

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine Electrique

Réf: .....

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:**

**MASTER**

*Thème*

**Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires et d'excentricité mixte  
dans un moteur asynchrone triphasé en utilisant la transformée en  
ondelettes**

Présenté par :

*Mehdi Bechar*

Soutenu le: 31 Mai 2016

Devant le jury composé de :

*Mr. Sahraoui Mohamed*

*MC 'A'*

*Président*

*Mr. Khaled Yahia*

*MC 'A'*

*Encadreur*

*Mr. Dendouga Abdelhakim*

*MC 'A'*

*Examineur*

**Année universitaire: 2015 / 2016**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires et d'excentricité mixte  
dans un moteur asynchrone triphasé en utilisant la transformée en  
ondelettes**

**Présenté par :**

*Bechar Mehdi*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Dr. Khaled Yahia*

*signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

*Dr. Sahraoui Mohamed*

*Signature*

**Cachet et signature**

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : machine Electrique

## *Thème :*

**Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires et d'excentricité mixte  
dans un moteur asynchrone triphasé en utilisant la transformée en  
ondelettes**

Proposé par : *Bechar Mehdi*

Dirigé par : *Dr. Khaled Yahia*

# **Remerciements**

*Je remercie, avant tout, Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé parmi ses innombrables grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.*

*Mes plus vifs remerciements vont à mon encadreur pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement, **YAHIA Khaled**, Maître de conférences à l'Université Mohamed Khider de Biskra.*

*Mes remerciements vont à mon collègue **LAADJEL Khaled** et à mon amie **RACHID Mostafa Amine** sur l'esprit de coopération au cours de la réalisation de notre mémoire.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance de ce mémoire :*

***Dr. Mohamed Sahraoui**, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

***Dr. Dendouga Abdelhakim**, pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.*

*Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à **Dr. Mohamed Sahraoui** et tous mes professeurs qui m'ont inculqué les fondements scientifiques tout au long des cursus de mon étude.*

*Mes derniers mots s'adressent tous particulièrement à ma famille : mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs et tous mes amis.*

# *Dédicace*

*À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle mit au monde,  
À mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés,  
Pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer,  
À mon frère et sœurs, à toute ma famille.*

*À tous mes amis.*

*Je dédie ce modeste travail*

*Pour chacun des oublié mon stylo n'a pas  
Oublié mon cœur.*

*Mehdi*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Etat de l'art de la machine asynchrone</b>	
<b>Introduction</b> .....	3
<b>I. 1. Constitution de la machine asynchrone</b> .....	3
I.1.1. Stator.....	4
I.1.2. Rotor.....	5
I.1.3. Organes mécaniques.....	5
<b>I. 2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone</b> .....	6
<b>I. 3. Principaux défauts dans la machine asynchrone triphasée a cage</b> .....	6
I.3.1. Défauts statoriques .....	7
I. 3. 1. 1. Court-circuit entre phases .....	7
I. 3. 1. 2. Court-circuit entre spires .....	8
I. 3. 1. 3. les dégats de court-circuit .....	8
I.3.2. Défauts rotoriques .....	9
I. 3. 2. 1. Cassure de barres .....	9
I. 3. 2. 2. Rupture des barres rotorique .....	9
I. 3. 2. 3. Défauts de roulement.....	10
I. 3. 2. 4. Défauts d'excentricité.....	11
<b>I. 4. Les causes des défauts</b> .....	12
<b>I. 5. Etudes statistiques</b> .....	13
<b>Conclusion</b> .....	14

## Chapitre II : Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

<b>Introduction</b> .....	15
<b>II.1 . Détection des défauts par traitement du signale</b> .....	15
1. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques.....	16
2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	17
3. Diagnostic par analyse des tensions statoriques induites.....	17
4. Diagnostic par analyse du couple électromagnétique .....	17
5. Diagnostic par analyse du courant statorique .....	17
6. Diagnostic par du vecteur de Park .....	17

7. Diagnostic par des puissances instantanées .....	18
8. Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI) .....	18
<b>II.2 . Méthodes dédiées au diagnostic de la machine asynchrone</b> .....	18
II. 2. 1. Méthodes basées sur un seul courant statorique .....	19
II. 2. 2. Méthodes basées sur les trois courants statoriques .....	20
II. 2. 3. Méthodes basées sur les courants et tensions statoriques .....	21
<b>II. 3. La transformée de Fourier</b> .....	22
II. 3.1. Transformée de Fourier discrète .....	23
II. 3. 2. Transformée de Fourier Rapide (TFR) .....	23
<b>II.4 Transformée en ondelettes (TO)</b> .....	24
II.4.1. Les avantages de la transformée en ondelettes : .....	25
II.4.2. La transformée en ondelettes continue .....	25
II.4.3. Transformée en ondelette discrète (TOD) .....	27
<b>Conclusion</b> .....	30

### **Chapitre III : Diagnostic de défaut de court-circuit entre spires et l'excentricité mixte dans la machine asynchrone**

<b>Introduction</b> .....	32
<b>III. 1. Régime stationnaire</b> .....	32
III. 1. 1. Banc d'essai expérimental .....	32
III. 1. 2. Résultats expérimentaux de court-circuit .....	33
a) Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic .....	33
b) Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR).....	37
c) Analyse par la transformée en Ondelette discrète (TOD).....	41
<b>III. 2. Régime non stationnaire</b> .....	49
III. 2. 1. Banc d'essai expérimental .....	49
III. 2. 2. Résultats expérimentaux d'excentricité mixte.....	52
a) Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR).....	53
b) Analyse par la transformée en Ondelette (TOD).....	55
<b>Conclusion</b> .....	61
<b>Conclusion générale</b> .....	62
<b>Bibliographie</b> .....	64

# *Liste des tableaux*

<b>Tab. III.1 :</b>	Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.....	33
<b>Tab. III.2 :</b>	FSD obtenue par la TFR, pour les méthodes utilisées en fonction du nombre de spires en court-circuit, expérimental.....	41
<b>Tab. III.3 :</b>	FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction du nombre de spires en court-circuit en régime stationnaire, expérimental.....	46
<b>Tab. III.4 :</b>	FSD des méthodes utilisées en fonction du type de l'ondelette mère avec six(6) spires en court-circuit du moteur en régime stationnaire, expérimental.....	47
<b>Tab. III.5 :</b>	FSD de l'enveloppe de courant statorique ia en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	47
<b>Tab. III.6 :</b>	FSD du module du vecteur de Park (MVP) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	48
<b>Tab. III.7 :</b>	FSD de la puissance apparente (s)en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	49
<b>Tab. III.8 :</b>	Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).....	53
<b>Tab. III.9 :</b>	FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction de niveau de l'excentricité mixte du moteur en régime non stationnaire, expérimental.....	60



