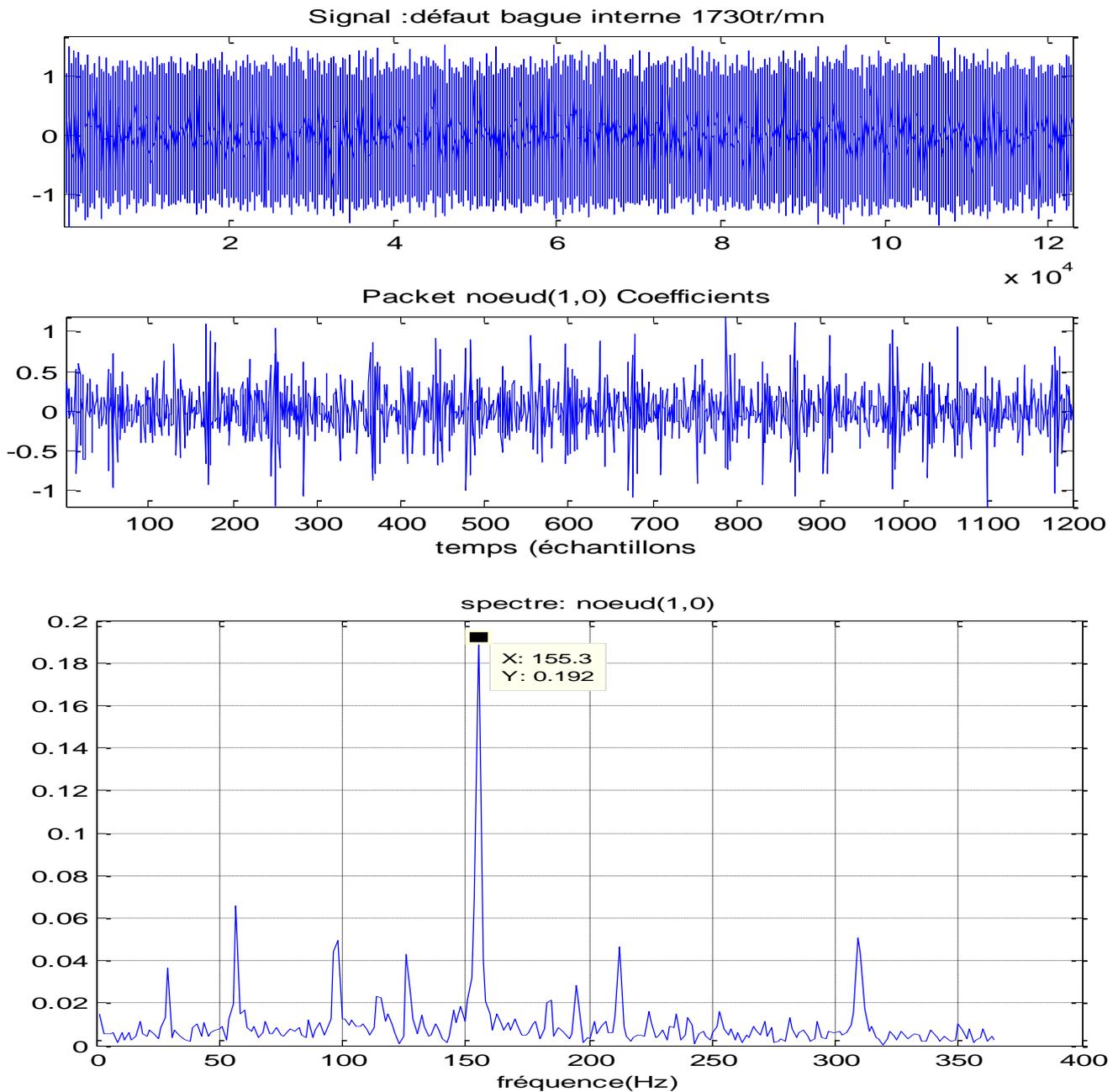
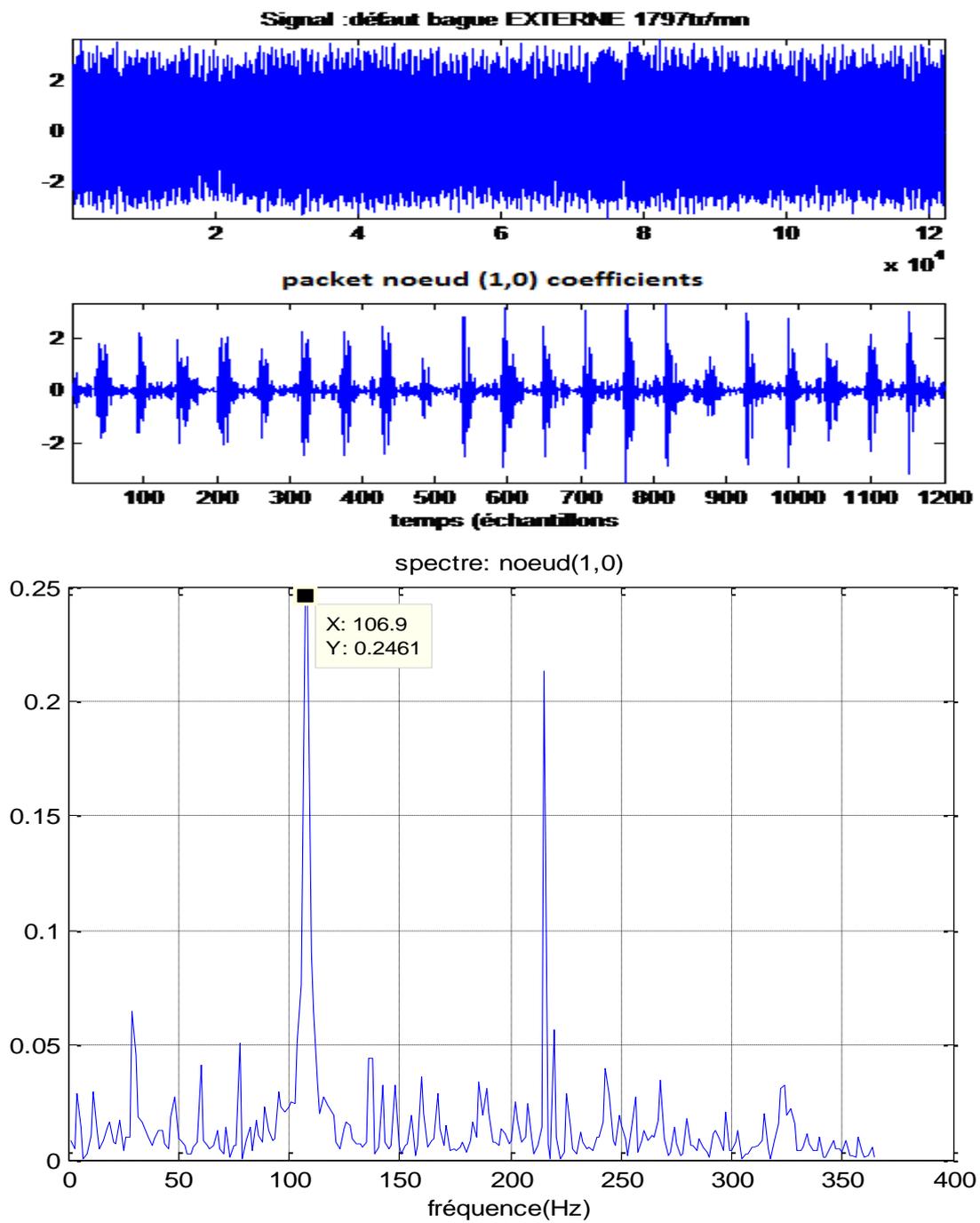


