

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي  
والبحوث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure  
et de la Recherche Scientifique



Université d'Oran 2  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle  
Département de Maintenance en Instrumentation

## MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master  
**Spécialité : Génie Industriel**

Thème

***Application des méthodes des Ondelettes et Root-Music  
pour l'analyse et localisation des défauts  
dans un moteur asynchrone***

Présenté et soutenu publiquement par :  
**M. SOTRA MOHAMED**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Belkacem Belkacem	MAA	Université d'Oran 2	Président
Nekrouf Djilali	MAA	Université d'Oran 2	Encadreur
Adda Neggaz Samir	MAA	Université d'Oran 2	Examineur

Juin 2015

## ***Remerciements***

*Je commence par remercier dieu tout puissant pour m'avoir facilité la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements et toute ma reconnaissance à mon encadreur M. Nekrouf, Je le remercie grandement que ce soit pour ces qualités scientifiques ou humaines, faisant toujours preuve de réflexion et de patience.*

*Je remercie également les membres du Jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepté d'examiner et de juger mon travail.*

*Je voudrais aussi remercier mes amis et mes collègues de l'université d'Oran pour leur gentillesse, leur bonne humeur et pour leur soutiens constant.*

*Je remercie également mes amis de Sétif pour leurs encouragements et leur vitalité vitaminée.*

*Et enfin un grand merci à ma famille pour la quelle j'exprime ma plus profonde et sincère gratitude.*

# *D*édicaces

*A* mon très cher père,  
qui m'ont toujours soutenus et veillés sur ma bonne éducation.

*A* toute ma famille ;  
*A* tous mes frères et mes amis ;  
*A* tous les enseignants et les éducateurs  
qui ont contribué à ma formation durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour ;

*A* notre cher ami FADLI ABD ELKARIM  
qui est toujours au fond de nos cœurs dans l'attente de sa liberté le plus tôt possible  
« nchallah »

...je dédie ce travail.

**SOTRA MOHAMED**

---

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

### **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau II.1 : Famille d'ondelettes .....</b>	<b>22</b>
<b>Tableau II. 2 : la précision en fonction du facteur d'échelle .....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau IV.1 : les valeurs calculées théoriquement des fréquences d'encoches .....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau IV.2 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de la bague externe .....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau IV.3 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de la bague interne .....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau IV.4 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de cage de bille .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau IV.5 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de bille .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau VI.1 : Caractéristiques du moteur asynchrone.....</b>	<b>Annexe A</b>
<b>Tableau VI.2 : Paramètre de génératrice.....</b>	<b>Annexe B</b>
<b>Tableau VI.3 : Paramètre de Roulement.....</b>	<b>Annexe C</b>

---

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.....	(5)
<b>Figure I.2</b> : Stator.....	(6)
<b>Figure I.3</b> : Rotor à cage d'écureuil.....	(7)
<b>Figure I.4</b> : Paliers.....	(8)
<b>Figure I.5</b> : Sources des défauts de la machine asynchrone à cage.....	(9)
<b>Figure I.6</b> : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes.....	(10)
<b>Figure I.7</b> : Types de défauts dans les roulements à billes.....	(11)
<b>Figure I.8</b> : Dimension d'un roulement à billes.....	(12)
<b>Figure I.9</b> : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer.....	(14)
<b>Figure I.10</b> : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	(14)
<b>Figure I.11</b> : Rotor à cage d'écureuil.....	(16)
<b>Figure I.12</b> : Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit.....	(16)
<b>Figure II.1</b> : Projection de l'ondelette sur le signal.....	(21)
<b>Figure II.2</b> : Forme de l'ondelette de Haar.....	(22)
<b>Figure II.3</b> : Forme des ondelettes daubechies .....	(23)
<b>Figure II.4</b> : Forme de l'ondelette Symlet .....	(23)
<b>Figure II.5</b> : Ondelette de Morlet .....	(24)
<b>Figure II.6</b> : Ondelette chapeau mexicain.....	(24)
<b>Figure II.7</b> : Ondelette de Meyer .....	(25)
<b>Figure II.8</b> : Résolution temps-fréquence de la TFCT.....	(26)
<b>Figure II.9</b> : Résolution temps-fréquence de TO.....	(26)
<b>Figure II.10</b> : Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer 'TOC' .....	(27)
<b>Figure III.3</b> : L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC.....	(36)
<b>Figure IV.1</b> : Banc d'essai destiné au diagnostic des défauts.....	(39)
<b>Figure IV. 2:</b> Les différents défauts provoqués sur les roulements.....	(40)

---

*Liste des figures*

---

**Figure IV.3:** représentation des Ca et Cd cas de moteur sain..... (41)

**Figure IV.4:** représentation des Ca et Cd cas de défaut de la bague externe..... (42)

**Figure IV.5:** représentation des Ca et Cd cas de défaut de bille..... (42)

**Figure IV.6:** représentation des Ca et Cd cas de défaut de la bague interne.....(43)

**Figure IV.7:** représentation des Ca et Cd cas de défaut de cage de bille.....(43)

**Figure IV.8:** spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de bague ext3mm..... (46)

**Figure IV.9:** spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bague  
ext3mm..... (46)

**Figure IV.10:** spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de bague ext .....(47)

**Figure IV.11:** spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bague ext . (48)

**Figure IV.12:** spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de cage de bille.....(48)

**Figure IV.13:** spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bille..... (49)

**Figure IV.14:** spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de cage de bille..... (50)

**Figure IV.15:** spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bille.....(50)

**Figure VI.1 :** Caractéristiques du signal d'harmonique d'encoche..... (Annexe D)

---

## *Notation*

---

### Liste des notations

<b>A</b>	la matrice de puissance des harmoniques
<b>A<sub>r</sub></b>	paramètre de localisation fréquentielle.
<b>a<sub>0</sub></b>	paramètre de dilatation
<b>B</b>	paramètre de localisation temporelle.
<b>b<sub>0</sub></b>	paramètre de translation.
<b>C</b>	constante de normalisation de reconstruction
<b>D<sub>b</sub></b>	Diamètre de la bille
<b>D<sub>bext</sub></b>	Diamètre de la bague extérieure
<b>D<sub>bint</sub></b>	Diamètre de la bague intérieure
<b>D<sub>c</sub></b>	Diamètre de la cage
<b>E</b>	L'espérance mathématique.
<b>F<sub>e</sub></b>	fréquence d'encoche
<b>f<sub>i</sub></b>	la fréquence de la sinusoïde complexe <b>i</b>
<b>f<sub>r</sub></b>	la fréquence de rotation rotorique.
<b>f<sub>s</sub></b>	la fréquence d'alimentation
<b>f<sub>sh</sub></b>	La fréquence d'échantillonnage
<b>g</b>	le glissement
<b>H</b>	l'opérateur de transposition –conjugaison
<b>I<sub>i</sub></b>	La matrice d'identité.
<b>I<sub>j</sub></b>	amplitude de la sinusoïde complexe

---

## *Notation*

---

---

<b>K</b>	entier positif
<b>L</b>	Nombre de sinusoides ou des sources
<b>N</b>	Nombre d'échantillonnage
<b>Nb</b>	nombre de barres rotoriques
<b>Ne</b>	nombre d'échantillons
<b>n</b>	le nombre de billes
<b>p</b>	nombre de pôles
<b>W(n)</b>	Le bruit
<b><math>\psi(t)</math></b>	Fonction d'ondelette

---

---

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des notations

<b>Introduction générale.....</b>	<b>I</b>
<b>I. Chapitre I : Présentation des différents défauts du MAS à cage d'écureuil .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 Stator .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.2 Rotor.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3 Paliers .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3 Défaillances de la machine asynchrone .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1 Défaillances d'ordre mécanique .....</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1.1 Défaillances des roulements .....</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1.2 Défaillances des flasques .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.1.3 Défaillances de l'arbre.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.1.4 Défauts d'excentricité .....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2 Défaillances d'ordre électriques .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.2.1 Défaillances des circuits électriques statoriques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques rotoriques .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.Méthodes de diagnostic .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.1 Méthodes externes.....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2 Méthodes internes .....</b>	<b>17</b>
<b>I.5 Conclusion .....</b>	<b>18</b>

---

# SOMMAIRE

---

<b>Chapitre II : Transformée en ondelettes .....</b>	<b>19</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2 Transformée en ondelettes.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.1 Historique des ondelettes.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.2 Définition d'une ondelette.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.3 La famille d'ondelettes .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.3.1 Ondelette de Haar .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.3.2 Ondelettes de Daubechies .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.3.3 Les symlets de Daubechies .....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.3.4 Ondelette de Morlet .....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.3.5 Ondelette chapeau mexicain .....</b>	<b>24</b>
<b>II.2.3.6 Ondelettes de Meyer .....</b>	<b>24</b>
<b>II.2.4 Ondelettes et résolution temps-échelle.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2.5 La transformée en ondelette.....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.5.1 La transformée en ondelette continue (TOC).....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.5.2 La transformée en ondelette discrète (TOD).....</b>	<b>28</b>
<b>II.2.6 conclusion .....</b>	<b>29</b>
<b>Chapitre III : Etude de la méthode d'extraction des signatures ROOT- MUSIC</b>	<b>30</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2 Méthodes d'analyse spectrale à haute résolution (HR) .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2.1 L'algorithme « MUSIC » .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.2 La méthode ROOT-MUSIC .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.3 Estimation de puissances d'harmoniques.....</b>	<b>35</b>
<b>III.3 L'organigramme de l'algorithme ROOT - MUSIC .....</b>	<b>36</b>
<b>III.4 Conclusion .....</b>	<b>36</b>

---

## SOMMAIRE

---

<b>Chapitre IV : Simulation .....</b>	<b>37</b>
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.2 Résultat expérimentaux du diagnostic des défauts de roulement .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.3.Simulation .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.3.1. Application de l'ondelette stationnaire (swt) pour calculer les Coefficients         d'approximation et de détail.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.3.2. Analyse des coefficients d'ondelette par l'algorithme Root-music .....</b>	<b>45</b>
<b>IV .4.Conclusion .....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>

---



*La place prestigieuse qu'occupe les machines électrique dans l'industrie moderne, nécessite entre autres une mise en œuvre des programmes de surveillance et de maintenances d'autant préventives que correctives afin d'assurer la continuité de leur bon fonctionnement. En effet, ces opérations permettent, en partie, d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.*

*Un système de surveillance permet de fournir des informations sur le fonctionnement de l'unité aux opérateurs qui l'exploitent. Il doit être capable de provoquer dans les cas graves un arrêt de l'unité ou de permettre au système de production de continuer de fonctionner en mode dégradé en cas de problème ne nécessitant pas un arrêt immédiat, tout cela en évitant bien sûr des erreurs de type fausses alarmes qui provoquent des arrêts inutiles des installations. Les tâches de détection et de localisation des défaillances trouvent ainsi tout naturellement leur place dans un tel système de surveillance. Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système.*

*Ainsi, deux principales familles de procédures peuvent être utilisées dans le domaine de diagnostic des machines électriques à savoir les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori et sans connaissance a priori.*

*Les méthodes de diagnostic sans connaissance a priori sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés qui sont (courants, tensions, vitesse, couples, vibrations, température). Ces signaux peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.*

*Les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observations. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Le principal avantage de cette méthode réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc un filtrage de l'information.*

*L'objectif principal de ce projet est d'exploiter deux méthodes, méthode des ondelettes et méthode Root-MUSIC pour l'analyse des défaillances des machines électriques où l'accent est mis particulièrement pour la détection de quelques défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage.*

*Afin d'aboutir à cet objectif et de bien cerner ses particularités, le travail présenté dans ce manuscrit est divisé en 04 chapitres et réparti comme suit :*

*Le premier chapitre est consacré à la présentation des différents défauts de la machine asynchrone. Il comprend deux parties : la première fait état de la construction de la machine asynchrone. La deuxième est une synthèse des différents défauts de la machine asynchrone.*

*En deuxième chapitre, on présente la méthode des ondelettes.*

*Le troisième chapitre s'étale sur la méthode d'extraction des fréquences ; 'l'algorithme de ROOT-MUSIC'.*

*Le quatrième chapitre est sur la simulation et ses résultats. Le mémoire s'achève par une conclusion générale où on propose nos perspectives.*

# ***CHAPITRE I***

## ***Présentation des différents défauts de la machine Asynchrone***

## **I.1 Introduction :**

La croissante 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 nucléaire 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. [1].

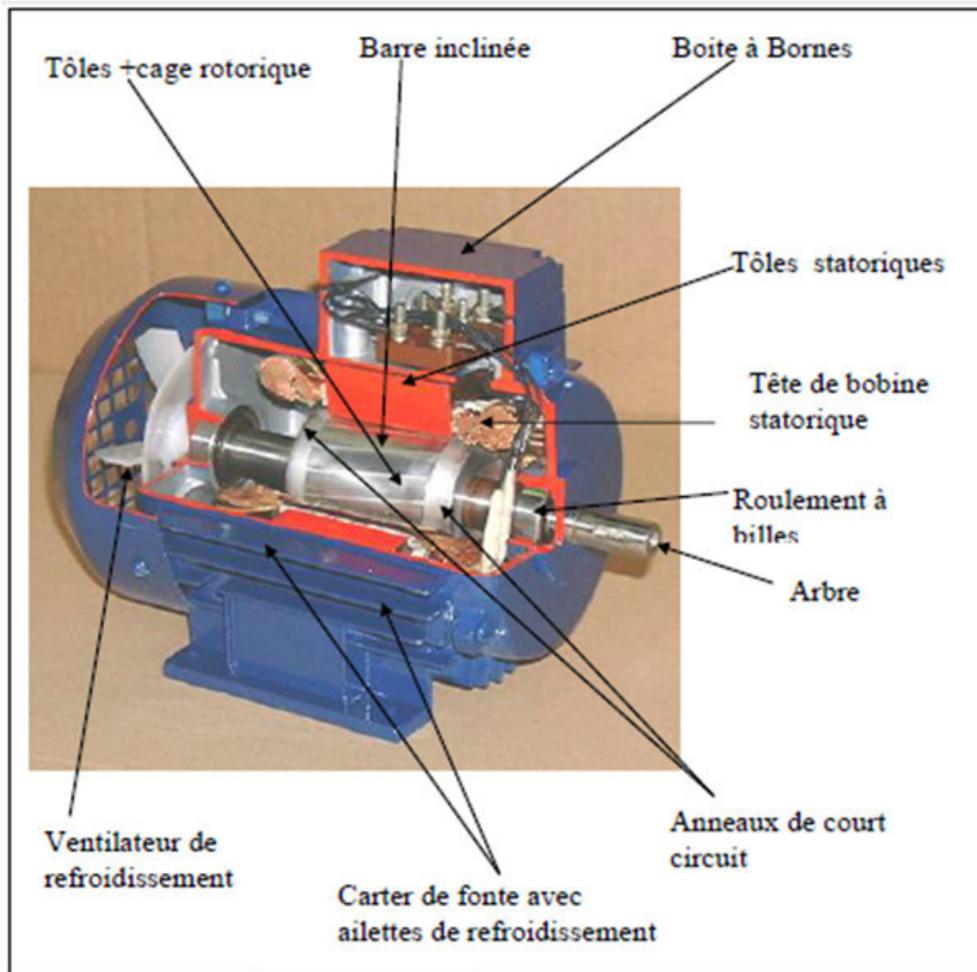
Dans ce premier chapitre, on va présenter :

- Les éléments de constitution d'une machine asynchrone
- Un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine asynchrone à cage d'écureuil et leurs causes.
- Les différentes méthodes de diagnostic d'une machine asynchrone.

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

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet 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 :

- 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 : éléments de construction de la MAS à cage d'écureuil**

### **I.2.1 Stator :**

Le stator de la machine asynchrone schématisée dans la Figure.I.2 est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants 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 manières imbriquées, ondulées ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement.

Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge. [1].