# *Liste des figures*

<b>Fig. I.1:</b> Constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	4
<b>Fig. I.2:</b> Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone..	4
<b>Fig. I.3:</b> Représentation schématique d'un rotor à cage d'une machine asynchrone.	5
<b>Fig. I.4:</b> Représentation différent défauts statorique possible..	7
<b>Fig. I.5:</b> Exemples des dégâts au stator d'un moteur asynchrone.....	8
<b>Fig. I.6:</b> Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut.....	9
<b>Fig. I.7:</b> Rupture d'une portion adjacente d'anneau de court-circuit.....	10
<b>Fig. I.8 :</b> Roulements à billes.....	10
<b>Fig. I.9 :</b> Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.	11
<b>Fig. I.11 :</b> Causes Internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	12
<b>Fig. I.12 :</b> Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	13
<b>Fig. I.13:</b> Répartition des défauts de la machine asynchrone de moyenne puissance.	13
<b>Fig. I.15:</b> Répartition des défauts de la machine asynchrone de grande puissance.....	14
<b>Fig. II.1:</b> Points de mesures.....	15
<b>Fig. II.2:</b> Représentation temporelle vers fréquentielle.....	22
<b>Fig. II.3:</b> Représentation temporelle vers ondelettes.....	24
<b>Fig. II.4:</b> Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes $\Psi_{a1,b1}$ et $\Psi_{a0,b0}$ .....	27
<b>Fig. II.5:</b> Principe de la décomposition par la (TOD) au niveau n.....	29
<b>Fig. III.1:</b> Allures temporelles de L'enveloppe du courant statorique $i_a$ (Env $i_a$ ) un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	34
<b>Fig. III.2:</b> Allures temporelles de module de vecteur de Park (MVP) un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	35

<b>Fig. III.3:</b> Allures temporelles la puissance apparente (s) un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	36
<b>Fig. III.4:</b> Signature de l'enveloppe du courant statorique $i_a$ ( $Env_{i_a}$ ),obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	38
<b>Fig. III.5:</b> Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	39
<b>Fig. III.6:</b> Signature de la puissance apparente (s), obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	40
<b>Fig. III.7:</b> FSD des méthodes utilisées pour un moteur fonctionnant avec six (6) spires en court-circuit .....	41
<b>Fig. III.8:</b> Signature de l'enveloppe du courant statorique $i_a$ ( $Env_{i_a}$ ), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	43
<b>Fig. III.9:</b> Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	44
<b>Fig. III.10 :</b> Signature de la puissance apparent (s), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.....	45
<b>Fig. III.11:</b> FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées (MVP, s) en fonction du nombre de spires court-circuitent en régime stationnaire.....	46
<b>Fig. III.12:</b> FSD du (MVP) en fonction du type de l'ondelette mère avec six(6) spires en court-circuit du moteur en régime stationnaire, expérimental .....	47
<b>Fig. III.13:</b> FSD de l'enveloppe de courant statorique $i_a$ en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	48
<b>Fig. III.14 :</b> FSD du module du vecteur de Park (MVP) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	48
<b>Fig. III.15:</b> FSD de la puissance apparente (s)en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).....	49
<b>Fig. III.16 :</b> Banc d'essai expérimental.....	50
<b>Fig. III.17 :</b> Mécanisme spécial de changement de l'excentricité statique. ....	51
<b>Fig. III.18 :</b> Profile du couple de charge arbitrairement variable imposé dans les tests de simulation et expérimentaux.....	52

<b>Fig. III.19</b> :Spectres du $Env \mathbf{i}_a$ (a) et la puissance apparent (s) (b), du moteur avec 66.7 % d'ES en régime non stationnaire, expérimental.....	54
<b>Fig. III.20</b> : Signature de l'enveloppe du courant $\mathbf{i}_a(Env \mathbf{i}_a)$ , obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain (b) 16.7 % ES.....	56
<b>Fig. III.20</b> : Signature de l'enveloppe du courant $\mathbf{i}_a (Env \mathbf{i}_a)$ , obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 66.7% ES.....	57
<b>Fig. III.21</b> : Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain .....	57
<b>Fig. III.21</b> : Signature du MVP, obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 16.7 % ES, (c) 66.7% ES.....	58
<b>Fig. III.22</b> : Signature de la puissance apparent (s), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain, (b) 16.7 % ES.....	59
<b>Fig. III.22</b> : Signature de la puissance apparent (s), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 66.7% ES.....	60
<b>Fig. III.23</b> : FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées pour un moteur asynchrone fonctionnant en régime non stationnaire avec 66.7 % ES et 10 % ED .....	60

# Liste des symboles

$p$ :	Nombre de paires de pôles.
$Nb$ :	Nombre de barres rotoriques.
$g$ :	glissement.
	$W$ : Vitesse angulaire électrique du rotor
$f$ :	Fréquence d'alimentation.
$f_r$ :	Fréquence rotorique.
$f_{he}$ :	Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
$f_{cc}$ :	Fréquence caractéristique du défaut court-circuit.
$l_d$ :	Nombre de niveaux de la décomposition.
$f_{exc\ mix,1}$ :	Caractéristique d'excentricité mixte dans le spectre du courant statorique.
$f_{exc\ mix,1}$ :	Caractéristique d'excentricité mixte dans les spectres des signaux démodulés.
$Env\ a\ i$ :	Enveloppe du courant statorique $a\ i$ .
$TH$ :	Transformée de Hilbert
$MVP$ :	Module de vecteur de Park.
$FP$ :	Facteur de puissance.
$PRI$ :	Puissance réactive instantanée.
$TFR$ :	Transformée de Fourier rapide.
$TO$ :	Transformée en ondelettes.
$TOD$ :	Transformée en ondelettes discret.
$FSD$ :	Facteur de sévérité de défaut.
$RTF$ :	Représentation temps fréquence.
$DWV$ :	Distribution de Wigner Ville.
$Sig.\ Orig\ (t)$ :	Signal original en fonction du temps.

# *Introduction générale*

Les objectifs des différentes structures industrielles sont toujours liés à l'augmentation de la qualité, la productivité et la rentabilité. Les moteurs asynchrones sont les plus répandus dus à leurs avantages à savoir, une construction simple, une grande robustesse et un rendement élevé, l'avantage d'être alimentée directement par le réseau triphasée, son prix est moins chère a puissance donnée par rapport aux autre machines, aussi grâce au progrès de l'électronique, elle est utilisée dans les applications nécessitent une vitesse variable, en faisant appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel.

Malgré sa fiabilité et sa robustesse, la machine asynchrone subit, au cours de son fonctionnement, un certains nombres de contraintes de différentes natures (électriques, mécaniques et environnement). Ces dernières induits des défaillances qui peuvent conduisent à des arrêts non programmés, à des pertes de production, à des réparations coûteuses et peuvent entraîner de graves conséquences sur la sécurité des personnes, des matériels et d'environnement.

Les exigences de sûreté de fonctionnement et de productivité des installations industrielles ont motivé un effort important de recherche et de développement pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone. Le diagnostic des défauts est réalisé en utilisant la transformée de Fourier (TFR) et de l'ondelette discrètes (TOD). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous décrivons la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution et le principe de fonctionnement de la machine, nous présentons les différents défauts qui peuvent affecter les différentes parties de la machine. Ainsi que les causes et les conséquences de la défaillance.

Dans la première partie du second chapitre, nous donnons les diverses méthodes de détection de défauts dans ces machines. Nous présentons ensuite une étude détaillée des méthodes de diagnostic utilisées dans ce travail. Le premier groupe contient les méthodes basées sur l'analyse du contenu spectral d'un seul courant statorique (enveloppe  $Env i_a$ ). Le deuxième groupe contient les méthodes basées sur l'analyse du contenu spectral des trois courants statoriques à travers le courant statorique direct  $i_{ds}$ , le courant statorique en quadrature  $i_{qs}$  et le module du vecteur de Park ( $MVP$ ). Le troisième groupe contient les

méthodes basées sur l'analyse du contenu spectral à la fois des courants et tensions la puissance apparent ( $s$ ). La seconde partie de ce chapitre sera consacré à une étude théorique plus détaillée des techniques de traitement de signal en particulier la transformé de Fourier rapide ( $TFR$ ) la transformées en ondelettes ( $TO$ ).