Figure IV.11: L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre



**Figure IV.12:** L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 son spectre

A partir de les figures **IV.13** et **IV.14**, on observe les pics de fréquence à 106.9 Hz et 104 Hz et leurs multiples. Il est remarqué que les pics de fréquence à 106.9 Hz et 104 Hz sont très proches des pics de fréquences calculées d'un défaut de bague extérieure à 107.01 Hz et 103.32 Hz telles que mentionnées dans le tableau **IV.1** Ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un défaut de bague extérieure.



**Figure IV.13:** L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

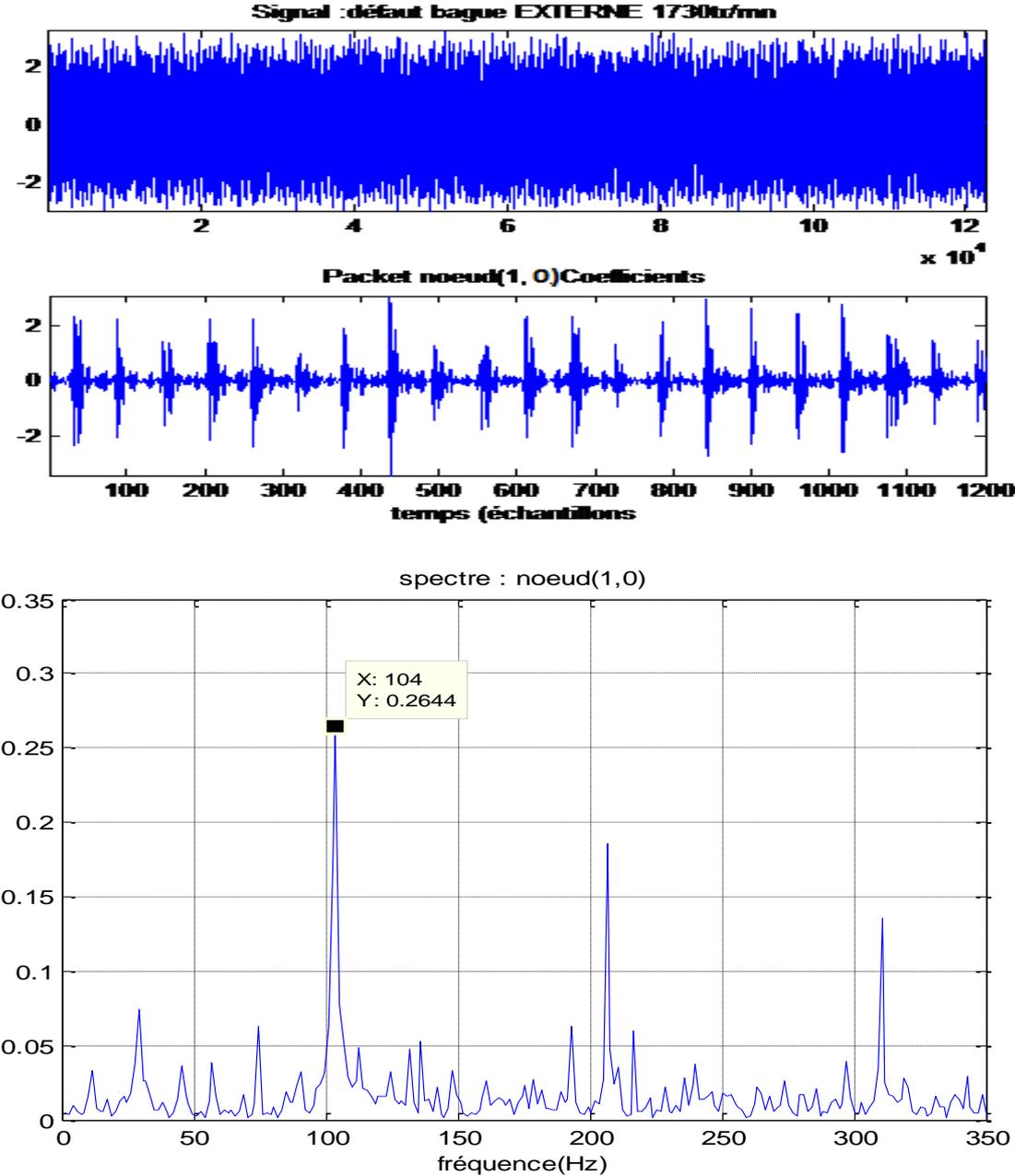
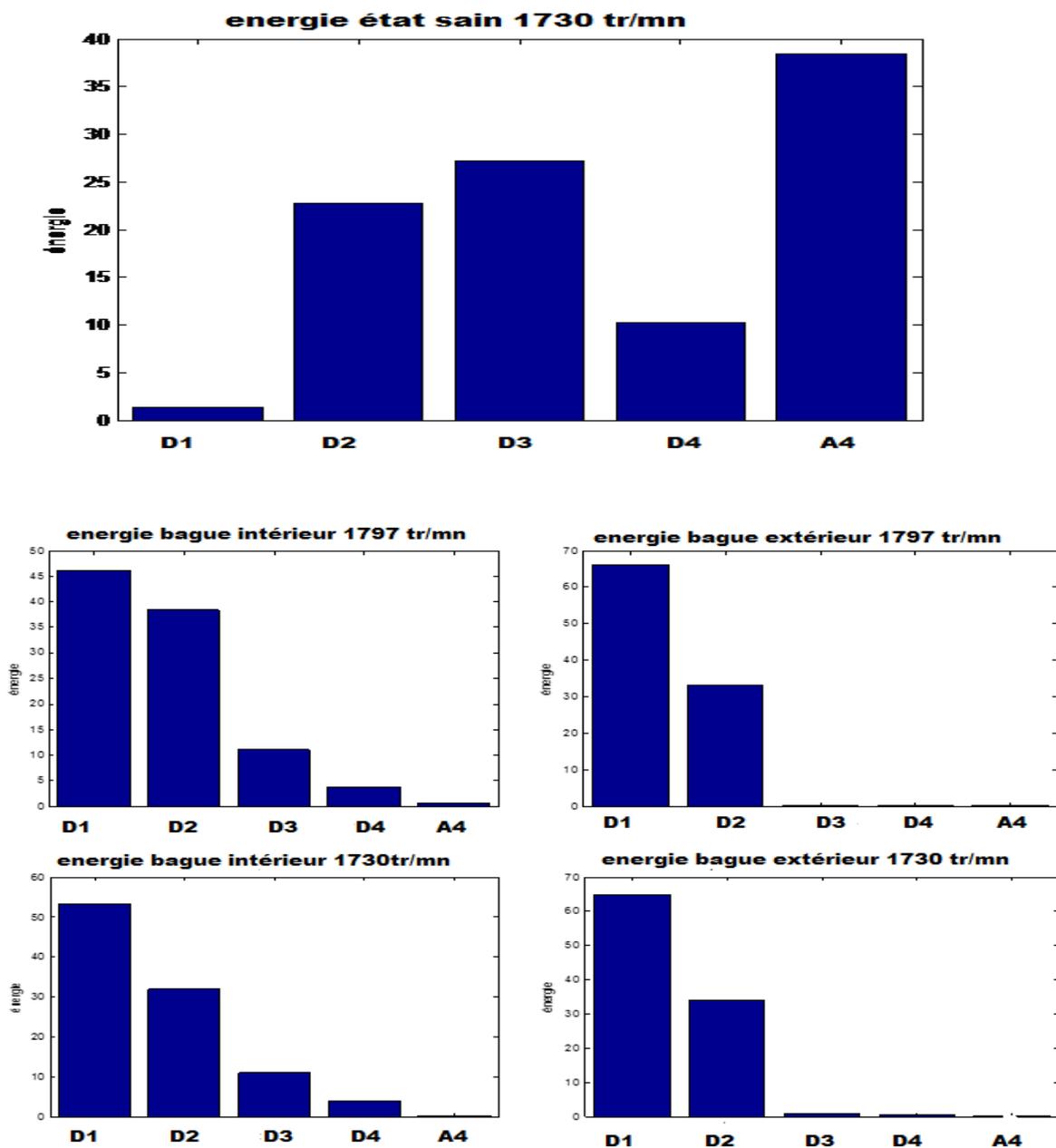