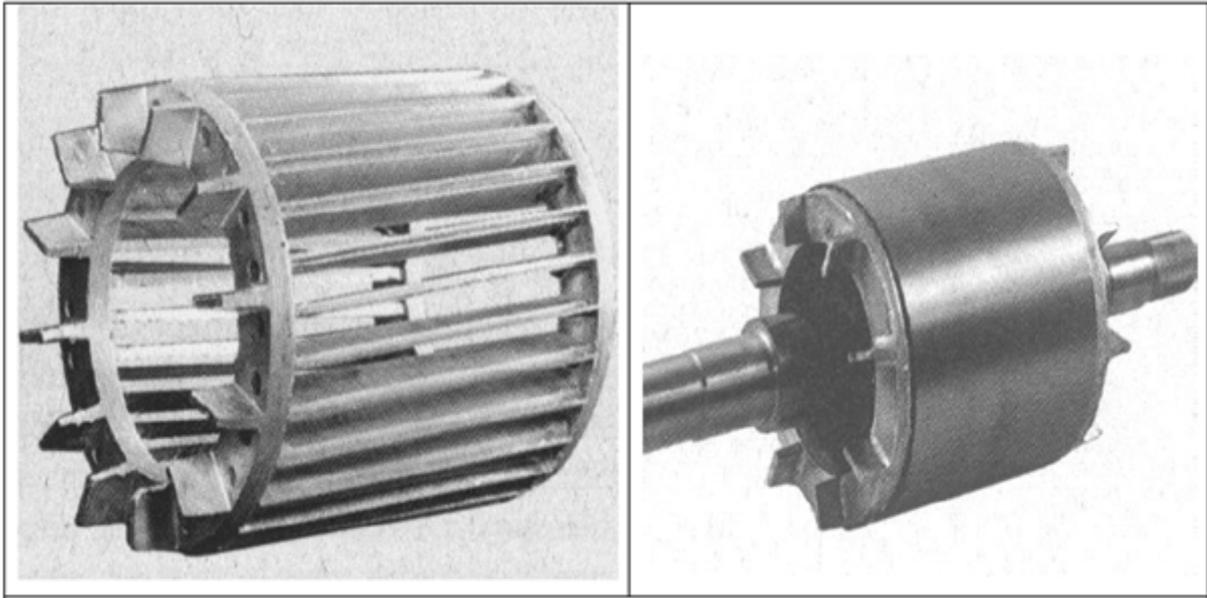


**Figure. I.2: Stator**

### **I.2.2 Rotor:**

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium [1].



**Figure. I.3 : Rotor à cage d'écureuil**

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait.

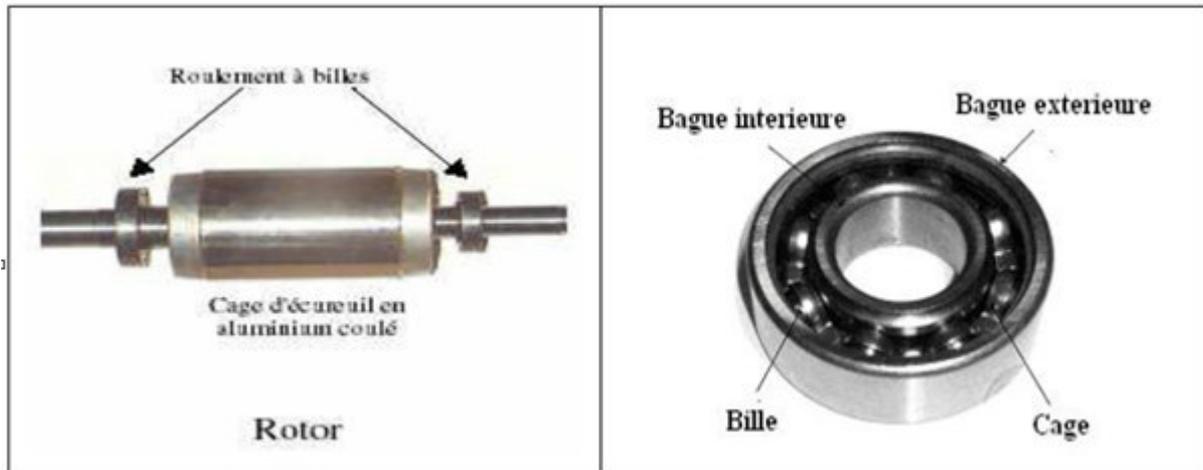
Nous donnons une photographie (Figure. I.3) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil.

Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoches au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone.

L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la figure I.1 [1].

### **I.2.3 Paliers :**

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. 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.1 [1].



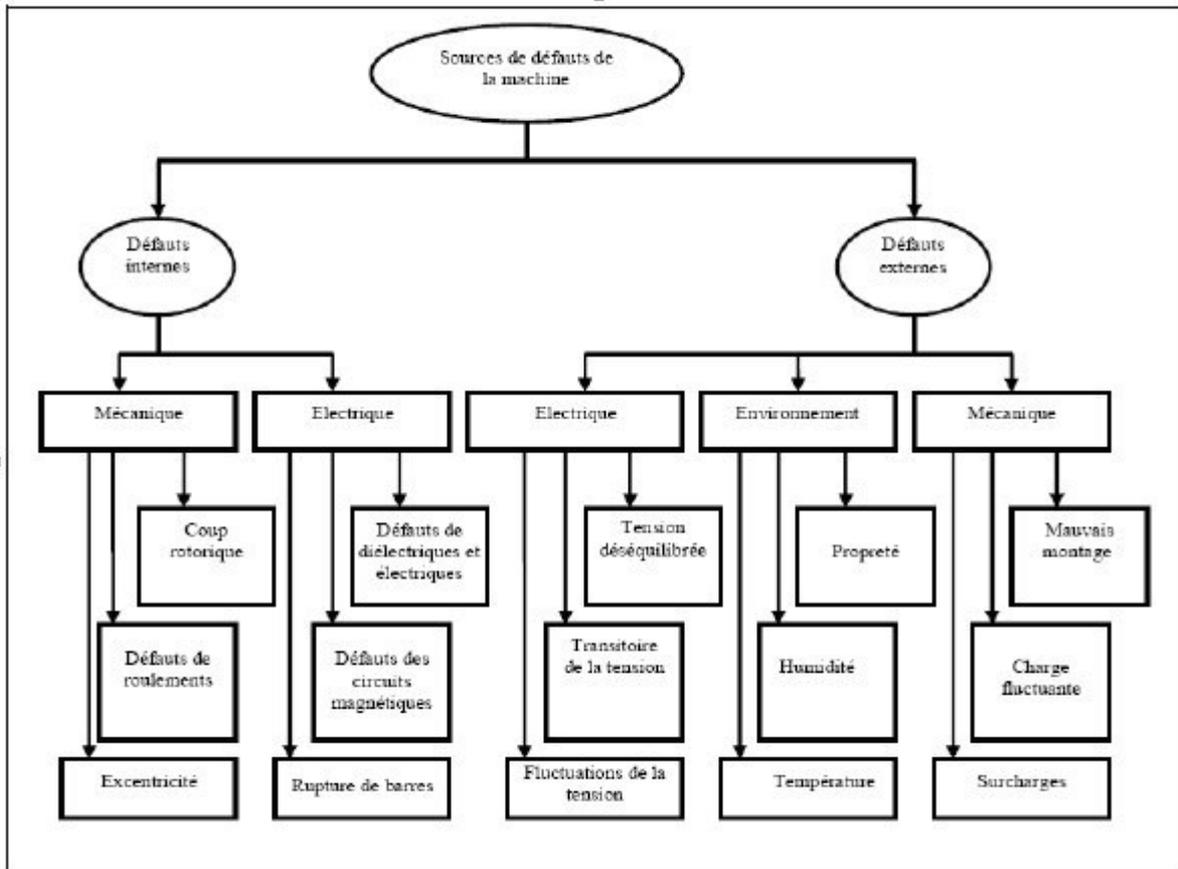
**Figure. I.4 : Paliers**

### **I.3 Défaillances de la machine asynchrone :**

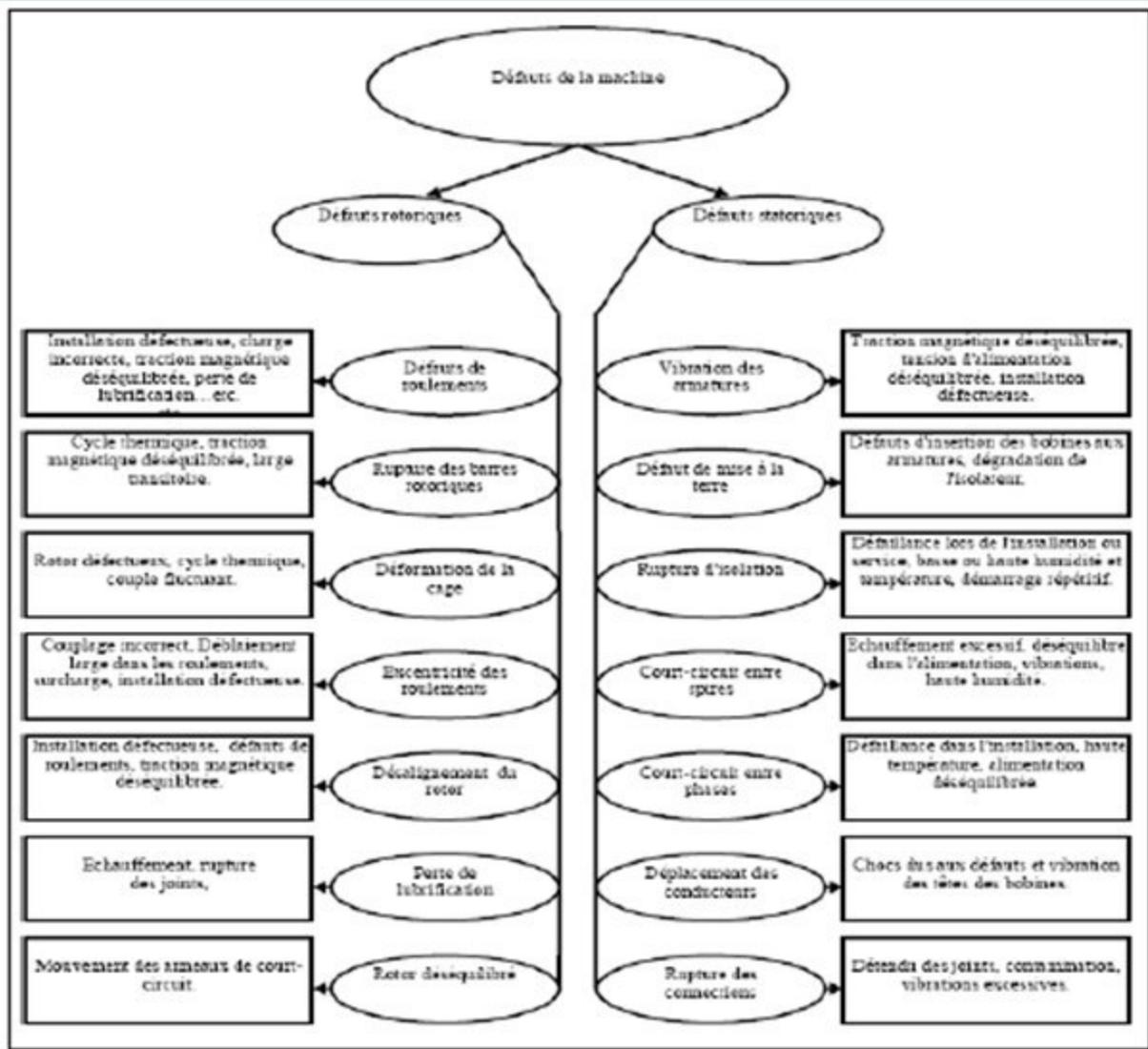
La machine asynchrone est considérée comme robuste et également défaillante dans le cas de son emploi de longue durée et dans des conditions dures. Il est important que les mesures soient prises pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre dans le mode de défauts. Il est donc nécessaire de faire un contrôle continu, en ligne ou hors ligne, de l'état de la machine. Les raisons derrière les défauts dans les machines électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'installation, l'environnement de fonctionnement, la nature de la charge et le programme de la maintenance. [2].

Le moteur asynchrone, comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums. Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut. Les défauts du moteur asynchrone peuvent être classés par catégorie dans deux types : mécaniques et électriques.

Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure I.5. Les défauts internes peuvent être classifiés selon leurs origines c'est à dire électriques et mécaniques. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts du rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La Figure I.6 présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotor et stator [2].



**Figure I.5 : Source des défauts de la MAS**



**Figure I.6 : Principaux défauts de la MAS et leurs causes**

D'après les deux organigrammes ci-dessus, on peut classer les défauts majeurs qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage d'écureuil en deux catégories.

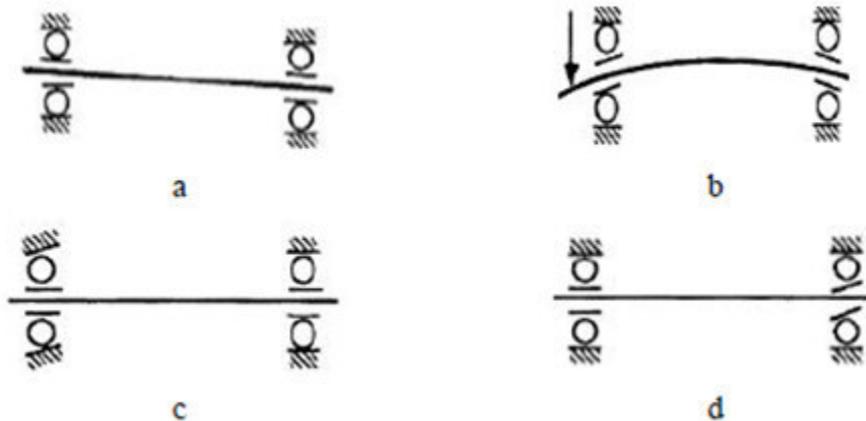
### **I.3.1 Défaillances d'ordre mécanique :**

Les défaillances d'ordre mécanique sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumérera par la suite certains de ces défauts. [2].

#### **I.3.1.1 Défaillances des roulements :**

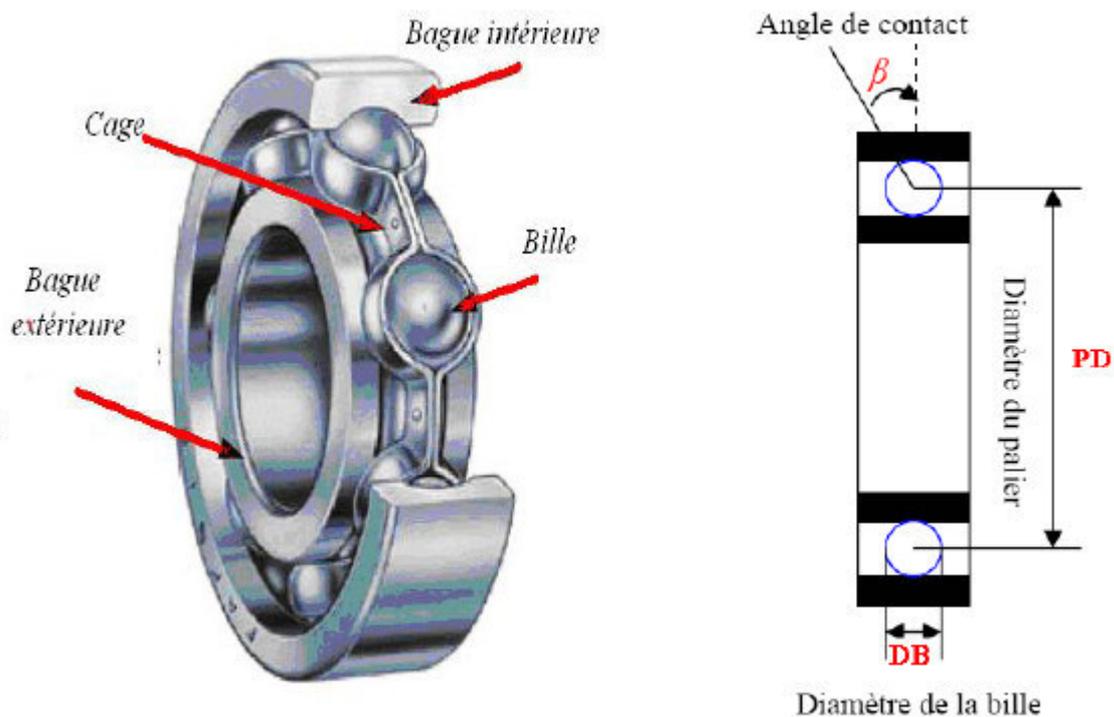
Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de

matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations dans la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. L'huile de graissage, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances [2].



**Figure I.7 : Types des défauts dans les roulements à bille**

On présente dans la figure I.8 le dimensionnement d'un roulement à billes.