Le dernier chapitre comporte deux parties, la première partiesera consacrée à la présentation des résultats expérimentaux de diagnostic du défaut de court-circuit entre spires en régime stationnaire (couple de charge constant), et la seconde partie expose les résultats expérimentaux du défaut d'excentricité mixte en régime non stationnaire (couple de charge variable) dans le moteur asynchrone triphasé. Ces défauts sont diagnostiqués en utilisant la transformée de Fourier rapide ( $TFR$ ) pour l'analyse spectrale et la caractérisation de l'effet des défauts est réalisée en évaluant l'énergie dans les bandes de fréquence obtenue par l'analyse de l'ondelette (TOD).

Enfin une conclusion générale où on présente une synthèse des résultats obtenus et quelques perspectives pour l'amélioration de ce travail.

**Chapitre I**

# Etat de l'art du diagnostic de la machine asynchrone

**Introduction**

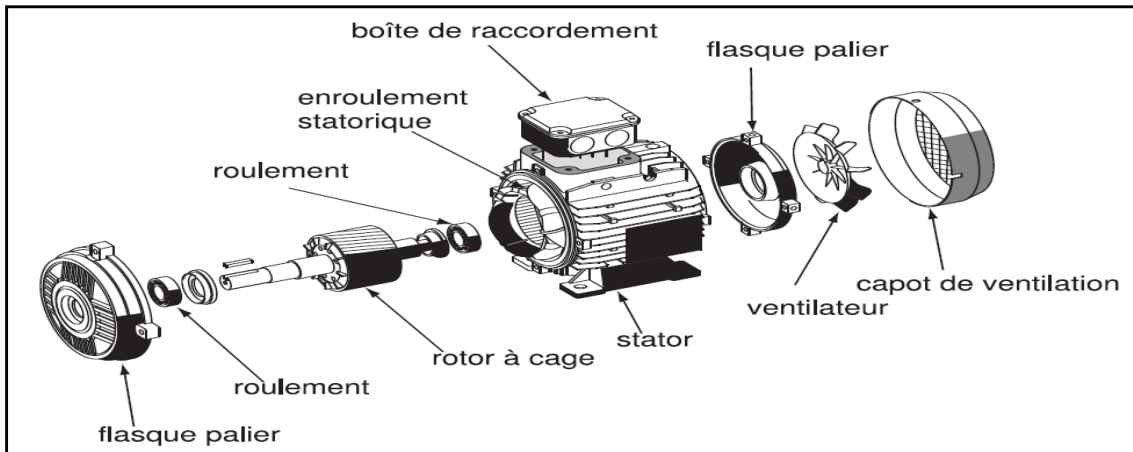
Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

La machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car elle offre alors le meilleur rapport qualité prix, surtout depuis l'apparition dans les années 1970 de variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation du moteur dans une large gamme. Cette machine peut, selon sa construction, être reliée à un réseau monophasé ou triphasé.

**I. 1. Constitution de la machine asynchrone**

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction (le flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique est produit à partir de l'induction [1]), comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

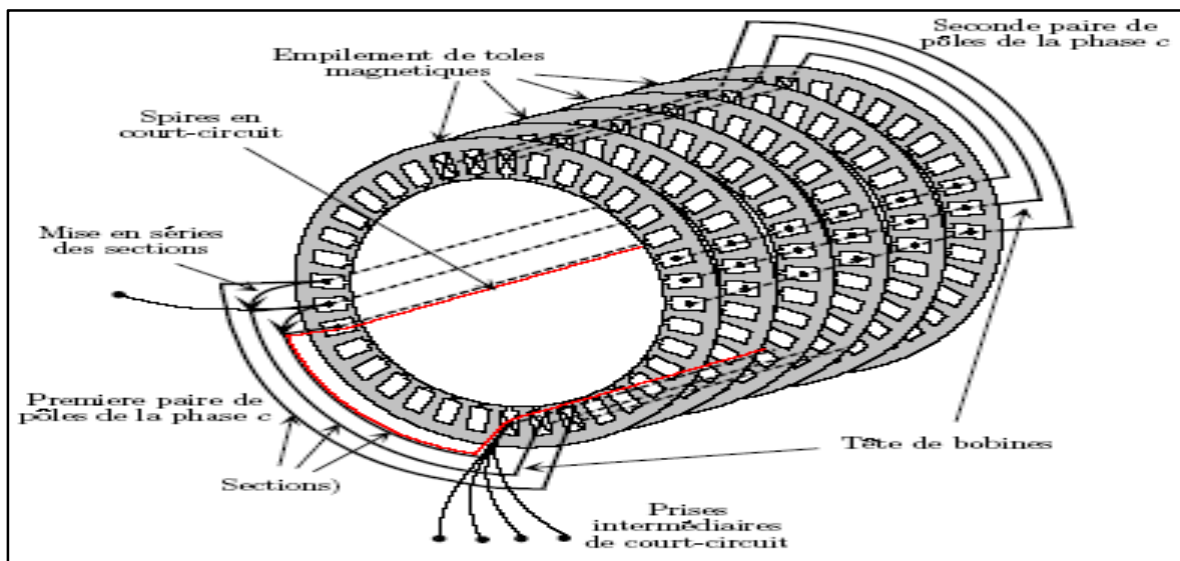
Nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Fig. I.1.



**Fig. I.1 :** Constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

### I.1.1.Stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varié entre 0.35 et 0.50mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis. Le bobinage statorique est constitué de deux parties, les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

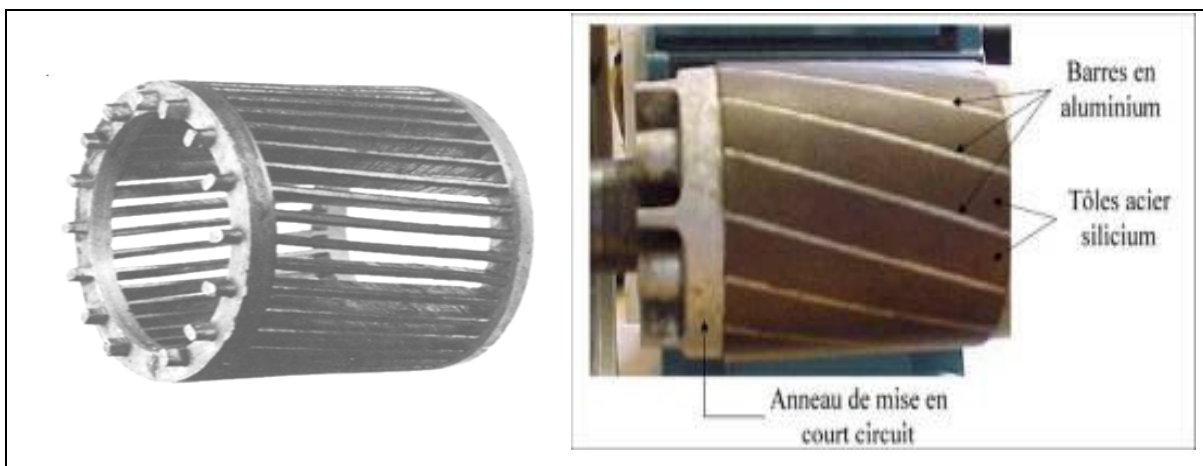


**Fig. I.2 :** Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone.



### I.1.2. Rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine. Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre[2].