Figure IV.14 : L'analyse par paquets d'ondelettes de défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min par db4 jusqu'à 4 niveaux et son spectre

L'identification des défauts de roulement est également possible en utilisant l'analyse par paquets d'ondelettes. Malheureusement, avec cette méthode, on se trouve confronté à trois problèmes, qui sont le choix approprié de l'ondelette mère, le choix de son niveau de décomposition et de sa bande de fréquence qui contiendrait les informations nécessaires à un diagnostic des défauts.



**Figure IV.15:** Distribution d'énergie : Défaut de bague intérieure mesuré 1797 tr/min  
 Défaut de bague intérieure mesuré 1730 tr/min, Défaut de bague extérieure mesuré 1797 tr/min, Défaut de bague extérieure mesuré 1730 tr/min, état sain

A partir de la Figure IV.15, on peut sélectionner l'approximation ou le détail qui a la plus grande valeur de l'énergie.

Pour le défaut de bague intérieure mesuré à 1797 tr/min on a le détail 1(D1)

Pour le défaut de bague intérieure mesuré à 1730 tr/min on a le détail 1(D1)

Pour le défaut de bague extérieure mesuré à 1797 tr/min on a le détail 1(D1)

Pour le défaut de bague extérieure mesuré à 1730 tr/min on a le détail 1(D1)

Pour l'état sain mesuré à 1730 tr/min on a l'approximation (A4).

### IV.6 Méthode enveloppe spectrale avec filtrage passe bande

On peut obtenir des résultats comparables à la méthode (AMRO) En utilisant un filtrage passe bande du signal vibratoire d'origine suivi de l'enveloppe Spectrale.les résultats sont donnés par les figures IV.16 et IV.17.