**Figure I.8 : Dimensions d'un roulement à billes**

La relation entre les vibrations des roulements et les spectres du courant statorique peut être déterminée en rappelant que n'importe quelle 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. Le déplacement mécanique résultant des roulements endommagés fait changer la hauteur de fuite de la machine de telle sorte qu'elle peut être décrite par une combinaison des excentricités tournantes démenageant dans les deux directions.

$$f_{roul} = \| f_s \pm m f_i \| \quad .1$$

Où  $m=1,2,\dots$ ,  $f_i$  est l'une des fréquences de vibration caractéristiques correspondant aux dimensions du roulement et  $f_s$  est la fréquence du secteur.

$$f_i = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 \pm \frac{DB}{PD} \cos \beta \right] \quad I.2$$

Où  $n$  est le nombre de billes,  $f_r$  est la fréquence de rotation rotorique.

Les études statiques montrent que presque 40 à 50% de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont d'origine mécanique. D'une part, Les défauts de roulement pourraient se manifester souvent et produisent des défauts qui apparaissent sous la forme d'une asymétrie du rotor, et sont classés dans la catégorie des défauts d'excentricité.

D'autre part, la naissance d'un défaut au niveau des roulements dépend aussi de la partie défectueuse, soit dans la partie intérieure ou dans la partie extérieure. Les relations représentent les fréquences générées par les différents défauts des roulements à billes, sont exprimées par :

Pour un défaut dans la course externe du roulement :

$$f_1 = (N/2) f_r [1 - DB \cos(\beta)/PD] \quad I.3$$

Pour un défaut dans la course interne du roulement :

$$f_1 = (N/2) f_r [1 + DB \cos(\beta)/PD] \quad I.4$$

Pour un défaut dans les billes :

$$f_1 = \left( \frac{DB f_r}{PD} \right) [1 - [DB \cos(\beta)/PD]^2] \quad I.5$$

Pour un défaut dans la course :

$$f_1 = \left( \frac{f_r}{2} \right) f_r [1 - DB \sin(\beta)/PD] \quad I.6$$

### **I.3.1.2 Défaillances des flasques :**

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. [1].

### **I.3.1.3 Défaillances de l'arbre :**

L'arbre de la machine peut laisser apparaître 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 immédiat 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 microfissures et conduire à une destruction complète de la machine.

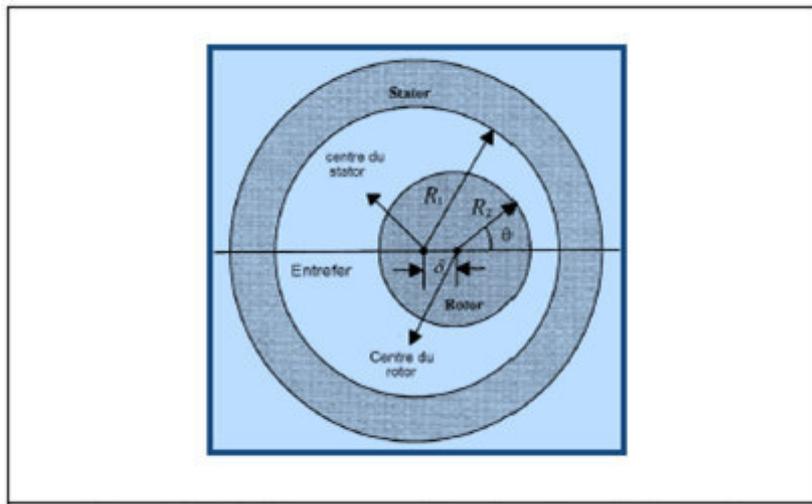
Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [a].

### **I.3.1.4 Défauts d'excentricité :**

Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes créées par le stator avec la bande du frottement du rotor provoquent des dommages du stator et du rotor.

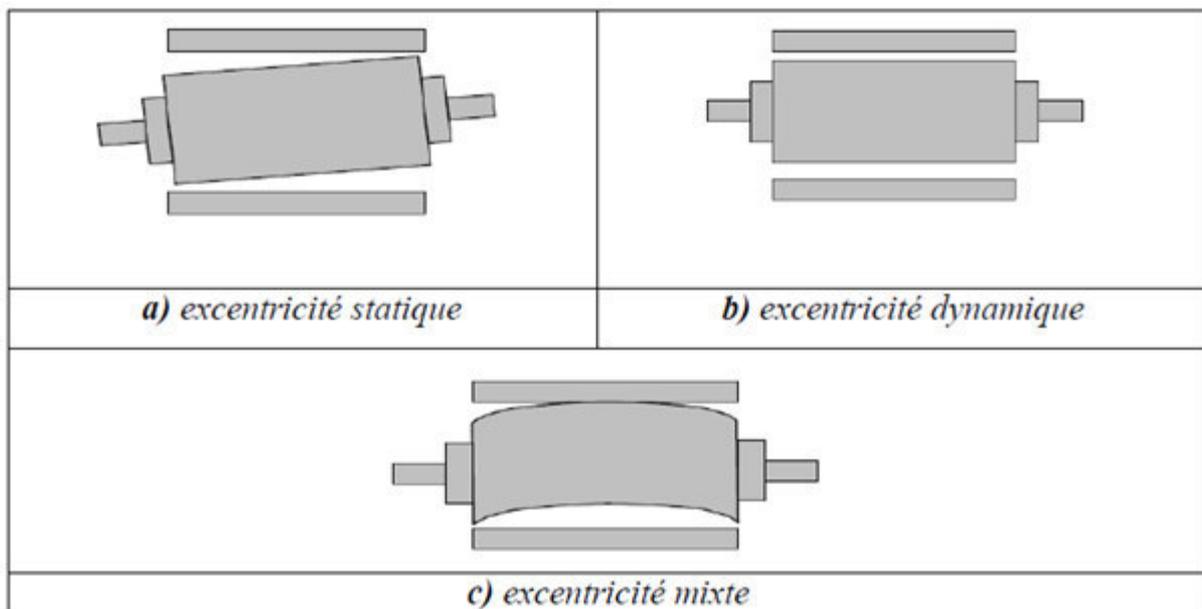
La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (**Figures I.9 et I.10**) à savoir :

- L'excentricité statique : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe du rotor.
- L'excentricité dynamique : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- L'excentricité mixte : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.



**Figure I.9 : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer**

Tel que :  $R_1$  : Rayon interne statorique,  $R_2$  : Rayon externe rotorique ,  $\delta$ : distance entre le centre de rotation et le centre du stator



**Figure I.10 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte**

### **I.3.2 Défaillances d'ordre électriques :**

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, causer l'arrêt définitif de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances sont classées en deux catégories bien distinctes. On peut citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques[1].

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

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On trouve également les court-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent, une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit.

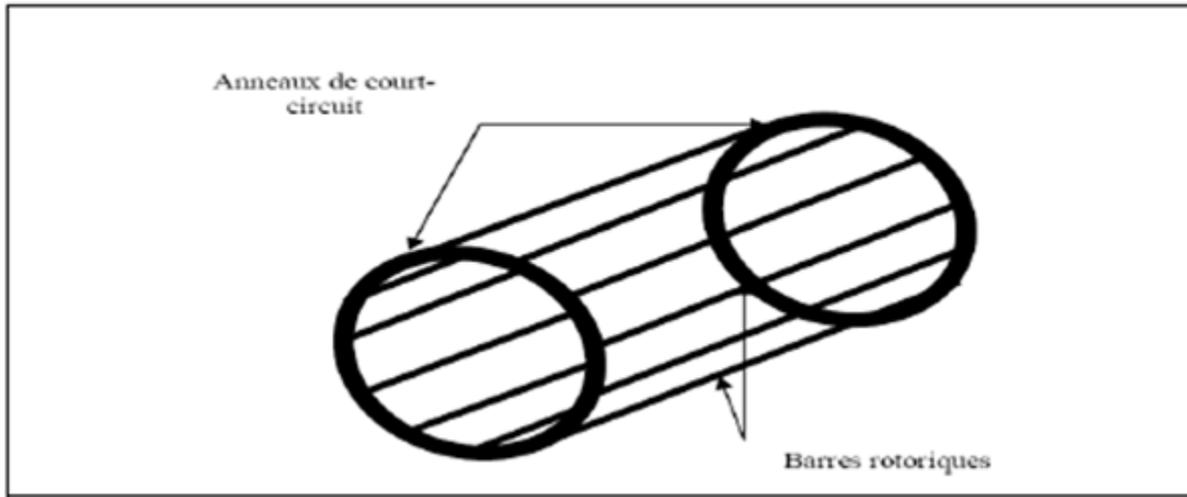
Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [1].

#### **I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques rotoriques :**

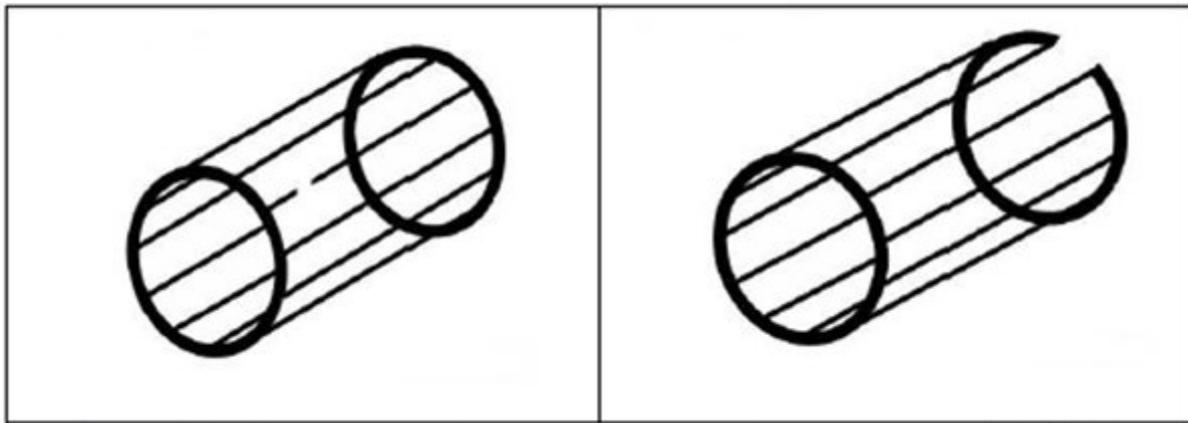
Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. 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. On peut 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. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petite puissance), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux

anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil [1].



**Figure I.11 : Rotor à cage d'écureuil**



**Figure I.12 : Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit**

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction. La rupture de barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor. En effet ce déséquilibre apparaît sous forme des fréquences qui s'ajoutent au courant statorique de la machine, et l'analyse fréquentielle de la signature de la machine montre une apparition des composantes, autour du composant fondamental correspondantes aux fréquences:

$$f = (1 \pm 2K_g) f_s, K = 1, 2, \dots, n \quad n \in \mathbb{N} \quad \text{I.7}$$

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des

conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants peut entraîner leur cassure. Ce défaut est généralement regroupé avec celui de la cassure de barres dans les études qui se font à partir du stator [2].

#### **I.4.Méthodes de diagnostic :**

Le raisonnement et la connaissance sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. Le diagnostic est au niveau conceptuel une distribution systématique des symptômes en diverses catégories de défauts. Par rapport à la connaissance et au raisonnement deux classes des méthodes de diagnostic existent :

- les méthodes internes ;
- les méthodes externes.

##### **I.4.1 Méthodes externes :**

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit à la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables qui peuvent être :

Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique. [2].

##### **I.4.2 Méthodes internes :**

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système.

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé. [2].

- Modèle de simulation : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- Observateur (estimateur) ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état.
- Estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

## **I.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons rappelé les éléments constructifs de la machine asynchrone à cage d'écureuil et nous avons également décrit la majorité des défauts qui peuvent apparaître ainsi que leurs influences sur le comportement de la machine. La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet d'implanter le modèle de la simulation (voir Annexe A) qui permet de donner une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement.

Dans le chapitre suivant on va exposer la théorie des ondelettes et de ses applications particulièrement pour la détection et localisation des défauts dans le rotor à cage de la machine asynchrone.

## *Chapitre II*

### *Transformé en ondelette*

### II.1 Introduction

La plupart des signaux sont non stationnaires, ce qui empêche la méthode de la transformée de Fourier (FT) et la transformée de Fourier à court terme (TFCT) de pouvoir les étudier à cause de leurs limitations vers ce type de signaux.

Dans le présent chapitre, on va présenter une étude préliminaire sur une méthode destinée à ce type de signaux. C'est la méthode de transformée en l'ondelette (TO) ou (WT) pour «wavelet Transform».

La méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur cette méthode son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la manière de calcul de la transformation des signaux analysés.

Ce chapitre donne un aperçu général sur le principe de calcul et décomposition des signaux analysés par cette méthode.

### II.2 Transformée en ondelettes

#### II.2.1 Historique des ondelettes

Les ondelettes sont nées lorsque les scientifiques ont eu besoin d'une analyse en fréquence et en temps. Au XIXème siècle, l'analyse de Fourier était la seule technique permettant la décomposition d'un signal et sa reconstruction sans perte d'information; malheureusement, elle fournit une analyse en fréquence mais ne permet pas la localisation temporelle de changements abruptes, comme par exemple l'apparition d'un deuxième choc après qu'un premier choc ait été apparu.

En 1909 Alfred Haar a défini une fonction composée d'une courte impulsion négative suivie d'une courte impulsion positive, connue pour être la première ondelette (Ondelette de Haar). En 1946, Dennis Gabor, mathématicien hongrois, inventa une transformation de fonction analogue à celle de Joseph Fourier, appliquée sur une fenêtre temporelle exprimée par une fonction gaussienne.

Finalement, le terme d'ondelette 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 multirésolution.

Enfin, en 1987, Ingrid Daubechies mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies, facilement implémentables, et utilisées dans le standard JPEG 2000.

#### II.2.2 Définition d'une ondelette

Une ondelette est une fonction élémentaire, à valeurs réelles ou complexes, très concentrée à la fois en temps et en fréquence [3].

Elle doit répondre à deux critères : [4]

- 1- Elle doit avoir un support compact, c'est-à-dire qu'elle se localise sur un petit intervalle de temps.
- 2- Elle doit être de moyenne nulle.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \quad \text{(II.1)}$$

C'est la condition d'admissibilité car c'est cette condition qui a donné le nom d'ondelette. La transformée en ondelettes d'un signal  $s(t)$  est définie par la formule :

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot \psi(t) dt \quad (\text{II.1})$$

La transformée en ondelettes d'un signal  $s(t)$  est la famille  $C_{a,b}$  des coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres  $a$  et  $b$ . Suivant les besoins de l'analyse du signal  $s(t)$ , les paramètres  $(a,b)$  peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD). Le coefficient d'ondelette  $C_{a,b}$  d'un signal  $s(t)$  dépend de la forme de celui-ci au voisinage du temps  $b$ . Quand  $s(t)$  est à peu près constant (1) figure (II.1) autour d'un temps  $b$ , le produit de  $s(t)$  par l'ondelette  $\psi$  (d'aire nulle) a une aire très petite, autrement dit  $C_{a,b}$  est très petit. Quand au contraire, le fragment du signal autour d'un temps  $b'$  est irrégulier (2) et que ses variations sont de « fréquence » comparable à celle de l'ondelette, l'aire du produit signal-ondelette (donc  $C_{a,b}$ ) est généralement beaucoup plus grand [5].