**Fig. I.3 :** Représentation schématique d'un rotor à cage d'une machine asynchrone.

### I. 1.3. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixe un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moule ou forge. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre des aux

dissymétries desreluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

## I. 2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

La machine asynchrone est basée entièrement sur les lois de l'induction. La machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $n$  différent du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotorique montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limité par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{Equ. I. 1})$$

Ou  $f$ : est la fréquence d'alimentation.

$p$ : Le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire lorsque  $n_1 \neq n$ , car dans le cas contraire, c'est à dire lorsque  $n_1 = n$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait dans l'enroulement rotorique.

Le rapport  $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$  est appelé glissement de la machine asynchrone.

## I. 3. Les principaux défauts dans la machine asynchrone triphasée à cage

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique[3].

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur[1], les pannes majeures peuvent être présentées comme suit:

### I.3. 1. Défauts statoriques

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résulte, suite à de grandes sollicitations de la machine accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal des bobinages. En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile poussière et humidité viennent se déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs. On peut regrouper les défauts statoriques comme suit:

- Défaut de court-circuit entre phases statorique
- Défaut de court-circuit entre spires d'une même phase
- Défaut d'ouverture d'une phase
- Défaut du circuit magnétique statorique (ruptures de tôles).

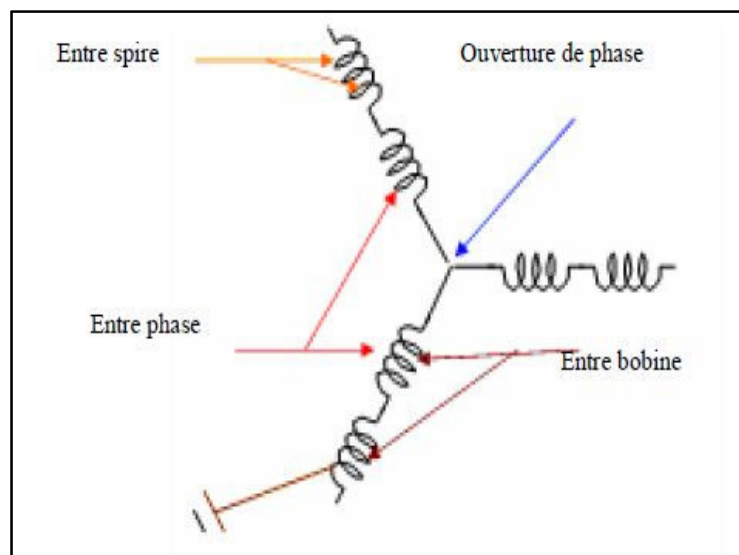


Fig. I. 4 : Représentation des différents défauts statorique.

#### I.3.1.1. Court-circuit entre phases

Le court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit

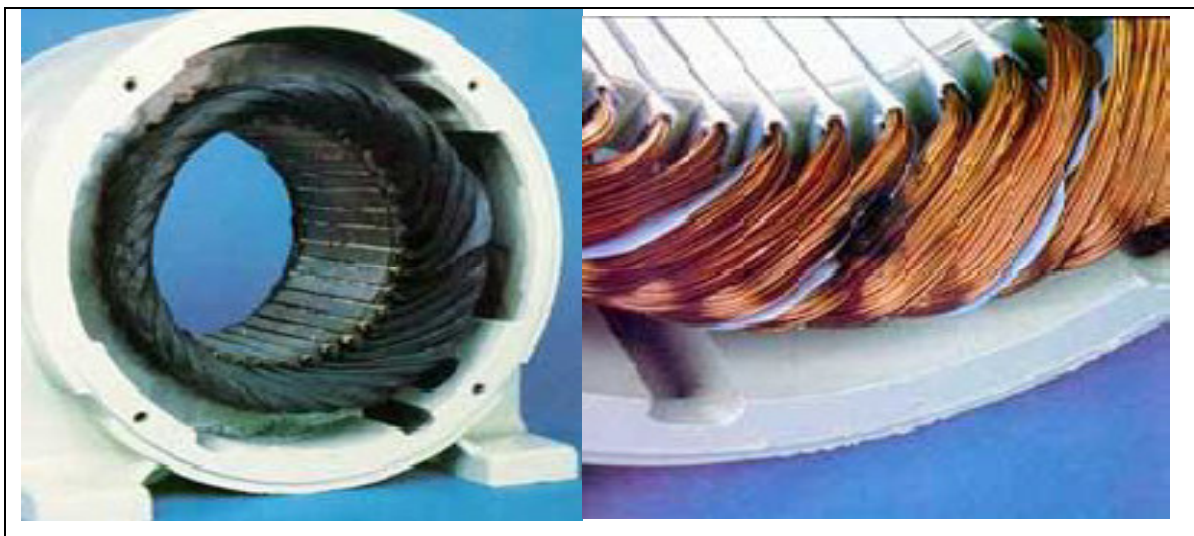
à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple. Ce type de défauts perturbe également de manière sensible les commandes développées sur la base du modèle de Park (hypothèse d'un modèle équilibré).

### I.3. 1.2. Court-circuit entre spire

Le court-circuit entre spires de même phase entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer un deuxième court-circuit. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

#### I.3.1.3. Les dégâts de court-circuit

La Fig. I. 5 représente deux exemples de dégâts provoqués par le défaut de court-circuit au stator. Les courts-circuits statoriques commencent généralement par un court-circuit localisé entre plusieurs spires d'un même enroulement (court-circuit entre spires), suite à la dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Ce type de phénomène peut de plus dégénérer en courts-circuits généralisés, comme des courts-circuits entre phases ou entre phase et terre.



**Fig. 1. 5 :** Exemples des dégâts au stator d'un moteur asynchrone.

### I.3.2. Défaits rotorique

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit.

- Défaut de cassure de barres.
- Défaut de cassure d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique rotorique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.
- Défaut d'excentricité statique et/ou dynamique.

#### I.3.2.1. Cassure de barres

Le problème des ruptures de barres dans les machines à induction a été l'objet de plusieurs travaux. L'information de la rupture de barre se trouve portée par le flux magnétique, et par conséquent dans le courant absorbé du réseau électrique, donc il est nécessaire de connaître les fréquences résultant d'une rupture de barres afin de pouvoir les détecter à travers une analyse spectrale de ces courants.