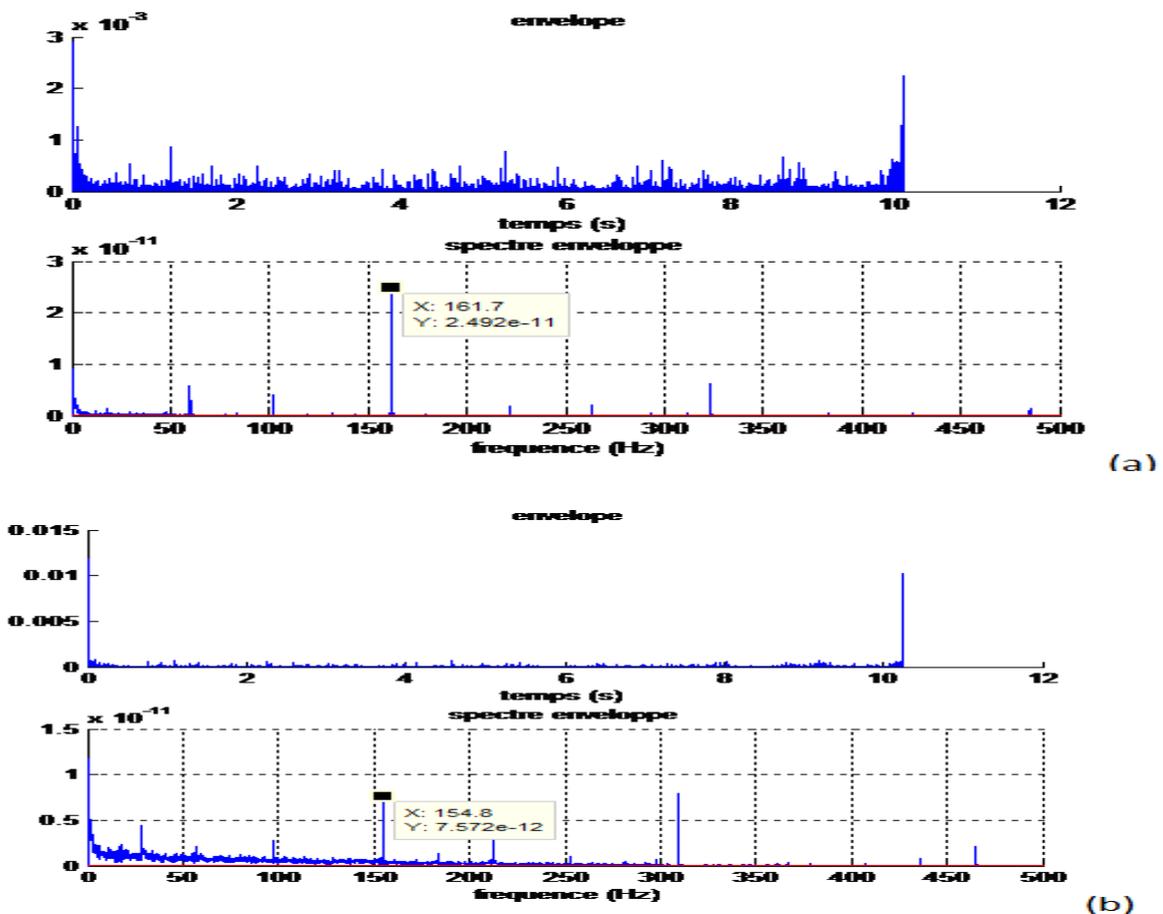


Figure IV.16 : Spectre d'enveloppe de défaut de bague intérieure  
 (a) Mesuré à 1797 tr/min, (b) Mesuré à 1730 tr/min

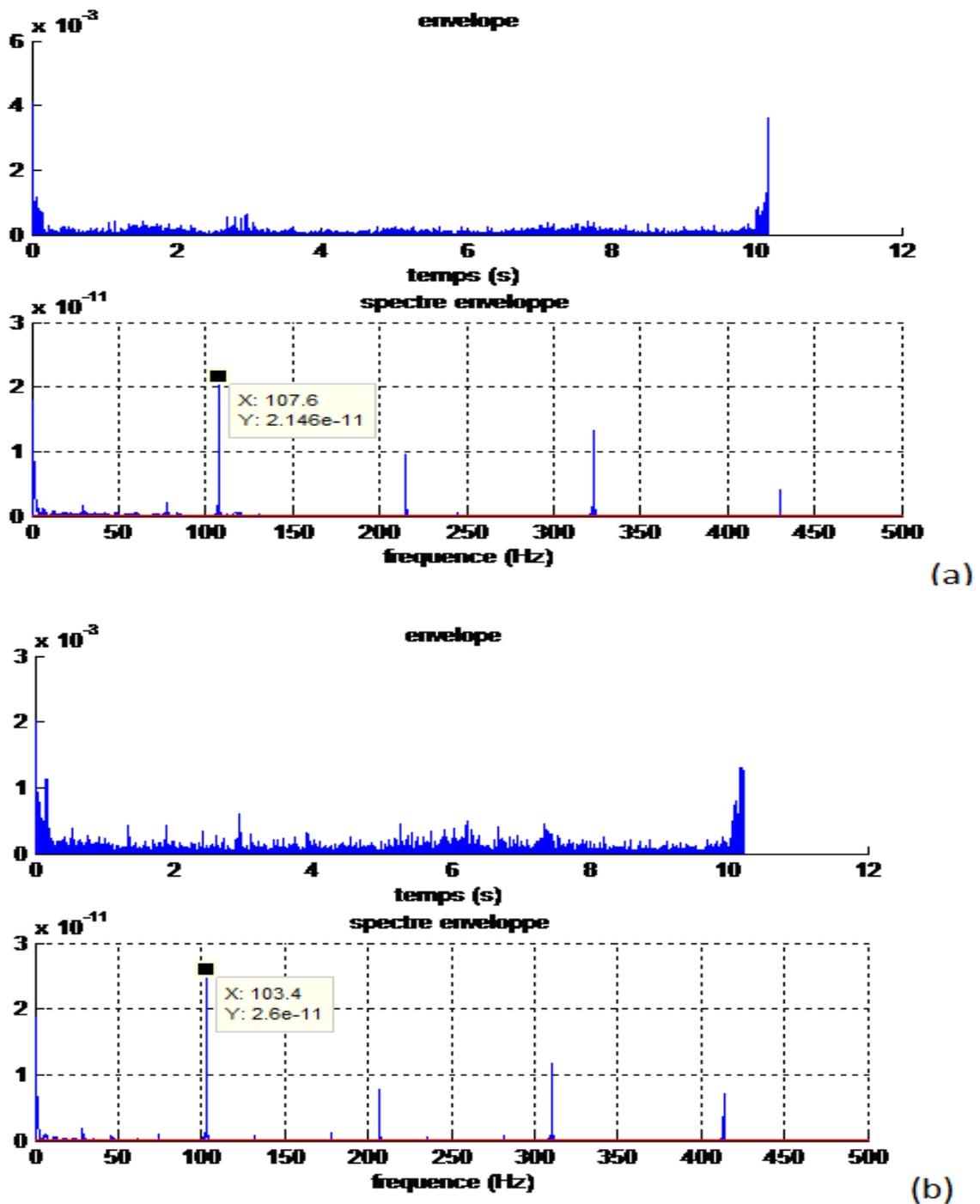


Figure IV.17: Spectre d'enveloppe de défaut de bague extérieure (a) Mesuré 1797 tr/min, (b) Mesuré 1730 tr/min.

On peut voir clairement à partir de les figures **IV.16 (a) et IV.16 (b)** les pics de fréquence à 161.7 Hz et 154.8 Hz et leurs multiples. Les pics de fréquences à 161.7 Hz et 154.8 Hz sont très proches des fréquences calculées du défaut de bague intérieure à 162,18 Hz et 156.11 Hz telles que mentionnées dans le tableau **IV.1** Cela indique clairement la présence du défaut.