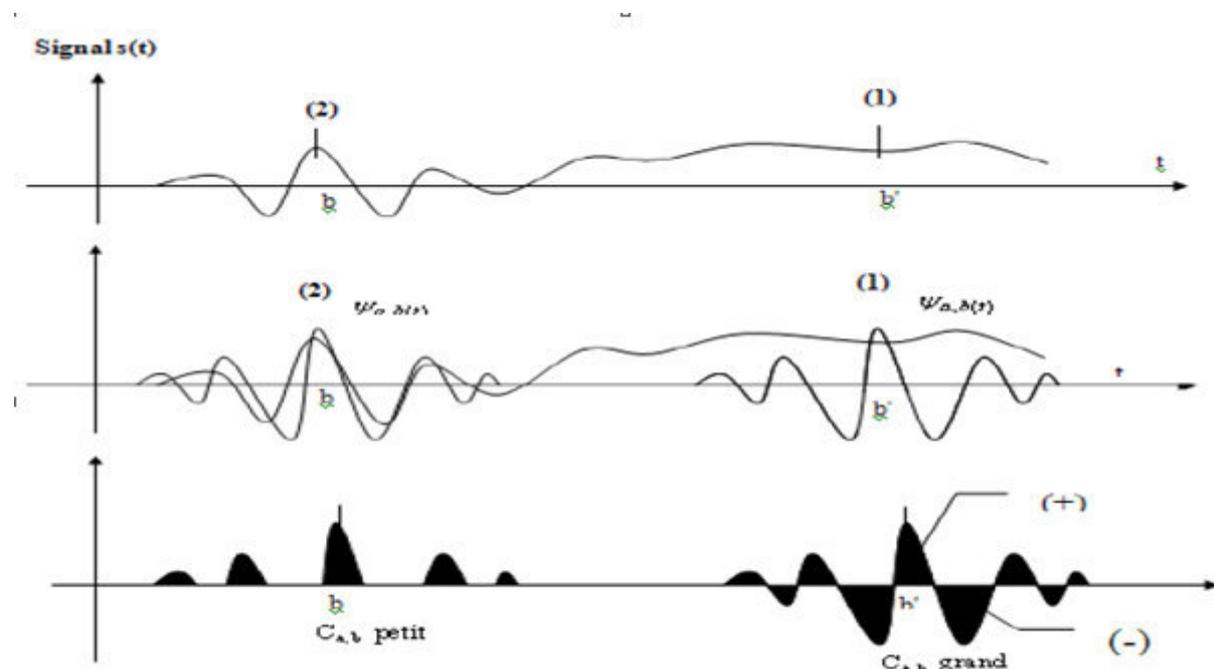


Figure II.1 : Projection de l'ondelette sur le signal

### II.2.3 La famille d'ondelettes :

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Chacune d'entre elles a un domaine d'application défini de la forme du signal étudié. Le tableau (II.1) contient les familles les plus usuelles [6]:

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
Ondelette biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Ondelette de Battle et le Marié	Btln
Ondelette gaussienne	Gaus
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette gaussienne complexe	Cgau
Ondelette de shannon complexe	Shan
Ondelette B-spline fréquentielle complexe	Fbsp
Approximation discrète de l' Ondelette de Meyer	dmey
Ondelette de Morlet complexe	cmor

Tableau II.1 : Famille d'ondelettes

### II.2.3.1 Ondelette de Haar :

C'est Alfred Harr qui a construit en 1909 des bases considérées aujourd'hui comme le fondement de la théorie des ondelettes. Haar a défini une fonction  $h(t)$  qui correspond à l'ondelette de Haar.

$$H(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (II.3)$$

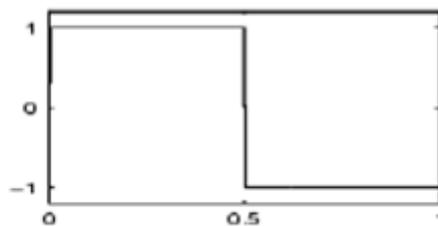


Figure II.2 : Forme de l'ondelette de Haar

### II.2.3.2 Ondelettes 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  $dbN$ [6].

Pour  $N=1$ , on a l'ondelette db1, c'est uniquement l'ondelette de Haar. La figure (II.3) montre les formes des ondelettes Daubechies pour différents ordres.

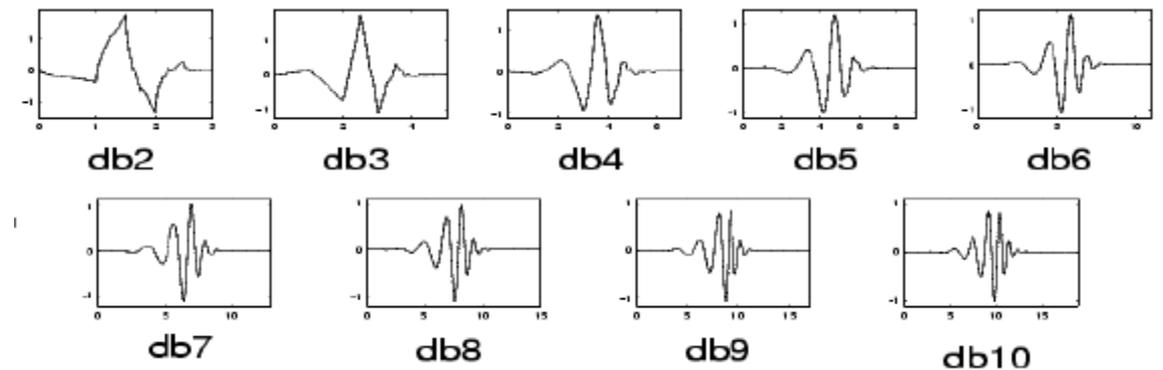


Figure II.3 : Forme des ondelettes daubechies

Cette famille d'ondelettes possède les propriétés suivantes [6]:

- Les ondelettes dbN sont asymétriques, en particulier pour les faibles valeurs de N, sauf l'ondelette de Haar.
- La régularité augmente avec l'ordre N.
- L'analyse est orthogonale.

### II.2.3.3 Les symlets de Daubechies

Daubechies a construit des ondelettes à support compact les plus symétriques possibles appelées Symlets; en effet, il n'existe pas d'ondelettes à support compact dans une analyse multi résolution orthogonale qui soient symétriques, exceptées l'ondelette de Haar qui est antisymétrique.

Les symlets ont le même nombre  $m$  de moments nuls que les ondelettes de Daubechies pour un support donné: on a à nouveau  $d = 2m$ , et le nombre d'éléments non nuls du filtre est  $2m$ . Nous les nommerons D6s, D8s, etc, toujours en référence au support des fonctions de base.

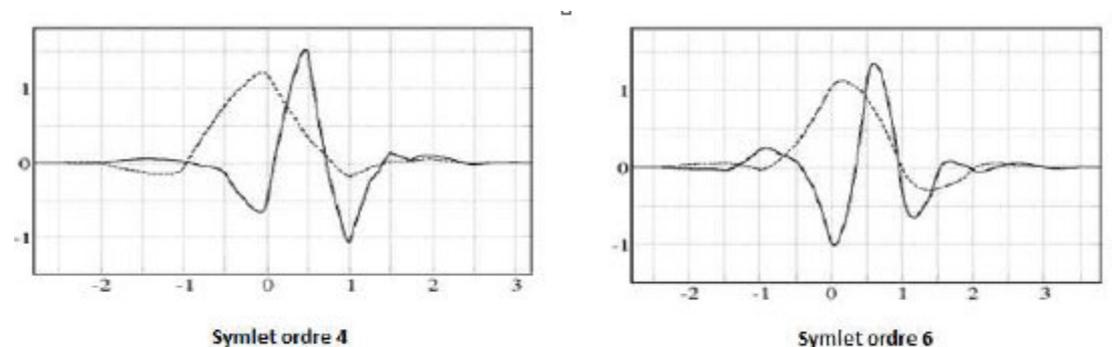


Figure II.4 : Forme de l'ondelette Symlet

### II.2.3.4 Ondelette de Morlet

Cette fonction ne vérifie qu'approximativement la condition d'admissibilité, elle est définie par :

$$\psi(x) = Ce^{\frac{x^2}{2}} \cos(5x) \quad (\text{II.4})$$

Où « C » est une constante de normalisation de reconstruction. La figure (II.5) montre la forme de cette ondelette.

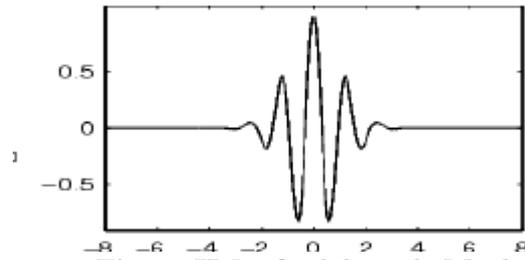


Figure II.5 : Ondelette de Morlet

### II.2.3.5 Ondelette chapeau mexicain

C'est une fonction qui est proportionnelle à la dérivée seconde de la fonction de densité de probabilité gaussienne :

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

Elle oscille très peu comme la figure (II.6) montre.

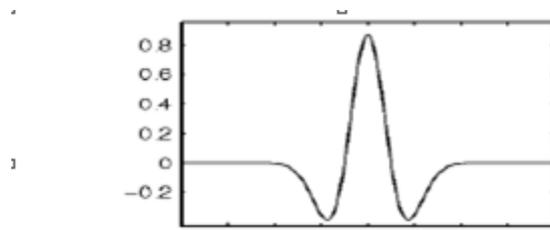


Figure II.6 : Ondelette chapeau mexicain

### II.2.3.6 Ondelettes 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 [Michel 03]. La forme de cette ondelette est donnée par la figure(II.7) :

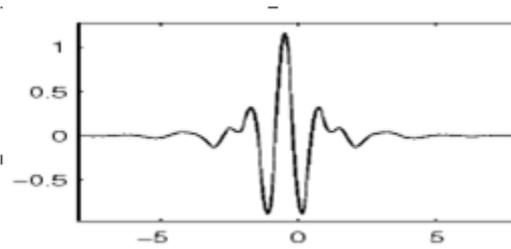


Figure II.7 : Ondelette de Meyer

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

$$\psi(\omega) = \begin{cases} 2\pi^{\frac{1}{2}} e^{\frac{j\omega}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \|\omega\| - 1\right) & \text{si : } \frac{2\pi}{3} \leq \|\omega\| \leq \frac{4\pi}{3} \\ 2\pi^{\frac{1}{2}} e^{\frac{j\omega}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \|\omega\| - 1\right) & \text{si : } \frac{4\pi}{3} \leq \|\omega\| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

### Remarques

- Les ondelettes de Morlet ne permettent pas de construire une base orthogonale.
- Les ondelettes de Daubechies sont les plus couramment utilisées.
- Les ondelettes de Daubechies forment une famille infinie et sont notées db1, db2, db3,... dans la boîte à outils de Matlab. Une ondelette de Daubechies dbk utilise 2k coefficients et est donc calculée à partir de 2k points

### II.2.4 Ondelettes et résolution temps-échelle

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

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

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

Tableau II. 2 : la précision en fonction du facteur d'échelle

Le pavage du plan temps échelle n'est donc pas régulier comme celui du plan temps fréquence.

En analyse avec transformée de Fourier à court terme « TFCT », la taille de la fenêtre est toujours la même figure (II.8), elle ne dépend pas de la fréquence. Autrement dit, la précision en temps et en fréquence est identique pour les hautes et les basses fréquences.

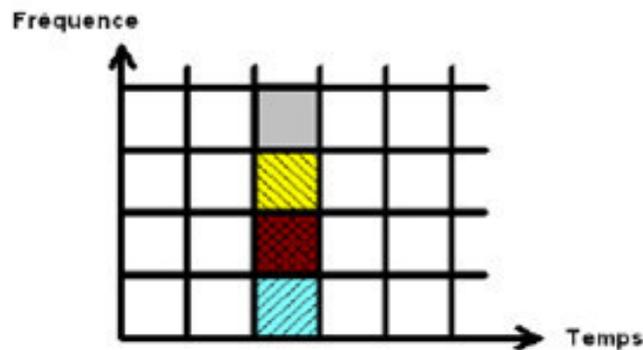


Figure II.8 : Résolution temps-fréquence de la TFCT

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

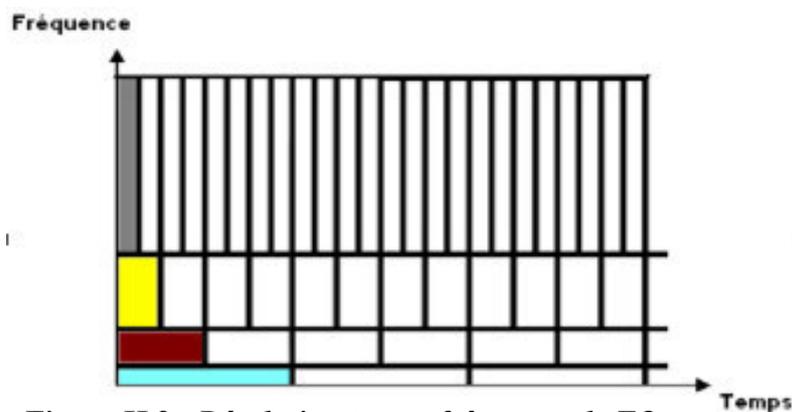


Figure II.9 : Résolution temps-fréquence de TO

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

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

- À des fréquences plus élevées la largeur des cases diminue, la résolution de temps est meilleure, et les tailles des cases augmentent, la résolution de fréquence devient plus faible. La résolution temporelle est donc plus importante pour les hautes fréquences que pour les

basses fréquences. Inversement, la résolution fréquentielle est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences.

Les ondelettes permettent de pallier donc à l'inconvénient de la TFCT en adaptant la précision en fonction de la fréquence. Une résolution simultanée est obtenue par la transformée en ondelettes dans laquelle la fenêtre d'analyse peut avoir des durées différentes.

### II.2.5 La transformée en ondelette

L'idée de l'ondelette est de pouvoir faire varier les largeurs en temps et en fréquences d'une fonction tout en la translatant le long du signal comme dans la transformée de Fourier fenêtrée.

A partir de l'ondelette mère  $\psi(t)$  ; on construit par translation et dilatation une famille de fonctions  $\psi_{a,b}(t)$  qui en sont les atomes de base. Ces fonctions de sont données par la relation (II.7) [] []:

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

Le paramètre (b) de l'ondelette représente sa translation sur l'axe du temps, par contre le paramètre (a) donne le contrôle de la fréquence de l'ondelette, sachant que  $a = \frac{1}{f}$ . 'f' étant la fréquence. [7]

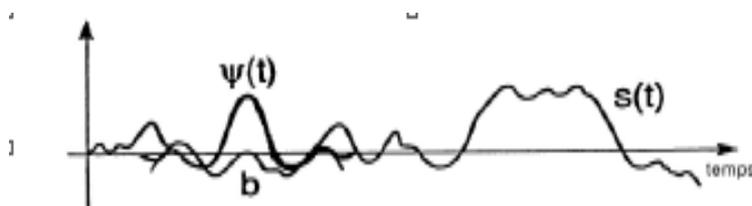
Si  $a < 1$ , l'ondelette  $\psi_{(a,b)}$  devient très concentrée par rapport à l'ondelette mère  $\psi_{(a,b)}$  et son contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.

Si  $a > 1$ , l'ondelette  $\psi_{a,b}(t)$  est très large, et le contenu fréquentiel penchera vers les basses fréquences du plan d'analyse.[7]

Il y a plusieurs types de la transformée en ondelette ; les principaux, sont cités en ce qui suit :

#### II.2.5.1 La transformée en ondelette continue (TOC) ou (CWT)

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



*Figure II.10 : Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer 'TOC'*

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

La transformée en ondelette continue d'une fonction  $x(t) \in L_2(\mathbb{R})$  est définie dans le domaine temporel par le produit scalaire suivant [5]:

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

Alors

$$X_{ro}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{II.9})$$

En effectuant le changement de variable  $t_1 = \frac{t}{a}$  on aura :

$$X_{ro}(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(at_1) \psi\left(t_1 - \frac{b}{a}\right) dt_1 \quad (\text{II.10})$$

**b** : est le paramètre de localisation temporelle.

**a** : est le paramètre de localisation fréquentielle.

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

### II.2.5.2 La transformée en ondelette discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisés.

Dans ce cas les paramètres **a** et **b** deviennent : [5]

$$a = a_0^m \quad \text{et} \quad b = n b_0 a_0^m \quad n, m \in \mathbb{Z}$$

Avec

$a_0$ : est un paramètre de dilatation.

$b_0$ : est un paramètre de translation.

On appelle transformée en ondelette discrète toute base d'ondelette travaillant avec un facteur d'échelle  $a=2^n$ . Ce type de la transformée est pratique en implémentation sur tout système numérique. [9]

### **Conclusion:**

Ce chapitre a été consacré à donner un aperçu général sur les méthodes destinées à l'analyse des signaux non stationnaires et non linéaires, telles que la méthode de la transformée en ondelette (TO).

Après avoir donné les notions de ces méthodes, un état de l'art sur leurs applications dans le domaine de diagnostic des défauts a été présenté. Ceci pour avoir une idée sur les algorithmes à suivre et utiliser, et les différentes méthodes combinées.