Suite à une rupture de barre, les circuits rotoriques créent en plus du champ rotorique direct, un champ magnétique inverse de pulsation  $-gf_s$  et qui est dû au déséquilibre des enroulements rotoriques (Fig. I.6). Cela a pour effet d'induire des forces électromotrices dans les circuits statoriques de fréquences  $(1 - 2g) f_s$ , et donc des composantes de courant à ces fréquences selon la relation [4]:

$$F_{défaut} = f_r - gf_s = (1 - g)f_s - gf_s = (1 - 2g)f_s \text{ (Equ.I.2)}$$

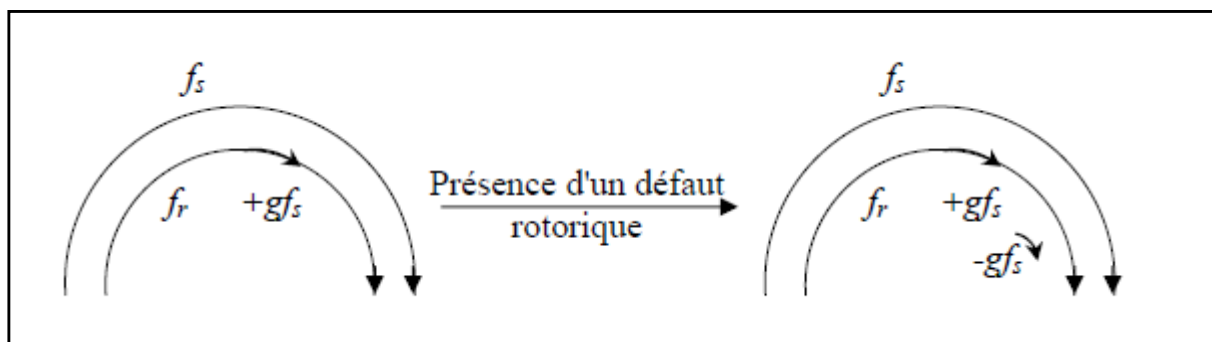


Fig. I.6 : schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut.

#### I.3.2.2. Rupture des barres rotoriques

Ce défaut doit être détecté rapidement afin de garantir un fonctionnement fiable du moteur et donc de l'installation globale et d'éviter sa propagation sur les autres barres rotoriques. La rupture des barres rotorique induit des modifications dans les courants

statorique et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristique dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale.

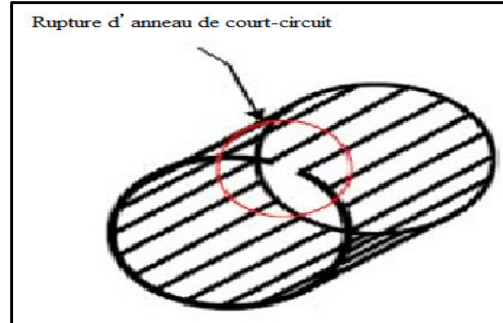


Fig. I. 7 : Rupture d'une portion adjacente d'anneau de court-circuit.

### I.3.2.3. Défauts de roulement

les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes au de rouleaux tournants. En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessus des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement prouduit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des rais spectrales de fréquences [5].

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (\text{Equ. I. 3})$$

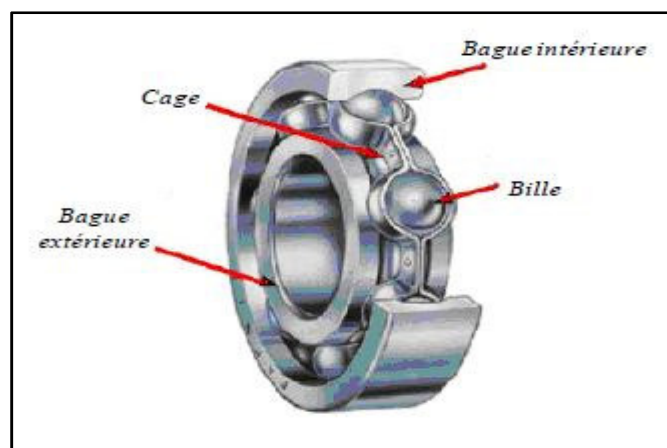


Fig. I. 8 : roulements à billes.

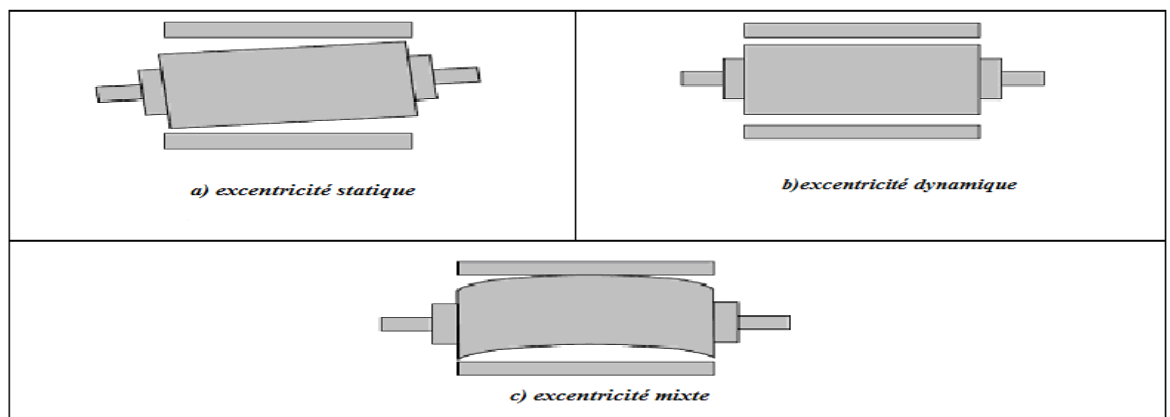
Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts :

- Appel supplémentaire de courant et fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés et des pertes de production.

#### I. 3. 2. 4. Défauts d'excentricité

L'excentricité de la machine est le résultat du non uniformité d'entrefer. Ce défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique. Il existe trois types d'excentricité (Fig. I.9).

- **Excentricité statique**: déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor,
- **Excentricité dynamique**: le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.
- **Excentricité mixte** : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.



**Fig. I. 9** : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par [1]:

$$f_{exe} = \left[ \left( \frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n_{\omega_s} \right] f \quad k = 1, 2, 3, \text{ (Equ.I. 4)}$$

$f$ : fréquence de l'alimentation.

$p$  : nombre de paires de pôles.

$N_b$ : Nombre de barres rotoriques.

$g$  : glissement.

$n_{\omega_s}$  : ordre des harmoniques de la FMM statorique

avec  $k$  un entier,  $n_{\omega_s} = 1, 2, 3, \dots$  et  $n_d$  l'ordre de l'excentricité.  $n_d$  égal à 0 pour l'excentricité statique et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique [5].

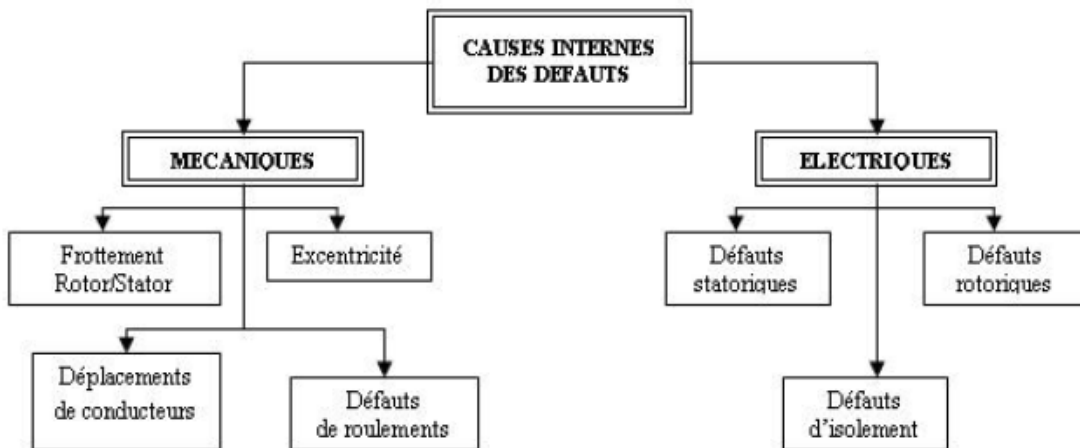
Une autre série d'harmoniques liés à l'excentricité mixte, apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par:

$$f_{exe} = |f \pm k f_r| \text{ (Equ.I. 5)}$$

tel que  $k$  est un entier positif.