Quant à les figures **IV.17(a) et IV.17 (b)**, elle présente clairement les pics de fréquence à 107.6 Hz et 103.4 Hz et leurs multiples. Les pics de fréquences à 107.6 Hz et 103.4 Hz sont très proches des fréquences calculées et qui correspondent au défaut de la bague extérieure à 107.01 Hz et 103,32 Hz telles que mentionnées dans le tableau IV.1. Cela indique clairement la présence du défaut.

L'identification et la surveillance des défauts de roulement en utilisant la méthode proposée sont très faciles. En outre, le résultat expérimental montre qu'avec la méthode proposée on peut, efficacement, choisir le niveau de décomposition approprié et sa bande de fréquence qui contient les informations nécessaires pour le diagnostic des défauts ce qui n'est pas possible avec méthode traditionnelle d'ondelettes. Néanmoins ce procédé nécessite beaucoup de temps de calcul pour sa mise en œuvre.

## **IV.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons essayé de détecter les fréquences caractéristiques des défauts de roulement relatifs à la bague intérieure et la bague extérieure pour deux charges différentes, le fonctionnement à vide (0HP) caractérisé par la vitesse de rotation 1797 tr/mn et le fonctionnement en charge (3HP) avec la vitesse 1730 tr/mn. On a utilisé tout d'abord, l'analyse fréquentielle de Fourier à base de (FFT), qui a permis de détecter les fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague intérieure d'une manière satisfaisante, ce qui n'est pas le cas pour ceux de la bague extérieure, où les fréquences sont presque invisibles à cause de l'existence du bruit et des résonances.

Pour s'affranchir du problème de bruit, on a utilisé un schéma de détection basé sur l'analyse multi résolution de l'ondelette (AMRO) utilisant la transformée en ondelettes discrète (DWT) ou paquets d'ondelette (DWPT), jouant le rôle du filtre de bruit et de résonance, suivi d'une détection d'enveloppe et son spectre. L'analyse (AMRO), a révélé une nette amélioration dans la détection des deux types de défaut avec des amplitudes remarquables. L'analyse (AMRO) est un outil supérieur dans la détection des défauts de roulement à base de signaux vibratoires,

cependant elle a l'inconvénient dans le choix de l'ondelette mère analysante la plus adaptée au signal de défaut et son niveau de décomposition. Enfin, l'analyse énergétique de l'ondelette montre que la concentration d'énergie dans le cas de défaut est dans les détails (D1 et D2 ) et pour le cas sain dans l'approximation(A4).

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la maintenance préventive des machines tournantes et plus particulièrement la détection des défauts de roulements par analyse vibratoire. L'objectif de notre étude est d'opter pour une méthode d'analyse du signal qui permet de s'affranchir des limitations de l'analyse spectrale de Fourier et son incapacité de détecter les fréquences de défauts en présence du bruit et fréquences indésirables qui peuvent entraver sa détection.

Une méthode est proposée, basée sur l'analyse multi résolution d'ondelettes (AMRO) qui permet de filtrer les composantes du bruit et de choisir la bande de fréquence appropriée pour la détection des fréquences de défaut suivi d'une analyse spectrale d'enveloppe.

Pour aborder l'étude, nous avons, tout d'abord, présenté dans le premier chapitre, les différents défauts du moteur asynchrones, ainsi que les défauts de roulement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes approches de la maintenance industrielle.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les notions de base du traitement du signal qui nous permettent de bien comprendre le diagnostic à travers l'analyse vibratoire.

Dans le quatrième chapitre, nous avons appliqué tout d'abord l'analyse de Fourier, ensuite le schéma de l'analyse multirésolution basé sur la transformée discrète d'ondelettes (DWT) et la transformée discrète paquet d'ondelettes (DWPT), sur des signaux de la base de données (WCRU). On a choisi pour cela les défauts de bague interne et externe du roulement.

Les résultats obtenus ont montré la supériorité du schéma (AMRO) à détecter les composantes du défaut de la bague interne et externe du roulement vis-à-vis de la méthode de Fourier (FFT). La méthode (AMRO) et ses avantages, possède des inconvénients surtout dans le choix de l'ondelette analysante et le niveau de décomposition appropriés.

Finalement des résultats comparables à ceux de (AMRO) peuvent être obtenus par l'analyse d'enveloppe et un filtrage passe bande.