## *Chapitre III*

*Etude de la méthode d'extraction des signatures  
ROOT- MUSIC*

### **III.1 Introduction :**

La détection des défauts dans leurs premier stade est devenue une nécessité majeure afin d'éviter la défaillance totale des machines électriques.

De nombreux travaux ont été consacrés à ce type de détection utilisant différentes techniques de diagnostic. La plupart de ces techniques utilisent les grandeurs mécaniques (couple, vitesse, vibration, bruit, etc.) qui demande l'introduction de capteurs au niveau de la machine, ce qui est difficile et couteux dans la plus part des cas. [1]

Les nouveaux outils de contrôle commencent à utiliser l'analyse de l'alimentation et en particulier des courants circulant dans une des phases. L'intérêt d'une analyse du courant statorique réside dans sa simplicité, sa mise en place est moins onéreuse qu'une analyse de vitesse de rotation ou l'analyse vibratoire qui nécessitent l'utilisation d'un capteur amovible. Des études faites sur l'analyse du courant statorique (MCSA : Motor Current Signature Analysis) montrent qu'en plus des informations contenues dans les vibrations, des informations propres aux phénomènes électriques apparaissent sur le signal du courant statorique. [10]

Le courant statorique est donc un moyen intéressant pour surveiller aussi bien la partie électrique que mécanique de la machine.

Les roulements à bille est la partie mécanique la plus sensible aux défauts dus au vieillissement et à l'usure, comme par exemple, des fissures ou des écaillages apparaissent sur les différents éléments du roulement. C'est pourquoi, notre but de travail est d'appliquer une méthode, d'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic des différents défauts de la machine asynchrone, appelée l'algorithme de MUSIC « Classification des signaux multiples (MULTiple SIGNale Classification en anglais) » pour l'extraction des fréquences de signal à analyser.

### **III.2 Méthodes d'analyse spectrale à haute résolution (HR) :**

L'origine des méthodes HR remonte aux travaux de Prony, publiés en 1795, qui visent à estimer une somme d'exponentielles par des techniques de prédiction linéaire. Plus récemment, cette approche a été approfondie par Pisarenko pour estimer des sinusoïdes.

En comparaison, les méthodes HR modernes reposent sur les propriétés particulières de la matrice de covariance du signal. Ainsi, l'étude de son rang permet de séparer l'espace des données en deux sous-espaces, l'espace signal engendré par les sinusoïdes, et l'espace bruit qui est son complémentaire orthogonal. Les méthodes HR issues de cette décomposition en sous-espaces sont connues pour être plus robustes que les techniques de prédiction linéaire. C'est le cas des méthodes de MUSIC et ROOT-MUSIC (qui reposent sur l'espace bruit), de l'algorithme Tœplitz (Approximation Method), ainsi que l'algorithme ESPRIT et de ses variantes TLS-ESPRIT et PRO-ESPRIT (qui reposent sur l'espace signal). [5]

En fait, toutes ces méthodes d'estimation peuvent être appliquées à un modèle de signal plus générale.

Dans cet ensemble de méthodes nous distinguons deux familles :

- HR générale « exemple méthode de **PRONY** ».
- HR spécifique « exemple méthode de **Root-MUSIC** ».

Les HR générales utilisent des algorithmes simples et la résolution est améliorée par rapport aux méthodes directes de Fourier, mais et vu que ces méthodes utilisent tout l'espace propre de la matrice de covariance, il en résulte un biais sur l'estimation.

Quand aux MHR spécifiques, elles exploitent le fait que pour le modèle de données, l'espace propre de la matrice de corrélation peut être décomposé en deux sous-espaces orthogonaux : sous-espace signal (source) et sous-espace bruit. Ces méthodes spécifiques sont plus robustes vis-à-vis du bruit et permettent d'avoir une très bonne résolution. [11]

### III.2.1 L'algorithme « MUSIC » :

La méthode « MUSIC » a été initialement proposée de manière indépendante par Schmidt Bienvenue et Kopp dans le domaine de traitement d'antennes au cours des années 1980. L'algorithme MUSIC exploite les propriétés de la décomposition en vecteurs propres de la matrice d'auto-corrélation en rapport avec le vecteur des observations. Cette décomposition permet de séparer l'espace des observations en deux espaces vectoriels orthogonaux: le sous-espace de signal et son complément orthogonal, ou bien le sous-espace bruit. [12]

### III.2.2 La méthode ROOT-MUSIC :

La méthode ROOT-MUSIC est un outil puissant pour la détection de fréquence du signal immergé dans un bruit mais son principal inconvénient est le temps de calcul long de fréquence lorsque l'ordre des dimensions du signal est grand ou un grand nombre d'échantillons sont demandés.

Pour cette raison, cette méthode peut être utilisée seulement dans le diagnostic hors ligne. Il est connu que lorsque le signal à traiter peut être mis sous la forme d'une somme d'exponentielles complexe pondérées, les méthodes les plus performantes pour l'extraction de l'information utile sont les méthodes dites MHR « Multiple High Résolution, la méthode ROOT –MUSIC qui fait partie de cette famille, cherche à séparer l'espace initiale en deux sous espace vectoriels orthogonaux : le sous espace signal et son complément orthogonal, le sous espace bruit. [13]

Nous supposons que le courant de stator  $I_s(n)$  est comme suit :

$$I_s(n) = \sum_{i=1}^L I_i e^{j(2\pi \frac{f_i}{f_{sh}} \cdot n + \Phi_i)} + W(n) \quad \text{(III.1)}$$

Avec:

## **Chapitre III : Etude de la méthode d'extraction des signatures ROOT-MUSIC**

---

•  $I_i, f_i$  et  $\Phi_i$  : Sont l'amplitude, la fréquence et la phase aléatoire de la sinusoïde complexe  $i$  (composants harmonique).

- $n=0, 1, 2, \dots (N-1)$ .
- $\mathbf{W}(n)$  : Le bruit.
- $f_{sh}$  : La fréquence d'échantillonnage.
- $N$  : Nombre d'échantillonnage.
- $L$  : Nombre de sinusoïdes ou des sources.

La matrice d'autocorrélation du signal de bruit est la somme des matrices d'autocorrélation du signal  $i_s$  et le bruit  $\mathbf{W}$  définit comme suit :

$$R_i = R_S + R_w = E [i_s(n) \cdot i_s^H(n)] + E [w(n) \cdot w^H(n)] = S \cdot A \cdot S^H + \sigma_w^2 \cdot I \quad (\text{III.2})$$

- $i_s(n) = [i_1, \dots, i_L]$  Vecteur d'observation.
- $(\cdot)_H$  Est l'opérateur de transposition –conjugaison c'est-à-dire le vecteur complexe transposé et conjugué (hermitien transposé en anglais).
- $E [\cdot]$  L'espérance mathématique.
- $I$  : Etant la matrice identité de la taille  $(N \times N)$ .
- $S = [s_1 \dots s_i \dots s_L]$  ;  $S_i$  : Vecteur sources.

$$S_i = [1 \quad e^{j.2\pi \cdot \frac{f_i}{f_{sh}}} \quad e^{j.4\pi \cdot \frac{f_i}{f_{sh}}} \quad \dots \quad e^{j.2\pi \cdot (N-1) \cdot \frac{f_i}{f_{sh}}}]^T \quad (\text{III.3})$$

- $A$  : est la matrice de puissance des harmoniques

$$A = \text{diag} [I_1^2 \quad I_2^2 \quad \dots \quad I_L^2] \quad (\text{III.4})$$

- $\sigma_w^2$  : la variation du bruit blanc
- $I_i$  : la matrice d'identité.

La décomposition en valeurs propres de la matrice d'autocorrélation  $R_i$  est donnée par :

$$R_i = \sum_{k=1}^N \lambda_k \cdot \mu_k \cdot \mu_k^H = \underbrace{U_S \cdot D_S \cdot U_S^H}_{R_S} + \underbrace{U_W \cdot D_W \cdot U_W^H}_{R_W} \quad (\text{III.5})$$

Où:

$\lambda_k, \mu_k$  : vecteurs et valeurs propres de  $R_i$ .

### **Chapitre III : Etude de la méthode d'extraction des signatures ROOT-MUSIC**

---

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{U}_S = [u_1 \dots u_L]; \mathbf{D}_S = \text{diag} [\lambda_1 \dots \lambda_L]. \\ \mathbf{U}_W = [u_{L+1} \dots u_N]; \mathbf{D}_W = \sigma_w^2 \cdot \mathbf{I}_{N-L}. \end{array} \right. \quad \text{(III.6)}$$

Les matrices  $\mathbf{U}_S$  et  $\mathbf{U}_W$  sont composées par les valeurs propres de vecteurs propres disposées dans l'ordre décroissant. L'équation (III.5) montre cela, nous pouvons diviser ces vecteurs propres en deux groupes ou sous-espaces :

$L$  vecteurs propres correspondant à  $L$  les plus grandes valeurs propres (sous-espaces de signal  $\mathbf{E}_s$ ), et  $N-L$  vecteurs propres de bruit qui idéalement ont des valeurs propres égales à  $\sigma_w^2$  (sous-espace de bruit  $\mathbf{E}_b$ ).

Les matrices diagonales  $\mathbf{D}_S$  et  $\mathbf{D}_W$  contiennent les valeurs propres  $\lambda_k$  correspondant aux vecteurs propres ; car les valeurs propres du bruit sont égales à la variation du bruit, la matrice  $\mathbf{D}_W$  peut être écrite comme montré dans l'équation (6), en comparant les équations (2), (5) et (6) nous pouvons écrire :

$$\mathbf{R}_i \cdot \mathbf{U}_W = \mathbf{U}_W \cdot \mathbf{D}_W = \sigma_w^2 \cdot \mathbf{D}_W = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}^H \cdot \mathbf{U}_W + \sigma_w^2 \cdot \mathbf{U}_W \quad \text{(III.7)}$$

Ce qui implique que :

$$\mathbf{S}^H \cdot \mathbf{U}_W = 0 \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{S}_i \in \mathbf{E}_s; \quad i = 1, \dots, L \\ \forall \mathbf{U} \in \mathbf{E}_b \end{array} \right.$$

La méthode de **Root-Music** emploie le principe de cette orthogonalité entre le sous-espace de signal et le sous-espace de bruit. Les fréquences d'estimation requis

$\mathbf{Z}_i = e^{j.2\pi \frac{f_i}{f_{sh}}}$  sont les racines d'équations (III.7) et la quelle peut être exprimée comme suit :

$$\mathbf{U}(z) = \sum_{K=0}^{L-1} \mathbf{I}_k \cdot \mathbf{Z}_i^{-K}$$

$$\mathbf{S}_i^H \cdot \mathbf{U}_i^H \cdot \mathbf{U}_W \cdot \mathbf{S}_i = 0 \quad \text{avec} \quad i = 1, 2, L \quad \text{(III.8)}$$

Les matrices de (III.4) vont en paires (c-à-d si  $\mathbf{Z}_i$  est une racine,  $1/\mathbf{Z}_i$  est aussi). Ces  $L$  racines les plus proches du cercle unité correspondent aux harmoniques possibles selon :

$$f_i = \frac{f_{sh}}{2\pi} \cdot \arg(Z_i) \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, L \quad \text{(III.9)}$$

### III.2.3 Estimation de puissances d'harmoniques:

Savoir ceci : L

$$R_S = S \cdot A \cdot S^H = \sum_{K=1}^L (\lambda_k + \sigma_w^2) u_k \cdot u_k^H \quad \text{(III.10)}$$

Il est plus facile à inverser  $R_S$  qu'à inverser  $S$ . par conséquent les puissances d'harmoniques peuvent être estimées par la méthode suivante :

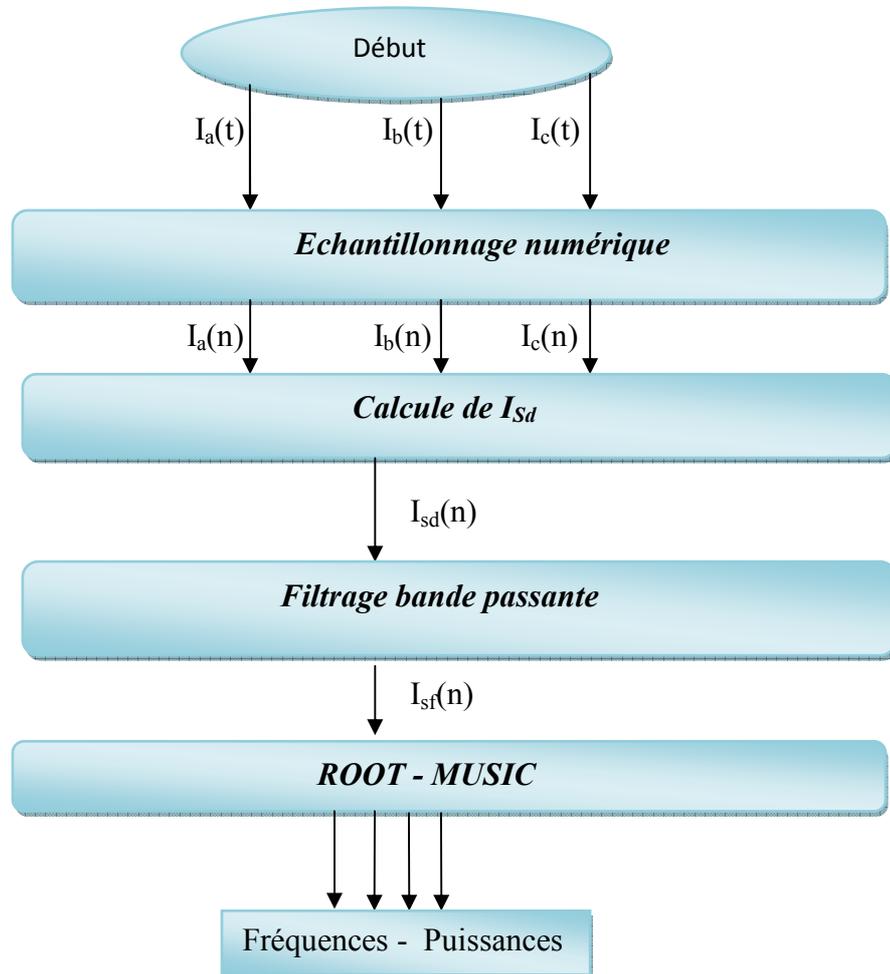
$$Q = A^{-1} = \frac{1}{S^H \cdot S \cdot R_S^{-1}} \quad \text{(III.10)}$$

Là où:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_S^{-1} = \sum_{K=0}^L \frac{1}{\lambda_k + \sigma_w^2} \cdot u_k \cdot u_k^H \\ \sigma_w^2 = \frac{1}{N-L} \sum_{k=L+1}^N \lambda_k \end{array} \right. \quad \text{(III.11)}$$

Le problème d'identification est résolu en sachant les fréquences et les puissances des divers harmoniques. En outre, le rang (l'ordre) de sous-espace qui nous permet d'estimer le positionnement de fréquences. En raison de la longueur finie de données, nous ne pouvons pas avec précision calculer la matrice de corrélation.

**III.3 L'organigramme de l'algorithme ROOT - MUSIC :**



**Figure III.3 : L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC**

**III.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons vu que la détection et la classification des défauts se basent sur l'extraction des paramètres du courant statorique à base d'une méthode dite **Root -MUSIC** qui se résume sur l'analyse spectrale à haute résolution. Nous avons remarqué que cette méthode reste la meilleure pour obtenir une meilleure résolution fréquentielle par rapport à une autre technique d'extraction de paramètres et d'autre part le traitement de cette méthode va être traduit en un programme écrit sous MATLAB.

## *Chapitre IV*

### *Simulation*

### IV.1 Introduction :

L'emploi direct des coefficients d'ondelettes sans recours à la reconstruction des signaux à partir de ces coefficients se révèle un outil de détection efficace, alliant de bonnes performances à un faible coût de calcul. En effet, si  $M$  est le nombre de points du signal, alors l'algorithme de décomposition discrète d'analyse et de reconstruction vaut  $2.O(M)$ , tandis qu'en utilisant seulement l'algorithme d'analyse sur les coefficients, le coût de calcul est réduit de moitié.

Dans notre cas, le principe retenu pour la détection est l'application d'algorithmes de ROOT-MUSIC sur les coefficients d'ondelettes (et non sur les signaux reconstruits) des niveaux d'échelle préalablement choisis. La détection à partir des coefficients repose sur la recherche de la coïncidence en temps, à travers plusieurs échelles, de coefficients d'ondelettes significatifs. La décomposition dyadique peut cependant mener à un décalage important dans la localisation des changements.