#### I. 4. Les causes des défauts

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en en deux familles principales les Fig. I.10 et Fig. I.11 regroupent ces causes [5]:



**Fig. I. 10** : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.



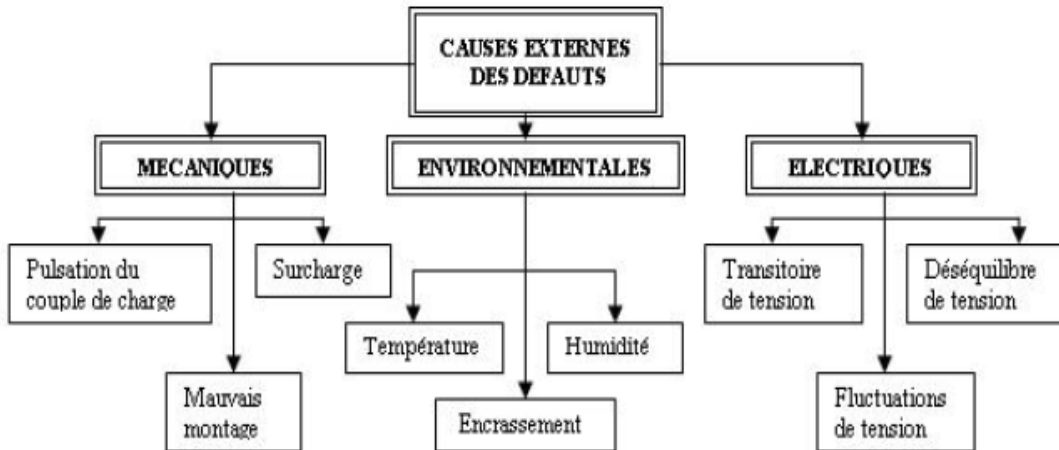


Fig. I. 11 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

### I. 5. Etude statistique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) a donné les résultats suivants:

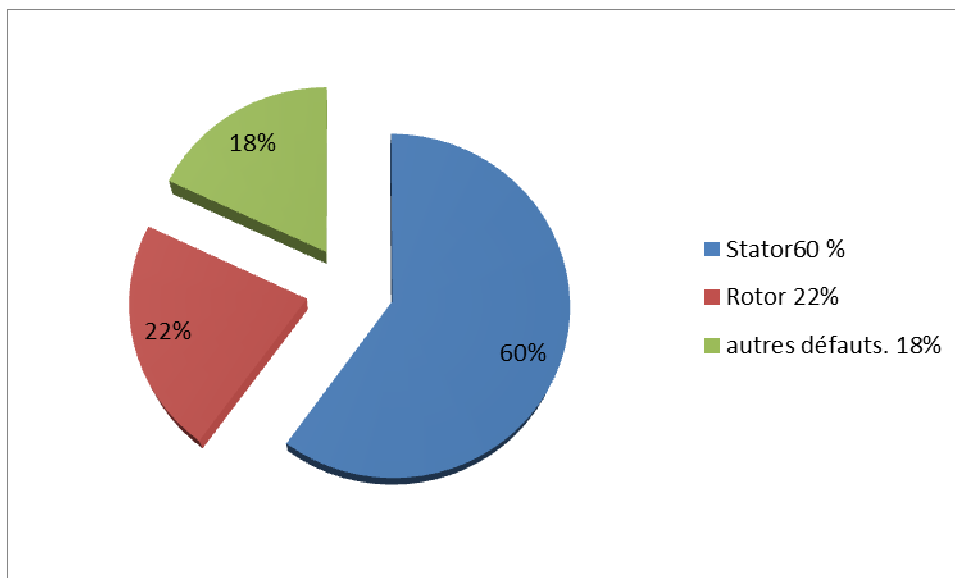
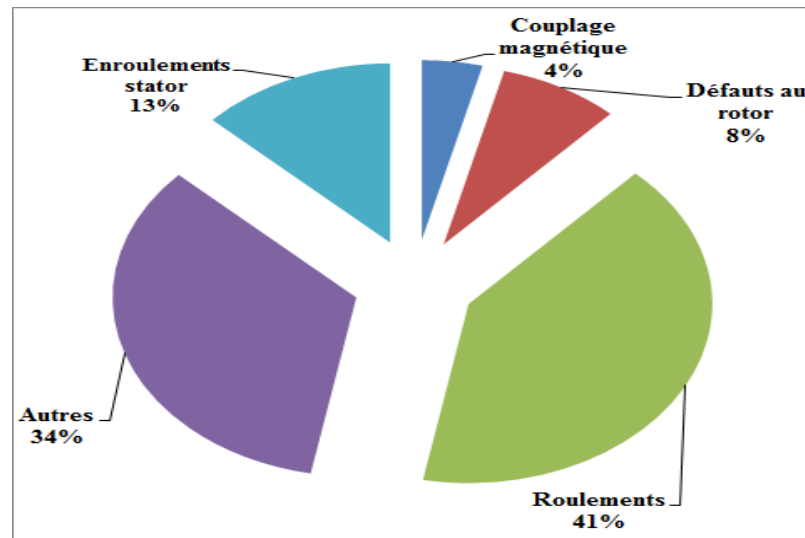


Fig. I. 12 : Répartition des défauts de la machine asynchrone de moyenne puissance.

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



**Fig. I. 13** : Répartition des défauts de la machine asynchrone de grande puissance.

Les contraintes mécaniques sont les plus grandes pour ce type de machines; ce qui explique la domination des défauts de roulements sur les défauts électriques.

## I. 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments de constitution du moteur asynchrone et le principe de fonctionnement de la machine et on a présenté les différents défauts qui peuvent affecter les différentes parties de la machine (court-circuit, rupture des barres, roulement ...) ainsi que les causes et les conséquences de la défaillance.

Les méthodes de traitement de signal et les signaux du moteur utilisés dans le diagnostic feront l'objet du second chapitre.

## Chapitre II

# Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

### Introduction

A cause les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, la puissance, le MVP...etc. Dans ce qui suit, Ce chapitre sera aussi consacré à une étude plus détaillée de la transformée de Fourier (FFT) en passant brièvement par la transformée en ondelette (TO).