# Références Bibliographiques

- [1] : Kacimi Zakaria, Kobbi Salheddine , "Diagnostic de la machine Asynchrone en Présence de Défaut Statorique par la technique des ondelettes" Mémoire Master en Électrotechnique Spécialité Machines électrique, Université Saad de Blida, 2015/2016.
- [2] : Kasmi fateh, Messikh Mehamed Satta Ahmed, " Détection des défauts rotoriques et statoriques dans le moteur asynchrone à cage en utilisant les Techniques d'analyse FFT et DWT", Mémoire de fin D'études Spécialité Electromécanique, université De M'Sila, 2011/2012
- [3] : Gaëtan DIDIER, " Modélisation et diagnostic de la machine Asynchrone en présence de d'effaillances" Thèse de doctorat en Génie électrique, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2004.
- [4] : Jean-Claude Trigeassou, Electrical Machines Diagnosis , First published 2011 in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, British Library Cataloguing-in-Publication Data A CIP record for this book is available from the British Library ISBN 978-1-84821-263-3, ISTE Ltd 2011, (www.wiley.com).
- [5] : Boudjtat walid , Himoura Abdelkader, " étude et simulation d'une machine Asynchrone alimente par un onduleur De tension a commandé mli" Mémoire de Master en Électrotechnique, Université badji mokhtar-annaba, juin 2017.
- [6] : Gilles Desbiens, " Machines à induction bobinées sur dents "thèse de doctorat, Spécialité Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2003.
- [7] : Motor de rotor bobinado y anillos rozantes ,web site  
<[https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E09/es\\_IEA\\_E09\\_Contenidos/website\\_142\\_motor\\_de\\_rotor\\_bobinado\\_y\\_anillos\\_rozantes.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/E/E09/es_IEA_E09_Contenidos/website_142_motor_de_rotor_bobinado_y_anillos_rozantes.html) > (date d'accées au site 25/03/2022)
- [8]: Allal Abderrahim, " Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones" Mémoire Magister en Electrotechnique, Universite ferhat abbas – setif, 05/05/2010.
- [9] : Bourdim Samia, " Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université ferhat abbas-setif, 04 / 07 / 2011.
- [10] : *Castelli, Marcel, Andrade, Marcos* . Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción, Facultad de Ingeniería , Universidad de Montevideo.

## Références Bibliographiques

---

(Web site: <https://core.ac.uk/download/pdf/335340812.pdf>)

[11] : Ledy Guerra\*, Francis Barboza, Rubén Terán, Irahis Rodríguez y Eva Monagas" Spectral analysis of electromagnetic torque in fault detection of eccentricity of three-phase induction motors by means of canonical discriminant", Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Vol. 25, No 2, Agosto, 2018 213 – 220.

[12] : Kun Tian, Tao Zhang, Yibo Ai and Weidong Zhang," Induction Motors Dynamic Eccentricity Fault Diagnosis Based on the Combined Use of WPD and EMD-Simulation Study, National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, Published: 20 September 2018.

[13]: A.Polat, Y. D. Ertuğrul , and L.T. Ergene" Static, Dynamic and Mixed Eccentricity of Induction Motor", Department of Electrical Engineering, Istanbul. 2015 IEEE.

[14] : Fallas del motor de inducción, web site: <https://www.slideshare.net/caerno/fallas-del-motor-de-induccin> (date d'accées au site 25/03/2022).

[15] : Diego alejandro lópez cataldo," Diagnóstico de fallas de rodamientos de equipos de rotación utilizando redes neuronales artificiales", facultad de ingeniería escuela de ingeniería informática, Enero de 2016.

[16] : *Chapitre 3, Analyse vibratoire des machines tournantes*, DTCT.A.05.09/SFO/001/Rev.C–12/07/06

[17] : SADKI Nour elhouda," *Simulation des défauts statorique d'un moteur a asynchrone*", Mémoire masteracademique, Spécialité : Machines électriques et Électronique de puissance, universite kasdi merbah ouargla,08/06/2015.

[18] : Kerfali Samir,"*Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone*", thèse doctorat en électromécanique, université badji mokhtar annaba, **2015/2016**.

[19] : GUEHAIZ Mohamed Al amine," Diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette", Mémoire de master en Electrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018 – 2019.

[20] : Omar SID," Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par les réseaux de neurones", mémoire magister En Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Hourari Boumediene,12/07/2011.

[21]: Del Pozo Gallego, Carlos," Aplicación de técnicas de Machine Learning con regularización al diagnóstico de fallos en motores de inducción", Grado en Ingeniería Eléctrica, universidad de valladolid, Mayo 2016.

[22]: Abdelkebir adel,"Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en

## Références Bibliographiques

---

ondelettes, mmoire master en electrotechnique, universite mohamed boudiaf - m'sila, 2016 / 2017.

[23] : Bekiri walid, SID Bouchra, " Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales multi-echelles", Mémoire Master, Spécialité : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES, Université Kasdi Merbah – Oaurla, 2018/2019.

[24] : Ieferson Ruiz Salazar, david alexander orejuela caiced, " implementación de la transformada wavelet sobre un sistema embebido para el pre-procesamiento de señales unidimensionales no estacionarias", universidad de san buenaventura cali, facultad de ingeniería, programa de ingeniería electrónica, 2016

[25] : Castanedo, Lavín, Jesús, " *Aplicación de la transformada wavelet en la caracterización de señales eléctricas*" trabajo fin de grado, grado en ingeniería en teconología industrial, Universidad del País Vasco, 2017-2018

[26]: Samir Kouro R. y Rodrigo Musalem M, " Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet " disponible sur le site : <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Wavelet.pdf> .