### IV.2 Résultat expérimentaux du diagnostic des défauts de roulement :

Selon l'élément affecté chaque défaut de roulement possède une fréquence caractéristique qui se reflète dans le courant statorique à des fréquences bien déterminé

Un moteur à cage d'écureuil est accouplé à une génératrice à courant continu formant le banc d'essai pour effectuer les tests. Leurs paramètres sont donnés dans l'annexe A et B. La chaîne de mesure comporte un capteur de courant à effet Hall et la carte son comme une carte d'acquisition et un analyseur de spectre comme moyen de vérification. L'ensemble est relié à un ordinateur pour le traitement et la visualisation des signaux captés comme illustré par la figure (V.1)



**Figure IV.1 : Banc d'essai destiné au diagnostic des défauts**

1 : Moteur asynchrone 1.5 KW.

2 : Génératrice à c-c 3 KW .

3 : Analyseur de spectre.

4 : Oscilloscope.

5 : Tachymètre.

6 : Capteur de courant à effet Hall

Le moteur comporte deux roulements différents le coté avant et le coté arrière.

Le roulement est composé d'un l'acier traité et la création d'un défaut sur l'un de ses surfaces est très difficile. Pour cela les défauts ont été créés artificiellement par électroérosion. Nous avons effectué ces défauts au roulement coté avant du rotor dont les paramètres géométriques sont donnés en annexe C :

- défaut de bague externe avec un trou de 3mm
- défaut de bague interne avec un trou de 3mm
- défaut de bille avec un trou de 3mm
- défaut de cage



(a)

(b)

(c)

(d)

**Figure IV. 2: Les différents défauts provoqués sur les roulements**

a) défauts de bague externe, b) défaut de bague interne, c) défaut de bille, d) défaut de cage

Les signaux ont été effectués avec une fréquence d'échantillonnage  $F_e=3092.1$  Hz et un nombre d'échantillons égal à  $N_e=512$  soit une résolution fréquentielle égale à 0.05 Hz. Notons que ces essais ont été effectués en régime permanent et à charge nominale, et le traitement des signaux est fait en utilisant l'algorithme de la transformée de fourrier rapide (FFT). On a introduit aussi les fenêtres de pondération afin d'améliorer la détection des défauts.

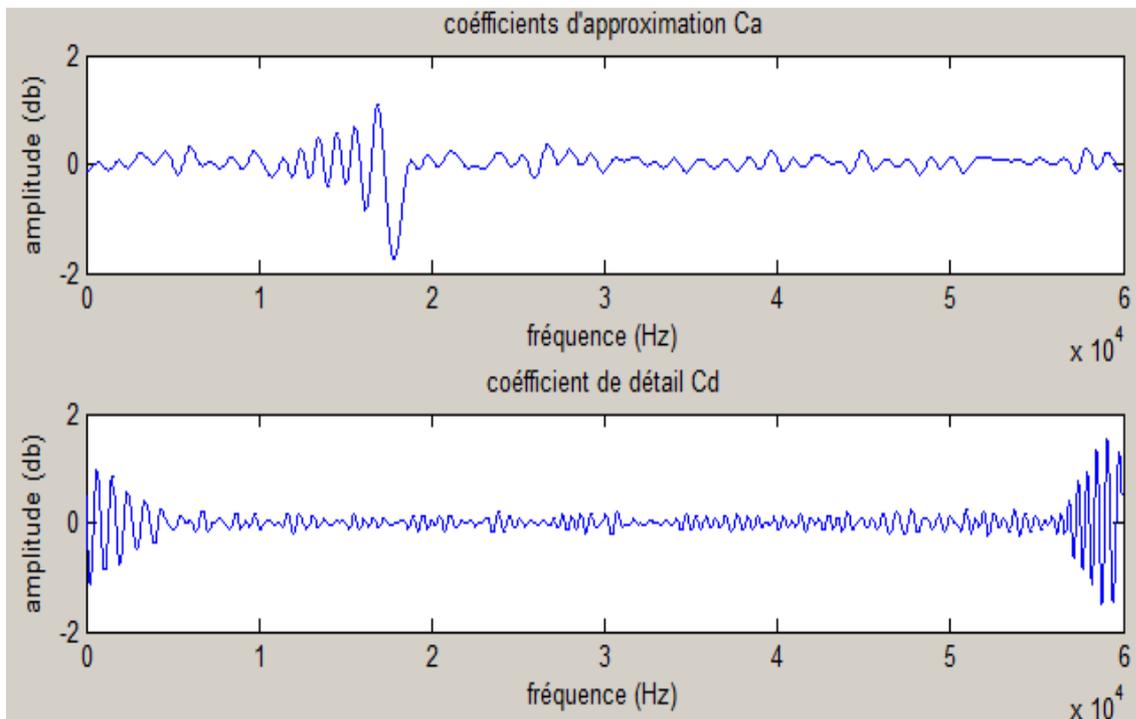
### **IV.3.Simulation :**

#### **IV.3.1. Application de l'ondelette stationnaire (swt) pour calculer les Coefficients d'approximation et de détail :**

On va faire une décomposition simple des signaux des fichiers Test chargés de Matlab à l'aide de l'ondelette mère daubechies 45 'db45' on observe clairement le signaux approximation et le signaux détail).

#### **Moteur sain :**

La figure représente les coefficients d'approximation et de détail de moteur sain



**Figure IV.3: représentation des Ca et Cd cas de moteur sain**

#### **Défaut de la bague externe:**

La figure représente les coefficients d'approximation et de détail de défaut de la bague externe

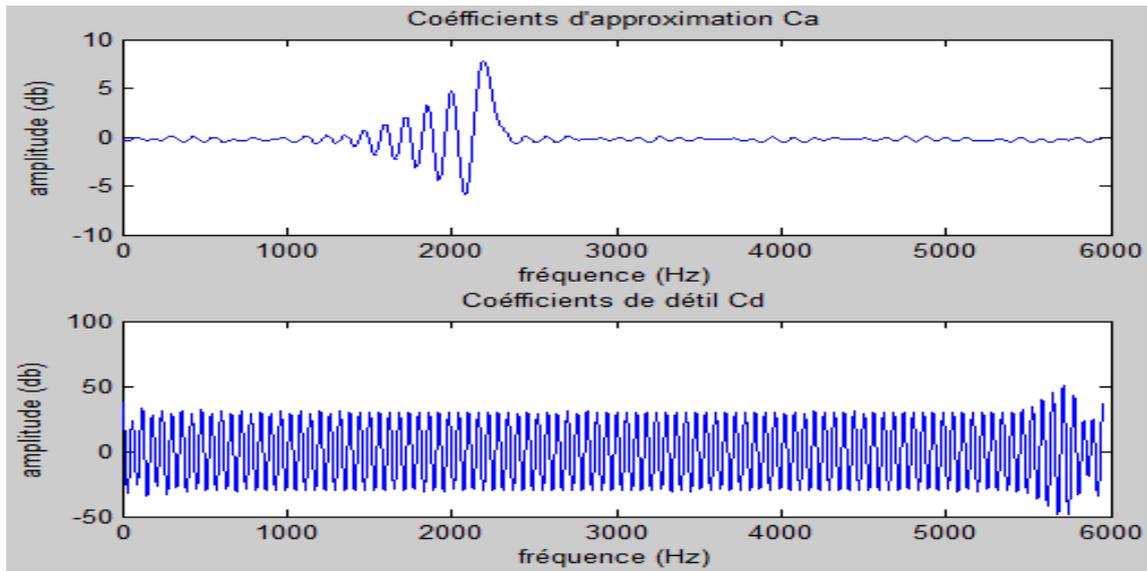


Figure IV.4: représentation des Ca et Cd cas de défaut de la bague externe

#### Défaut de bille

La figure représente les coefficients d'approximation et de détail de défaut de bille

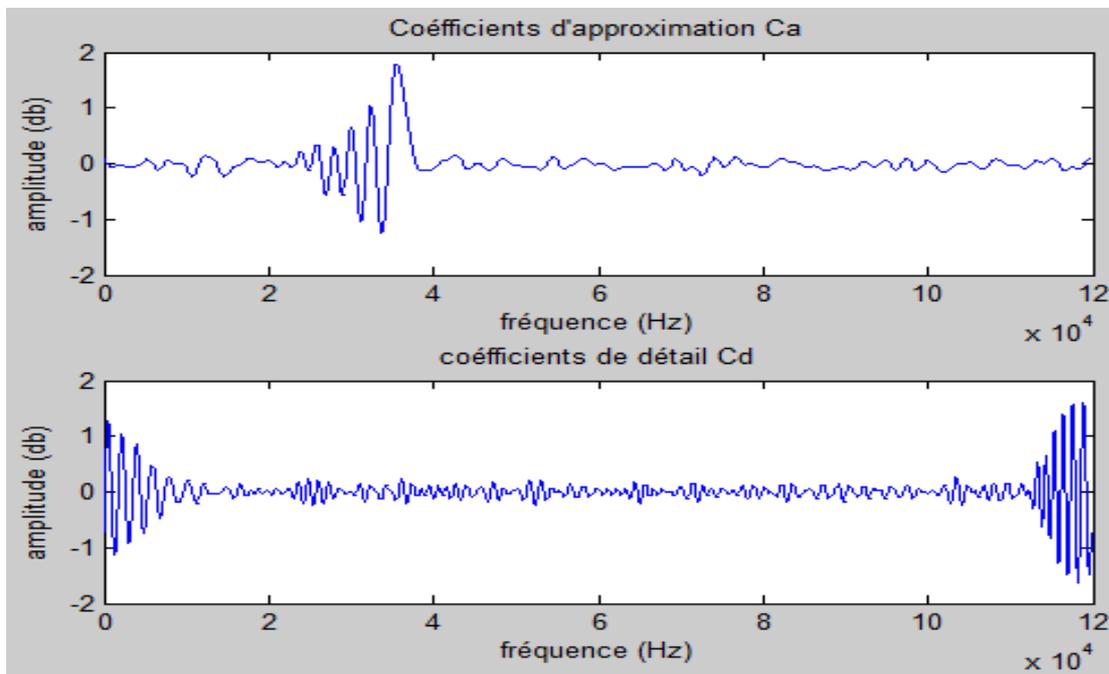
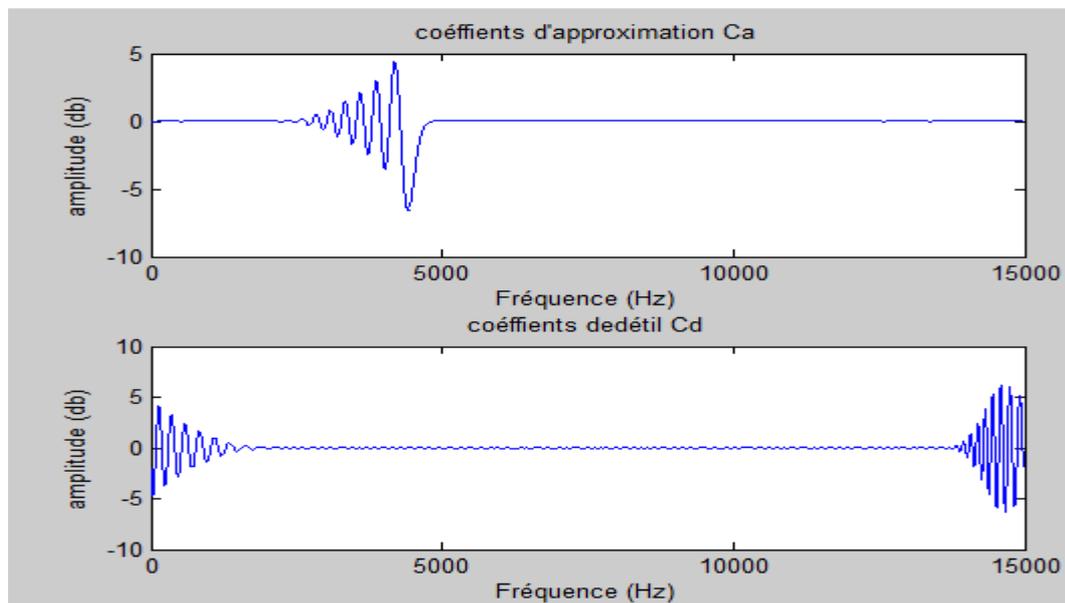


Figure IV.5: représentation des Ca et Cd cas de défaut de bille

**Défaut de la bague interne :**

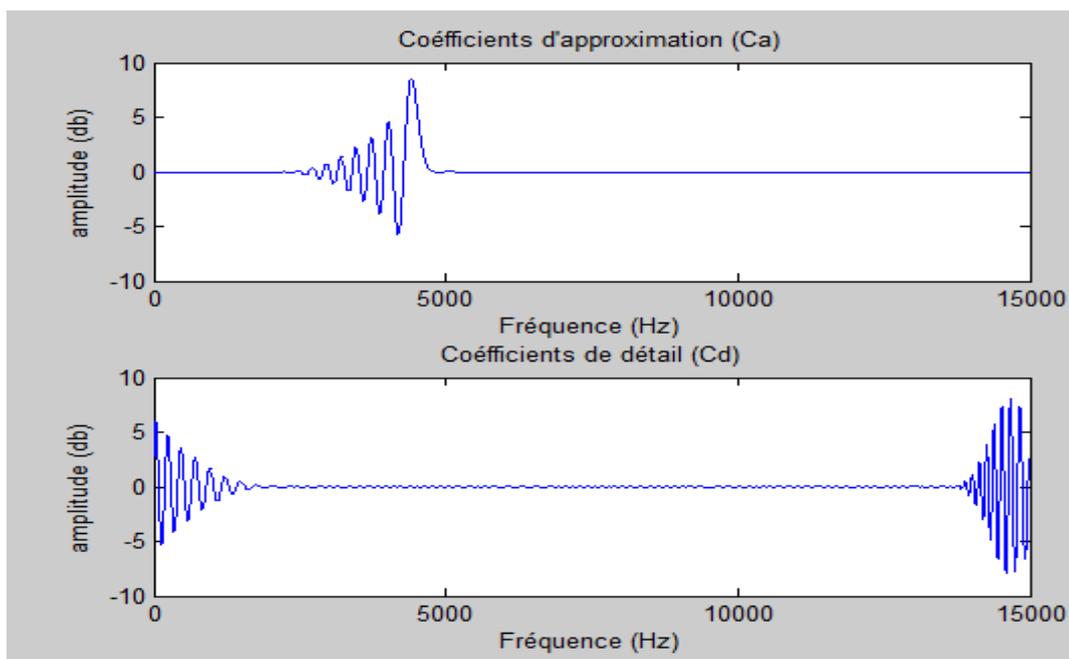
la figure représente les coefficients d'approximation et de détail de défaut de la bague interne



**Figure IV.6: représentation des Ca et Cd cas de défaut de la bague interne**

**Défaut de cage de bille**

la figure représente les coefficients d'approximation et de détail de défaut de cage de bille



**FigureIV.7: représentation des Ca et Cd cas de défaut de cage de bille**

### **Commentaire :**

Les figures (V.3,V.4,V.5,V.6) représentent respectivement les résultats d'analyse de courant statorique de la phase ia par l'ondelette mère daubechies 45 pour des fonctionnements sain , avec défaut de la baque externe, avec défaut de la bague interne , défaut de bille et cage de billes

La comparaison des signaux de détail et d'approximation pour une machine avec défaut montre que l'amplitude des coefficients Ca et Cd est augmentée par rapport à celui de la machine sain. Cette augmentation dans les signaux est due à l'effet que les bandes de la fréquence correspondante sont affectées par les différents types de défauts. Ainsi, on remarque des différences plus claires entre les signaux des différents défauts représentés précédemment

**IV.3.2. Analyse des coefficients d'ondelette par l'algorithme Root-music :**

On va représenter les spectres correspondant au l'application de la Root-Music sur les coefficients d'ondelette des différents défauts de roulement, en premier lieu, la négligence de l'effet des défauts d'enroulement et de l'ouverture des encoches, et en second lieu, la prise en compte de ces effets conformément à l'analyse préétablie. En revanche, une nouvelle série d'harmoniques se manifeste clairement. Nous remarquons clairement la différence entre les signaux d'après leurs formes et leurs épaisseurs tel que tous les harmoniques multiple de 3 ( fs ) sont naturellement éliminés (150 Hz ,300 Hz ,450 Hz , 600 Hz ,750 Hz.....).