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendant des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

### II. 1. Détection des défauts par traitement du signal

L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de la machine à induction à partir des informations données par des capteurs non invasifs. Les signaux utilisés sont les tensions (même la tension de neutre), les courants et le flux (ou de fuite) de la machine. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter des défauts électriques tels que la rupture totale ou partielle de barres ou d'anneaux ou l'excentricité au rotor et des court-circuits entre spires ou entre phases ou des déséquilibres dans l'alimentation au niveau du stator. La méthode de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT) sous sa forme réelle et complexe ainsi que la transformée de Fourier discrète (DFT) [6].

Les points de mesures des différents signaux (courant, flux, vibrations,...) à l'aide d'une variété des appareils sont illustrés par la Fig. II.2.

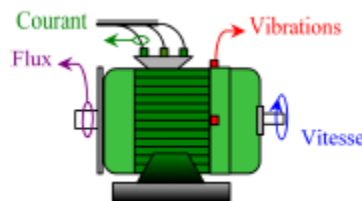


Fig. II.1 : Les points de mesures.

L'analyse d'un signal donc est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts. Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'autocorrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale. Parmi les méthodes appartiennent à cette approche, on peut citer :

### 1. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique [19]. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [7].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \text{ (Equ. II.1)}$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétomotrice ( $F_{mm}$ ) et de la perméance ( $P$ ).

$$\Psi_s = F_{mm} \cdot P \text{ (Equ. II.2)}$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

### 2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défauts, les courants et tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axiaux de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine

autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine peut être exploité pour détecter les différents défauts [8].

### **3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites**

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que de non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [9, 10].

### **4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [1].

### **5. Diagnostic par l'analyse du courant statorique**

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (TFR) est considérée comme référence dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Elle consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique. Cette méthode est très utilisée car elle est simple, peu coûteuse et facile à exécuter. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques [11, 12].

### **6. Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park**

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées  $i_{qs}$  et  $i_{ds}$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de vecteur de Park:  $i_{qs} = f(i_{ds})$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [13].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [13].

### 7. Diagnostic par l'analyse des puissances instantanées

L'utilisation des puissances instantanées pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones a fait l'objet des nombreux travaux [1]. Les puissances instantanées sont la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Le niveau d'informations apporté par ces grandeurs est donc plus grand que celui apporté par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques et électriques.

### 8. Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [14]:

- Logique floue,
- Réseaux neuronaux,
- Reconnaissance des formes.

## II. 2. Méthodes dédiées au diagnostic de la machine asynchrone [1]

Etant donné un moteur asynchrone triphasé sain alimenté par une source de tension triphasée sinusoïdale et entraînant une charge à couple constant. Les allures des courants et tensions statoriques peuvent être modélisées par :

$$\begin{cases} i_a(t) = I_M \cos(\omega t) \\ i_b(t) = I_M \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c(t) = I_M \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \text{(Equ. II.3)}$$

$$\begin{cases} v_a(t) = v_M \cos(\omega t + \varphi) \\ v_b(t) = v_M \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ v_c(t) = v_M \cos(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{cases} \text{(Equ. II.4)}$$

### II.2.1. Méthodes basées sur un seul courant statorique

L'enveloppe du courant statorique on peut être obtenu par la transformée de Hilbert.

$$\bar{i}_a(t) = 2I_M e^{j\omega t} \text{ (Equ. II.5)}$$

L'analyse du module instantané  $a(t)$  du courant statorique  $i_a$  (enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env i_a$ )) à l'état sain montre l'existence seulement d'une composante continue égale à  $2I_M$ .

Dans le cas de défaut de courts circuits par, l'amplitude du courant dans chaque phase est modulée par la fréquence caractéristique de défaut  $f_x$  donnée sous ces formes simplifiées:

$$i_{a,d}(t) = I_M \cos(\omega t) + [1 + \beta_1 \cos(2\pi f_x t)] \text{ (Equ. II.6)}$$

Avec :  $\beta_1$  est l'indice de modulation.

La transformée de Hilbert de ce courant est construite par le changement des fonctions  $\cos(\omega t)$  par des fonctions  $\sin(\omega t)$ , on obtient donc:

$$i_{a,d}(t) = I_M \sin(\omega t) + [1 + \beta_1 \sin(2\pi f_x t)] \text{ (Equ. II.7)}$$

Le signal analytique est obtenu en combinant (Equ. II.6)(partie réelle) et (Equ. II.7)(partie imaginaire), on aura :

$$\bar{i}_{a,d}(t) = I_M [1 + \beta \cos(2\pi f_x t)] (\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)) \text{ (Equ. II.8)}$$

Et donnée sous la forme module-argument comme suit :

$$\bar{i}_{a,d}(t) = I_M [1 + \beta_1 \cos(2\pi f_x t)] e^{j\omega t} \text{ (Equ. II.9)}$$

L'analyse du module  $a(t)$  du signal analytique du courant statorique  $i_a$  (enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env i_a$ )) à l'état de défaut montre l'existence d'une composante fréquentielle  $f_x$  caractéristique de défaut. Donc (Equ. II.9) peut être utilisée pour le cas de courts circuits entre spires où  $f_x = 2f_s$  mais aussi pour autre type de défaut tel que l'excentricité mixte où  $f_x = f_r$ .

### II.2.2.Méthodes basées sur les trois courants statoriques

La méthode du module de vecteur de Park (MVP) c'est une méthode plus connues simple [10,11], qui exploite le contenu spectral des trois courants statoriques. Les composantes  $i_{as}(t)$  et  $i_{\beta s}$  du vecteur de Park dans le repère lié au stator sont calculées à partir des courants statoriques  $i_a(t), i_b(t)$  et  $i_c(t)$  grâce aux deux relations suivant [1] :

$$\begin{cases} i_{as}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a(t) - \sqrt{\frac{1}{6}}i_b(t) - \sqrt{\frac{1}{6}}i_c(t) \\ i_{\beta s}(t) = \sqrt{\frac{1}{2}}i_b(t) - \sqrt{\frac{1}{2}}i_c(t) \end{cases} \quad (\text{Equ. II.10})$$

Pour le cas du fonctionnement idéal (sans défaut), les trois courants statoriques .donnés par permettent d'obtenir les composantes suivantes:

$$\begin{cases} i_{as}(t) = \sqrt{\frac{6}{2}}I_M \cos(\omega t) \\ i_{\beta s}(t) = \sqrt{\frac{1}{2}}I_M \sin(\omega t) \end{cases} \quad (\text{Equ. II.11})$$

Les composantes du vecteur de Park  $i_{qs}(t)$  et  $i_{ds}(t)$  dans le repère lié au champ tournant sont données par :

$$\begin{cases} i_{ds}(t) = i_{as}(t) \cos(\omega t) + i_{\beta s}(t) \sin(\omega t) \\ i_{qs}(t) = -i_{as}(t) \sin(\omega t) + i_{\beta s}(t) \cos(\omega t) \end{cases} \quad (\text{Equ. II.12})$$

Le module du vecteur de Park (MVP) est :

$$MVP = \sqrt{(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)} \quad (\text{Equ. II.13})$$

L'analyse des courants statoriques direct  $i_{ds}(t)$  en quadrature  $i_{qs}(t)$  et le module du vecteur de Park (MVP) à l'état sain montre qu'elles sont constantes et ses spectres contiennent seulement une composante continue.