[27] : Derbouz Bachir, Reghioa Ali, "Diagnostic des Défauts d'une machine synchrone à aimants permanents par la Technique des Ondelettes", Master en Electromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019

[28] : Mohamed Amine Moussa, " Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone en Temps Réel", Master en Électrotechnique, Université des Frères Mentouri - Constantine 1, 2018.

[29]: Laura Victoria Medina Sánchez, "Análisis de técnicas Wavelet para el desarrollo de compresores de audio" Magíster en Matemáticas Aplicadas, UNIVERSIDAD EAFIT, 2017.

[30] : Pedro valentín de mata castrejón " Determinación de los patrones de frecuencia para detección de fallas en motores de inducción jaula de ardilla en el rotor", tesis maestro en ciencias en ingeniería eléctrica, instituto politécnico nacional, noviembre de 2015.

[31]: Edward José Yamunaqué Chunga , "aplicación de la transformada wavelet a señal de baja potencia en entorno de matlab" Universida de piura facultad de ingeniería, Junio 2016.

[32]: BOUKAMOUM Ibtissam , MALAOUI Sarra, "Diagnostic des défauts d'engrenages à base de la transformée en paquet d'ondelette", Mémoire de Master en Télécommunications, Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira ,2018-2019

[33]: AOUABDI Salim, " diagnostic & detection des cassures des barres du rotor d'une machine asynchrone a cage par l'analyse en ondelettes", memoire magister en electrotechnique, université badji mokhtar-annaba, année 2009.

[34]: Sergio Paredes Serano, "Aplicación de Técnicas de Procesamiento para el Mantenimiento Basado en la Condición", Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid ,2018-2019

## Références Bibliographiques

---

- [35]: Hakima CHERIF ,"Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes" thèse magister, Commande et motorisation des véhicules électrique, Université Mohamed Khider – Biskra,2014
- [36]: GRARADJI KAMAL, SADOON AREZK," Filtrage de l'ECG par seuillage de coefficients d'ondelettes", Département D'électronique, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2008/2009
- [37] : Djaballah Saïd," Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements",Mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras.
- [38] : Neouidjem el yazid ,Kerrouche Abderahmane," Diagnostic et classification des défauts de roulement dans une éolienne, en utilisant l'analyse vibratoire et les réseaux de neurones artificiels",Mémoire MASTER, Spécialité Maintenance Industrielle, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2020/2021.
- [39] : Manés Fernández Cabanas, Manuel García Melero ,Gonzalo Alonso Orcajo ,José Manuel Cano Rodríguez ,Juan Solares Sariago," Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas", ISBN: 84-267-1166-9,spain.
- [40] : Leila NACIB," Diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire" thèse doctorat en electromecanique , université badji mokhtar- annaba, 2015.
- [41] : Mohammed bouchareb,aimane chouihat," Maintenance des machines tournantes par diagnostic vibratoire", mémoire master en Electromécanique, université Ghardia 2019/2020
- [42]: Belhour samira," contribution à l'optimisation de la maintenance predictive par l'utilisation du logiciel omnitrend (systeme on line) cas : cimenterie hamma bouziane", mémoire magister en génie mécanique, universite de mentouri de constantine, 2008.
- [43]: Addoun Abdelkrim," Optimisation de la maintenance par la méthode AMDEC appliquée au ventilateur de l'entreprise ALZINC", MEMOIRE En Génie Mécanique, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2015.
- [44] : Nabti Mohamed Tahar," Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques", Mémoire magister en Mécanique, universite ferhat abbas – setif, 2011.
- [45]: Taleb mounia," Surveillance, détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant L'analyse fonctionnelle", THESE DOCTEUR EN SCIENCES, Université du 20 Août 1955 Skikda, 2018.

## Références Bibliographiques

---

[46] : David Aarón Millai Molina, "disenoo d'un plan de mantenimiento predictivo utilizando el análisis de vibraciones para máquinas rotativas en planta cracking de enap refineries aconcagua", especialidad ME|CÁNICA INDUSTRIAL, universidad técnica federico santa maría ,2017

[47] : Rida hamza, boulahia mohammed," Diagnostic des défauts mécaniques dans les machines tournantes par la méthode de la décomposition en mode empirique(EMD)",mémoire master en Génie Mécanique, Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019

[48]: web site : <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones> (08/04/2022)

[49] : Mokhtari Yaakoub," Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire" mémoire de master en Electrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.

[50]: web site: <https://www.maxicours.com/se/cours/instrumentation-1> (08/04/2022)

[51] : Haouam youcef," Influence de Débit sur le comportement vibratoire de la pompe d'expédition 50-P004 B" mémoire master en génie mécanique en génie mécanique, Université Blida 1,2016.

[52]: PRUFTECHNIK\_ES, Guía de selección de puntos de medición de vibraciones, Publicado el abril 24, 2013 .

<https://pruftechnik.wordpress.com/2013/04/24/guia-de-seleccion-de-puntos-de-medicion-de-vibraciones/> (10/04/2022).

[53]: Saoudi Aboubaker, Decha Mounir," LA TRANSFORMEE EN ONDELETTES ET L'ANALYSE EN ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DANS LES ROULEMENTS A BILLE", MEMOIRE MASTER EN Automatique et systèmes, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA,2017/2018.