On peut voir dans le zoom les raies de fréquences « PSH » (harmoniques principaux d'encoches) de fréquences obéissant à la loi [ ] :

$$Fe = f_s \left( \frac{k \cdot Nb}{p} (1 - g) \right) + 1$$

Avec :

K : entier positif ( k=1 ,3 ,5 ,7 .....)

Nb : nombre de barres rotoriques

P : nombre de pôles

g : le glissement tel que :  $g = \frac{ns - nr}{ns}$

fs : la fréquence d'alimentation

Pour les paramètres et les conditions de test pour le diagnostic suivants :

un nombre de pôles p=4

un nombre de barres Nb=28

un glissement de 0.06 (ns=1500 m/s et :nr=1410 m/s)

On obtient les fréquences d'encoches théoriques suivantes :

K	1	3	5	7
Fe (Hz)	379	1037	1695	1480.5

**Tableau IV.1 : les valeurs calculées théoriquement des fréquences d'encoches**

Défaut de la bague externe:

La figure (V.8) représente les spectres des coefficients de détail correspondant au défaut de la bague externe

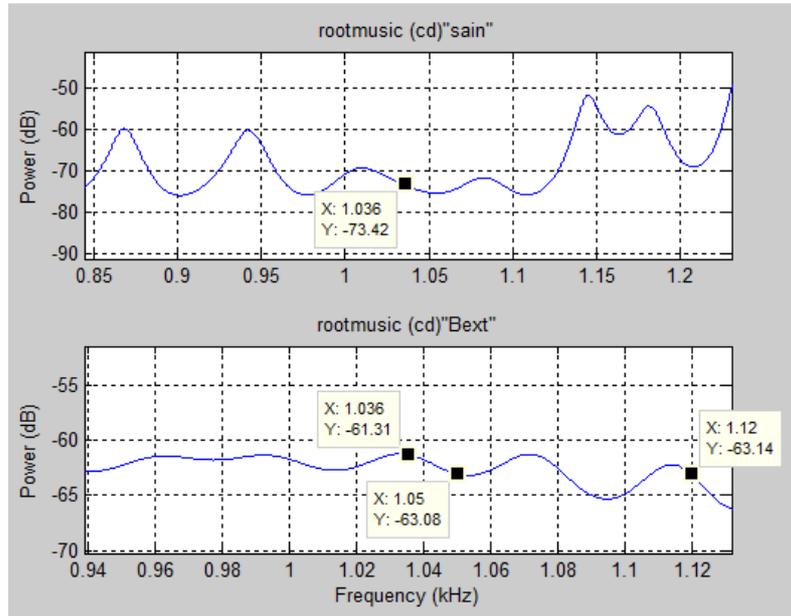


Figure IV.8: spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de bague ext

A cette échelle, l'absence d'harmonique multiple de trois et apparemment validé ( absence de fréquence à 1050 Hz et 1120 Hz ).On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la fs à la valeur 1036 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

La figure (V.9) représente les spectres des coefficients d'approximation correspondant au défaut de la bague externe.

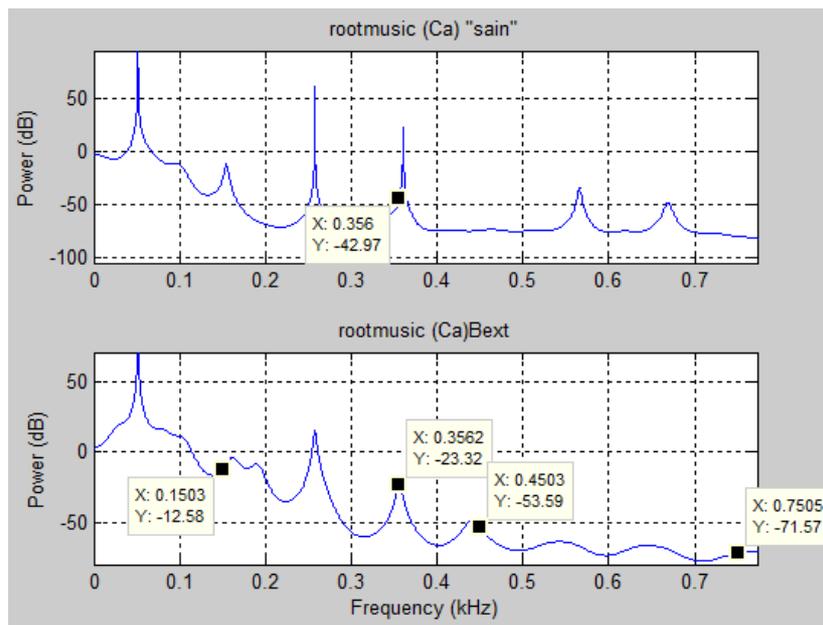


Figure IV.9: spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bague ext

A cette échelle, l'absence d'harmonique multiple de trois n'est pas validé à 450Hz). On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la fs à la valeur 356 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

### Défaut de la bague interne:

La figure (V.10) représente les spectres des coefficients de détail correspondant au défaut de la bague interne

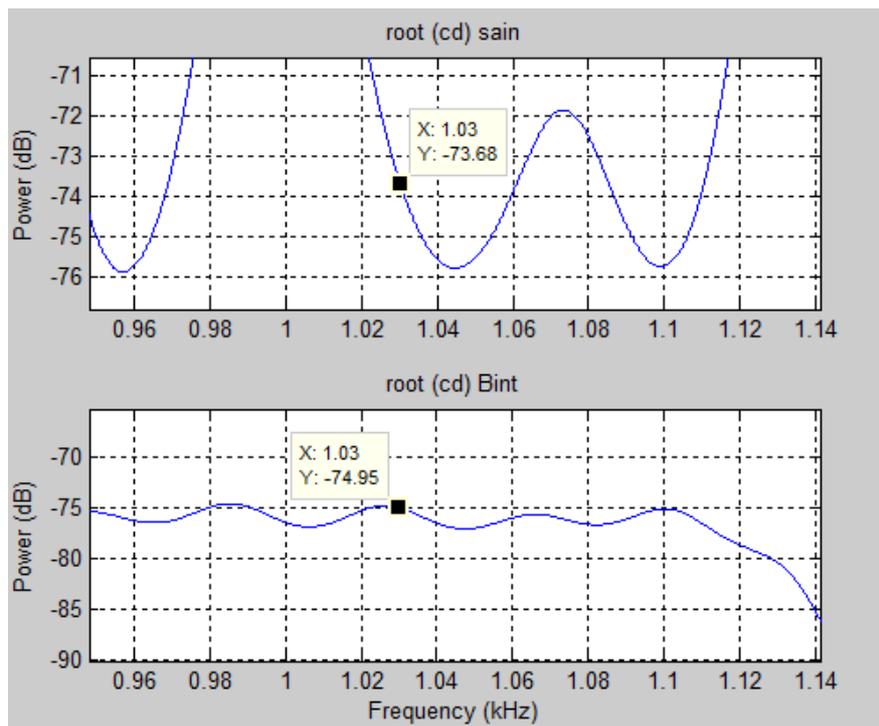


Figure IV.10: spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de la bague interne

A cette échelle, l'absence d'harmonique multiple de trois et apparemment validé. On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la fs à la valeur 1030 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

La figure (IV.11) représente les spectres des coefficients d'approximation correspondant au défaut de la bague interne

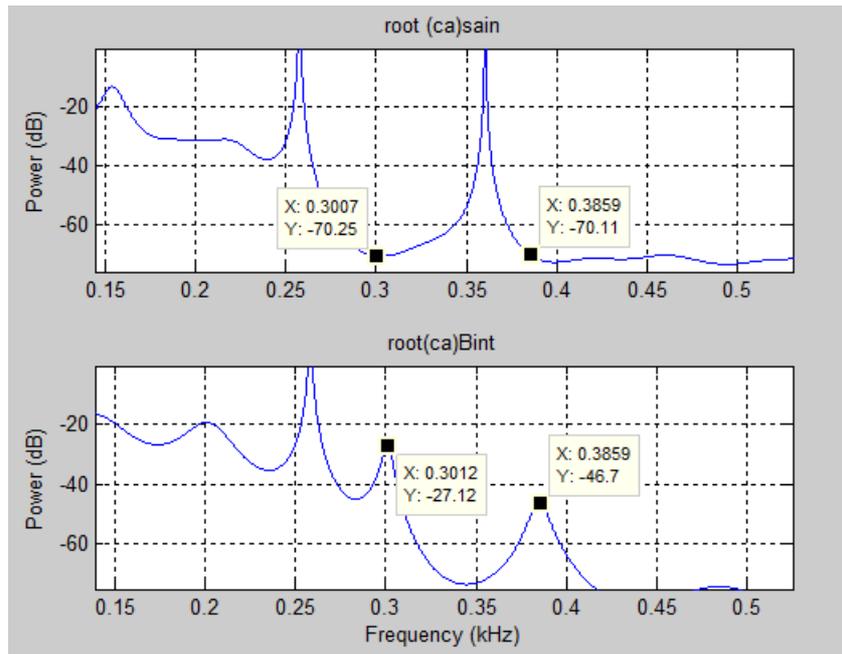


Figure IV.11: spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de la bague interne

A cette échelle, l'absence d'harmonique multiple de trois n'est pas validée à 300 Hz. On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la fs à la valeur 386 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche

### Défaut de cage de bille

La figure (IV.12) représente les spectres des coefficients de détail correspondant au défaut de cage de bille

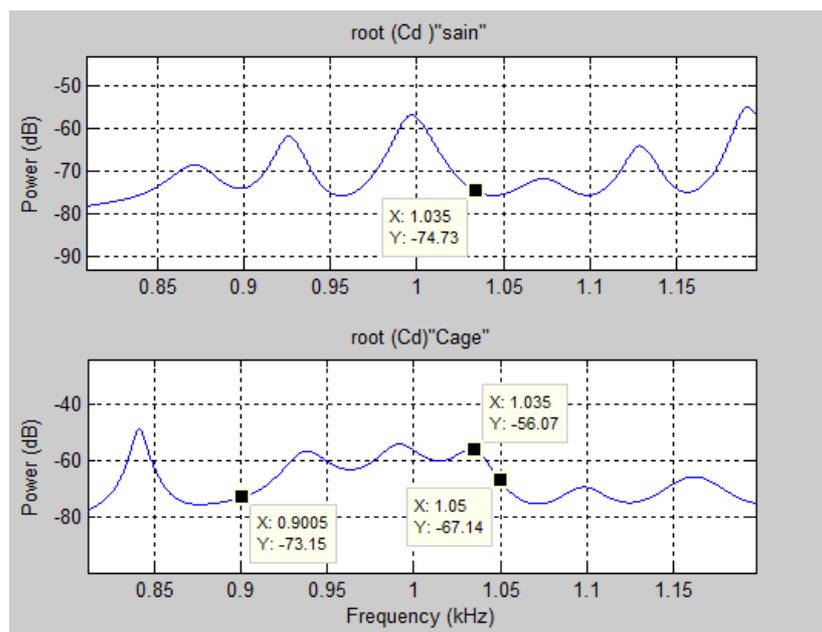


Figure IV.12: spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de cage de bille

l'absence d'harmonique multiple de trois et apparemment validé (absence de fréquence à 1050 Hz et 900 Hz ).On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la  $f_s$  à la valeur 1035 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

La figure (IV.13) représente les spectres des coefficients d'approximation correspondant au défaut de cage de bille

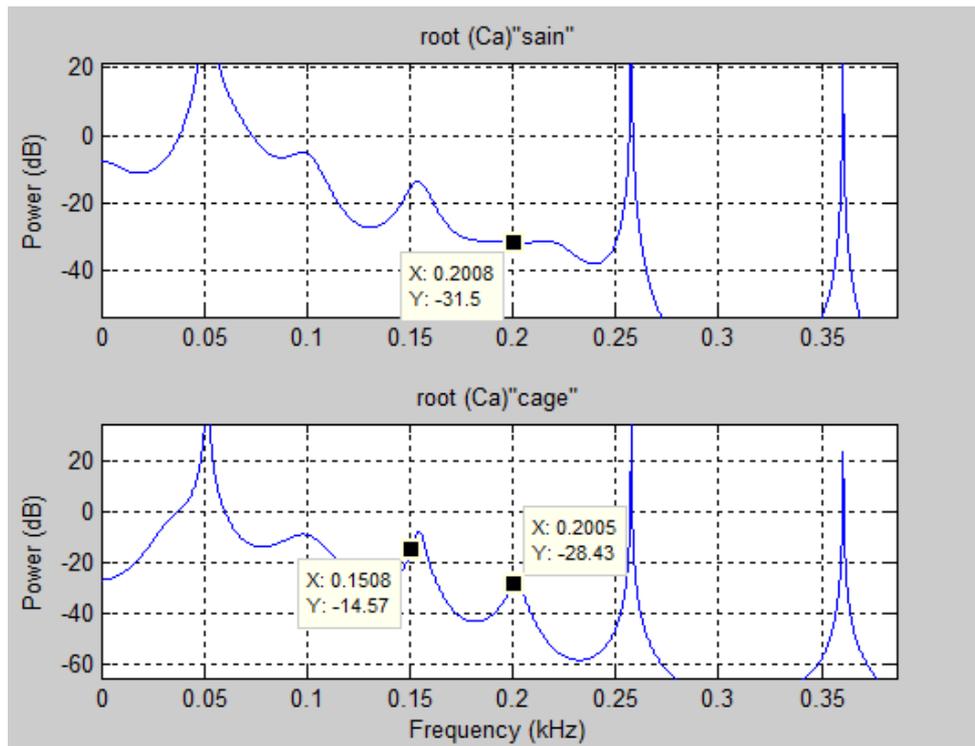


Figure IV.13: spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de cage de bille

A cette échelle, l'absence d'harmonique multiple de trois n'est pas validée à 150 Hz. On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la  $f_s$  à la valeur 200 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche

### Défaut de bille

La figure (IV.14) représente les spectres des coefficients de détail du défaut de bille

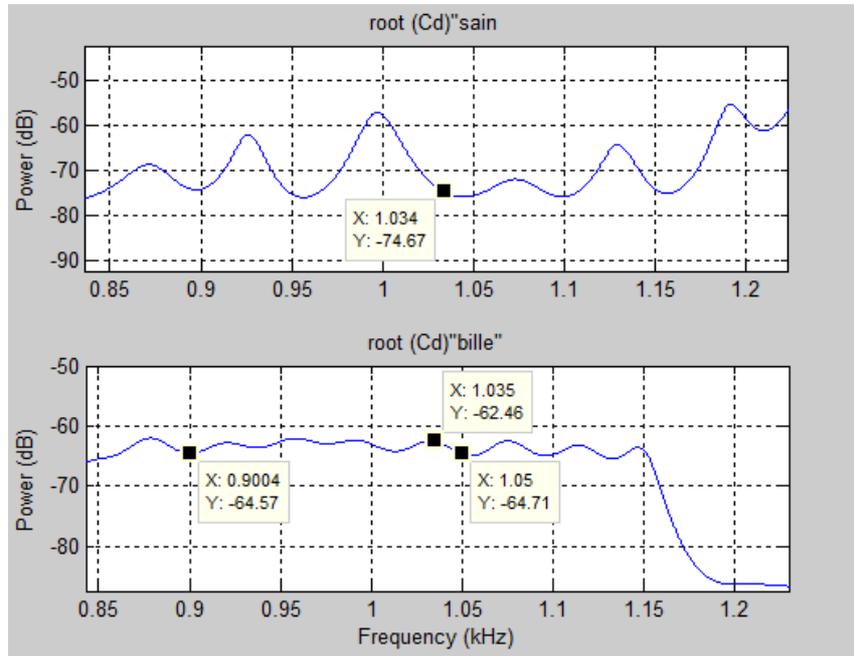


Figure IV.14: spectre des coefficients de détail avec et sans défaut de bille

l'absence d'harmonique multiple de trois et apparemment validé (absence de fréquence à 1050 Hz et 900 Hz). On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la  $f_s$  à la valeur 1035 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

La figure (IV.15) représente les spectres des coefficients d'approximation correspondant au défaut de bille

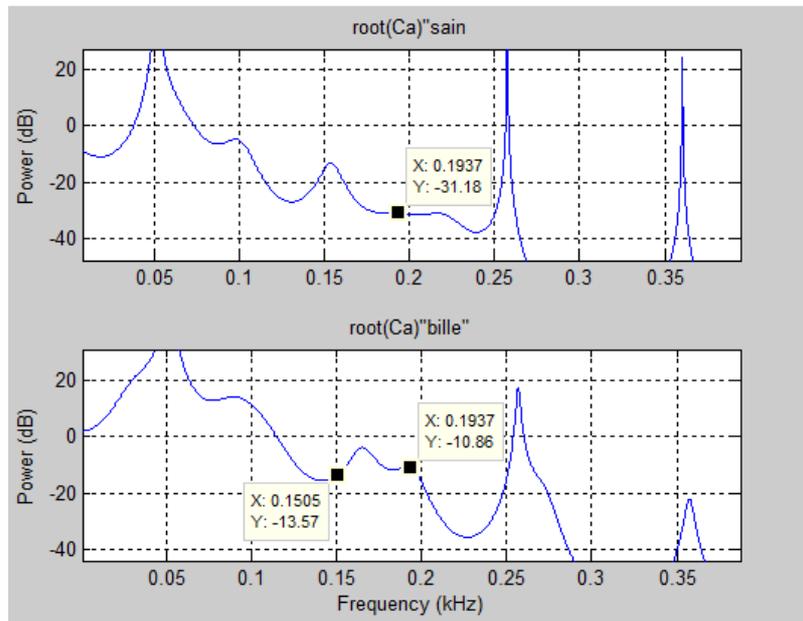


figure. IV.15: spectre des coefficients d'approximation avec et sans défaut de bille

## Chapitre IV : Simulation

L'absence d'harmonique multiple de trois est validée à 150 Hz et 300 Hz. On peut noter la présence d'un harmonique ne correspond à aucune multiple de la fs à la valeur 194 Hz, il s'agit d'un harmonique d'encoche.

### Evaluation des résultats obtenue :

Les résultats obtenus graphiquement des fréquences d'encoches pour les différents défauts sont présentées dans les quatre tableau suivants :

➤ Pour le défaut de la bague externe :

Fichier testé pour la bague externe	Fencoche de 'Cd' obtenue	Fencoche de 'Cd' estimée	L'erreur %	Fencoche de 'Ca' obtenue	Fencoche de 'Ca' estimée	L'erreur %
Bague-ext1	1036 Hz	1037 Hz	-0.000964	356 Hz	379 Hz	-6.06
Bague-ext2	1033 Hz	1037 Hz	-0.003857	445 Hz	379 Hz	+17.4
Bague-ext3	1036 Hz	1037 Hz	-0.000964	300 Hz	379 Hz	-20.8
Bague-ext4	1033 Hz	1037 Hz	-0.003857	440 Hz	379 Hz	+16.09

**Tableau IV.2 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de la bague externe**

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients de détail = 0.0024 %

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients d'approximation= 15.08 %

➤ Pour le défaut de la bague interne :

Fichier testé pour la bague externe	Fencoche de 'Cd' obtenue	Fencoche de 'Cd' estimée	L'erreur %	Fencoche de 'Ca' obtenue	Fencoche de 'Ca' estimée	L'erreur %
Bague-int1	1033 Hz	1037 Hz	-0.003857	301 Hz	379 Hz	-20.5
Bague-int2	1028 Hz	1037 Hz	-0.00867	285 Hz	379 Hz	-24.8
Bague-int3	1030 Hz	1037 Hz	-0.00675	301 Hz	379 Hz	-20.5
Bague-int4	1026 Hz	1037 Hz	-0.0106	296 Hz	379 Hz	-21.89

**Tableau IV.3 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de la bague interne**

## **Chapitre IV : Simulation**

---

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients de détail = 0.0074 %

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients d'approximation= 24.42 %

➤ Pour le défaut de cage de bille :

Fichier testé pour la bague externe	Fencoche de 'Cd' obtenue	Fencoche de 'Cd' estimée	L'erreur %	Fencoche de 'Ca' obtenue	Fencoche de 'Ca' estimée	L'erreur %
Roulementcage1	1035 Hz	1037 Hz	-0.0019	200 Hz	379 Hz	-47.22
Roulementcage2	1042 Hz	1037 Hz	+0.0048	204 Hz	379 Hz	-46.17
Roulementcage3	1037 Hz	1037 Hz	0	201Hz	379 Hz	-46.96
Roulementcage4	1029 Hz	1037 Hz	-0.0077	201 Hz	379 Hz	-46.96

**Tableau IV.4 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de cage de bille**

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients de détail = 0.0036 %

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients d'approximation= 46.82 %

➤ Pour le défaut de bille :

Fichier testé pour la bague externe	Fencoche de 'Cd' obtenue	Fencoche de 'Cd' estimée	L'erreur %	Fencoche de 'Ca' obtenue	Fencoche de 'Ca' estimée	L'erreur %
Roulementbille1	1035 Hz	1037 Hz	-0.0019	194 Hz	379 Hz	-48.81
Roulementbille2	1031 Hz	1037 Hz	-0.0058	196 Hz	379 Hz	-48.28
Roulementbille3	1033 Hz	1037 Hz	-0.003857	192Hz	379 Hz	-49.34
Roulementbille4	1031 Hz	1037 Hz	-0.0058	197 Hz	379 Hz	-48.02

**Tableau IV.5 : les valeurs obtenues graphiquement des fréquences d'encoches pour le défaut de bille**

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients de détail = 0.0043 %.

L'erreur moyenne des Fe correspond aux coefficients d'approximation= 48.61 %.

### **Observation :**

Les résultats obtenus nous montrent clairement l'augmentation d'erreur de calcul correspond aux coefficients d'approximation par rapport aux petites valeurs d'erreur correspond aux coefficients de détail .tel que les fréquences

d'encoche de ces derniers sont presque toujours le plus proche possible aux fréquences calculés théoriquement

### Interprétation des résultats :

➤ L'analyse spectrale à haute résolution nous a permis de mettre en évidence l'existence d'un ou plusieurs défauts. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composants de fréquence présents dans le spectre fréquentiel des coefficients d'ondelette du courant statorique permet de détecter les fréquences de ces défauts par la présence des harmoniques

$$f_e = f_s \left( \frac{k \cdot N_b}{p} (1 - g) \right) + 1$$

➤ Au point de vue des résultats de la simulation, on peut affirmer que la manifestation des raies est un signe de l'existence des défauts.

➤ En générale, l'analyse spectrale à haute résolution nous a permis de valider certains résultats mais montre aussi les limitations d'une telle approche, car l'utilisation des coefficients d'ondelette d'approximation du courant statorique pour différentes défauts entraîne des problèmes de recouvrement des signatures vu la richesse et la complexité de ce spectre ; c'est pour ces raisons on a proposé l'utilisation des coefficients d'ondelette de détail pour l'estimation des différents fréquences de défauts.

### IV .4.Conclusion :

On conclut dans ce chapitre, et d'après les résultats de simulation obtenus que :

La méthode à haute résolution Root-Music permet d'obtenir des résultats très significatifs pour l'identification des défauts de roulement dans un moteur asynchrone a cage d'écureuil, elle a une bonne efficacité sur les coefficients d'ondelette de détail mais elle peut faiblement détecter les défauts sur les coefficients d'ondelette d'approximation .

### **Conclusion général**

*Le travail qui a été présenté tout au long de ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts affectant les moteurs asynchrone à cage pour leur surveillance en ligne par emploi de la transformée en ondelette et l'algorithme ROOT-MUSIC.*

*Le diagnostic des défauts a porté sur la localisation de leur harmonique caractéristiques contenus dans le spectre du courant statorique .La procédure de surveillance a consisté à la décomposition de ce spectre en bases fréquences et hautes fréquences à l'aide de la technique d'ondelette.*

*Nous avons effectué l'analyse spectrale de ces fréquences par «ROOT-MUSIC » pour les différents cas de fonctionnement de moteur. La présence d'harmoniques caractéristiques pour chaque type de défaut dans le spectre du fréquence et déceler ainsi la présence des défauts.*

*Le système ainsi conçu offre la possibilité d'automatiser le diagnostic des défauts affectant les moteurs à cage, par l'emploi de la méthode du spectre de hautes fréquences (coefficients de détail) et l'analyse spectrale à haute résolution. Ceci montre que l'association des techniques d'analyse fréquentielle à celles du traitement de signal à haute résolution est un outil efficace pour la maintenance prédictive vu les avantages que procurent ces techniques ou les défauts de roulement naissants sont détectables.ces résultats encourageants ouvrent de nouveaux horizons dans le domaine de la surveillance en ligne des machines électriques.*

*Enfin, dans un cadre plus général du diagnostic et de la surveillance des machines électriques, il faut élargir cette étude pour d'autres types de défaut et pour d'autre type de machines.*

# ***BIBLIOGRAPHIE***

# BIBLIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Bouzida .diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008
- [2] S.BEL. Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Thèse de Magister .Université Mohamed Boudiaf de M'sila Algérie 2006.
- [3] Ayad Mouloud :” Etude comparative d’algorithme de la transformée en ondelettes: Application à l’analyse des signaux empiriques ». Thèse de magister. Université Ferhat Abbas Sétif. 2005
- [4] Albert Cohen : « Les bases d’ondelettes », Technique de l’ingénieur AF 210, 2002.
- [5] Yves Meyer, Stéphane Jaffard, Olivier Rione : « L’analyse par ondelettes ». Pour la science. Septembre 1987. mensuel N°119, pp. 28-37.
- [6] Michel Misiti, Yves Misiti, : « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.
- [7] Ayad Mouloud :” Etude comparative d’algorithme de la transformée en ondelettes: Application à l’analyse des signaux empiriques ». Thèse de magister. Université Ferhat Abbas Sétif. 2005
- [8] Mahgoun Hafida : « Analyse et caractérisations des signaux vibratoires cyclo-stationnaire ».Thèse de magister, IOMP, Université Ferhat Abbas Sétif, 2000.
- [9]Boulenger A., Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
- [10]F.Tafinine, K.mokrani, K.hamasse. « Diagnostic des Machines Asynchrone par Analyse Spectrale du Courant Statorique ». Proceeding Conférence Nationale sur le Génie Electrique, CNGE’04, pp 256-260, Tiaret ,Novembre 2004.
- [11]-PDF : Algorithmes de Support Vecteur Machines, Sébastien Gadat ,Laboratoire de Statistique et probabilité UMR 5583CNRS-UPS, [www.lsp.ups-tlse.fr/gadat](http://www.lsp.ups-tlse.fr/gadat)
- [12]-PDF : « Support Vector Machines », Arnaud Revel, revel.arnaud@gmail.com.
- [13]-PDF : « SVM et méthodes à noyau », Vincent Barra, 15 juin 2006.
-

# *ANNEXES*

Annexe A

Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé :

Constructeur	<b>AZAZGA (ALGERIE)</b>
Puissance	<b>3 KW</b>
Tension nominale	<b>380 V</b>
Branchement	<b>(<math>\Delta</math>)</b>
Courant nominale	<b>7 A</b>
Cos ( $\varphi$ )	<b>0.83</b>
Nombre de pôle	<b>4</b>
Nombre de barres rotoriques	<b>28</b>
Vitesse nominale	<b>1410tr/mn</b>
Classe d'isolation	<b>F</b>

**Tableau VI.1 : Caractéristiques du moteur asynchrone**

---

## Annexe B

---

### Annexe B

Paramètre de la machine entraîné (génératrice à courant continu) :

Constructeur	<b>DELORENZO</b>
Puissance	<b>2.4KW</b>
Tension d'induit	<b>220V</b>
Courant d'induit	<b>10.9A</b>
Courant d'excitation	<b>0.65A</b>
Type d'excitation	<b>séparée</b>
Vitesse nominale	<b>1410tr/mn</b>
Classe d'isolant	<b>F</b>

**Tableau VI.2 : Paramètre de génératrice**

---

Annexe C

**Paramètre de Roulement coté ventilateur référence 6025-ZZ**

Dimensions :	Roulement 6205 (coté ventilateur)
Diamètre de la bille $D_b$	9.525
Diamètre de la bague extérieure $D_{bext}$	52
Diamètre de la bague intérieure $D_{bint}$	25
Diamètre de la cage $D_c$	38.5
Nombre de billes $N_b$	9
Angle de contact $\beta$	0

**Tableau VI.3 : Paramètre de Roulement**

---

### Annexe D

#### Propriété du signal d'harmonique d'encoche :

Ce signal possède plusieurs caractéristiques qui rendent son exploitation sensible

Sa faible amplitude est la première difficulté .accompagnée d'un environnement fréquentiel proche et d'amplitude équivalente. ce qui marque une contrainte supplémentaire .le troisième point est la très large plage de fréquence à couvrir .directement lié à la fréquence statorique .

Enfin, la dernière difficulté repose sur les larges variations de glissement pour les faibles fréquences statoriques .

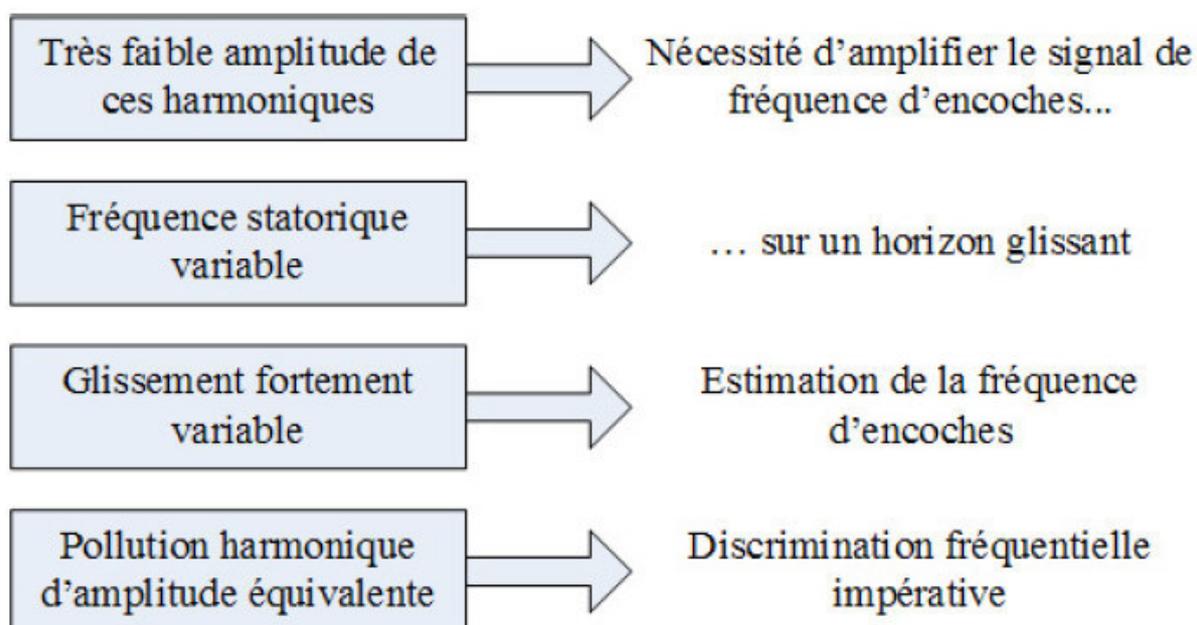


Figure VI.1 : Caractéristiques du signal d'harmonique d'encoche

---

# Annexe E

---

## Annexe E

### Programme de simulation

```
S=input('Donner le nom du fichier à charger (.mat): ','s');
load(char(S))
IP=input('Combien de fréquences et de puissances voulez-vous
avoir: ','s');
p=eval(IP);
l=2*p;
N=512;
Fe=3.0921e+003;
% Te=1/Fe s;
[D_low,D_high]=wfilters('db45');
L = WMAXLEV(length(ia),'db45')
N=(floor(length(ia)/2^L))*2^L

[ca,cd] = swt(ia(1:N),L,D_low,D_high); % décomposition par
ondelette
figure(1)
subplot(211)
plot(ca(L,:))
subplot(212)
plot(cd(L,:))

X=corrmtx(ca(1,1:length(ca)),4*1);
[F,P]= rooteig(X,l,Fe); %Estimation des fréquences
et puissances
figure(2) %correspondantes
subplot(211)
peig(X,l,N,Fe);
hold on

y=corrmtx(cd(1,1:length(cd)),4*1);
[F,P]= rooteig(y,l,Fe); %Estimation des fréquences
et puissances
figure(3) %correspondantes
subplot(211)
peig(y,l,N,Fe);
hold on
```

---