A cause de court-circuit entre spires ou d'excentricité, les courants d'alimentation  $i_a(t), i_b(t)$  et  $i_c(t)$  du moteur peuvent être exprimés par :



$$\begin{cases} i_{a.d}(t) = I_M \cos(\omega t) + I_{dg.m} \cos[2\pi(f - f_x)t] + I_{dd.m} \cos[2\pi(f + f_x)t] \\ i_{b.d}(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{dg.m} \cos\left[2\pi(f - f_x)t - \frac{2\pi}{3}\right] + I_{dd.m} \cos\left[2\pi(f + f_x)t - \frac{2\pi}{3}\right] \\ i_{c.d}(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{dg.m} \cos\left[2\pi(f - f_x)t - \frac{4\pi}{3}\right] + I_{dd.m} \cos\left[2\pi(f + f_x)t - \frac{4\pi}{3}\right] \end{cases}$$

(Equ. II.14)

Ces courants conduisent au vecteur de Park avec les composantes suivantes :

$$\begin{cases} i_{as}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_M \cos(\omega t) + I_{dg.m} \cos[2\pi(f - kf_x)t] + I_{dd.m} \cos[2\pi(f + kf_x)t] \\ i_{\beta s}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_M \sin(\omega t) + I_{dg.m} \sin[2\pi(f - kf_x)t] + I_{dd.m} \sin[2\pi(f + kf_x)t] \end{cases}$$

(Equ. II.15)

Le carré du module de vecteur de Park sera donné comme suit [1] :

$$|i_{as} + ji_{\beta s}|^2 = \left(\frac{3}{2}\right) (I_M^2 + I_{dg}^2 + I_{dd}^2) + 3I_M I_{dg} \cos(2\pi f_x t) + 3I_M I_{dd} \cos(2\pi f_x t) + 3I_{dg} I_{dd} \cos(4\pi f_x t)$$

(Equ. II.16)

Dans ces conditions, il est clair que les spectres des courants statoriques direct  $i_{ds}(t)$  et en quadrature  $i_{qs}(t)$  et le module du vecteur de Park (*MVP*) contiennent une composante continue générée principalement par la composante fondamentale à 50 Hz du courant de moteur et des composantes fréquentielles caractéristiques de défauts à  $f_x$  et  $2f_x$ . Le défaut de court-circuit entraîne principalement l'apparition, dans les spectres des signaux précédents, des composantes harmoniques  $2f$ , lors que le défaut d'excentricité mixte entraîne l'apparition des composantes harmoniques  $f_r$ .

### II.2.3. Méthodes basées sur les courants et tensions statoriques

La puissance apparent ( $s$ ) est donnée par [1] :

$$\begin{aligned} \bar{s} = \overline{v} \vec{i} &= (v_{ds} + jv_{qs})(i_{ds} - ji_{qs}) = (v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) + j(v_{qs}i_{ds} + v_{ds}i_{qs}) \\ &= P_r + jq_i \end{aligned} \quad (\text{Equ. II.17})$$

Le défaut de court-circuit ou l'excentricité mixte sont caractérisés par la présence des harmoniques ( $f \pm f_x$ ) autour de la fréquence fondamentale dans le spectre du courant

statorique comme illustré dans (Equ. II.14). Les spectres de la puissance apparent ( $S$ ), pour le cas de défaut contiennent donc en plus de la composante continue, des composantes spectrales additionnelles à la fréquence de défaut  $f_x$ . Cette fréquence de défaut  $f_x$  est égale à  $2f$  pour le cas de défaut de court-circuit et  $f_x$  pour le cas de défaut d'excentricité mixte.

### II. 3. La transformée de Fourier

La série de Fourier joue un rôle considérable en électronique, et d'une manière générale dans l'étude des systèmes dynamiques.

Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal. Très tôt dans l'histoire du traitement du signal la transformée de Fourier afin de décomposer le signal en une fréquence fondamentale accompagné de ses harmoniques (les spectres). Chaque fréquence correspond à une fonction sinusoïdale. Donc l'analyse de Fourier est une analyse en fréquence d'un signal temporelle  $f(t)$  [15]



**Fig. II.2 :** Représentation temporelle vers fréquentielle [16].

Considérons le signal  $x(t)$  à temps continu. Si  $x$  est d'énergie finie, sa transformée de Fourier rapide ( $TF$ ) à la fréquence  $f$  est la suivante [1]:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \text{ (Equ. II.18)}$$

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f)e^{2\pi f t} df \text{ (Equ. II.19)}$$

### II. 3.1. Transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier discrète, généralement notée TDF d'une suite finie se calcul grâce à la relation:

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{j2\pi f k T}{NT}}$$

(Equ. II.20)

Où le terme N représente le nombre de point de calcul de TDF et pour  $k=0, \dots, N-1$

En pratique, on essaye d'avoir un nombre de point  $x$  de la suite  $x_s(n)$  supérieur ou égal au nombre de point de la TDF ( $x \geq N$ ).

La transformée de Fourier inverse, notée ITFD, se calcul grâce à la relation :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{\frac{j2\pi f k T}{NT}}$$

(Equ. II.21)

En décomposant l'exponentielle de (Equ. II.20), le nombre complexe  $f(k)$  peut se mettre sous la forme :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(kT) \cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) - j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(kT) \sin\left(\frac{2\pi n k}{N}\right)$$

(Equ. II.22)

Ces deux transformées permettent d'obtenir des temps de calcul réduits lorsqu'elles sont implantées dans un algorithme de calcul.

La TFD est par ailleurs utilisée, lorsque l'on travaille avec des suites numériques sans lien avec un signal physique, pour définir une représentation de la suite sur une base de fonctions fréquentielles[17].

### II. 3.2. Transformée de Fourier Rapide (TFR)

La transformée de Fourier rapide (TFR) est un algorithme de calcul rapide de la TFD. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance

de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD [qui est de l'ordre de  $\log_2(N)$ ], de [18]:

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \text{ (Equ. II.23)}$$

#### II. 4. Transformée en ondelettes (TO)

Transformée en ondelettes est une méthode d'analyse de signaux non stationnaires ainsi que les signaux stationnaires et utilise une description de décomposition spectrale par l'intermédiaire de la notion de mise à l'échelle[19,20].

Théorie des ondelettes offre un cadre unifié pour un certain nombre de techniques qui ont été élaborés pour les diverses applications de traitement du signal. Une de ses caractéristiques est analyse multi résolution de signal avec une fonction vigoureuse de la localisation de temps et de fréquence[8,21].

Lorsqu'on examine les ondelettes basée stator transformâtes. Se fondant sur le stator transitoire actuel, référence[22]. A proposé une nouvelle technique basée sur l'identification de modèle caractéristique fente principale harmonique (PSH) pour court-circuit enter spires dans les moteurs à induction[9]. Faute de signatures sont extraites les formes d'onde du couple électromagnétique et sommation de tension de phase à l'aide de la transformée en ondelettes pour détecter et localiser les court-circuities failles dans l'enroulement de stator de moteurs DC sans balais VSI-nourris. Un coulissant mode observateur sert également dans[23]àdiagnostiquer la panne de court-circuit dans le moteur à induction.



Fig. II.3 : Représentation temporelle vers ondelettes.

### II. 4.1. Les avantages de la transformée en ondelettes

Le fait que la transformée en ondelettes utilise des fonctions bien localisées dans le plan temps-fréquence lui donne beaucoup d'avantages [5,24]:

- ❖ La résolution en fréquence de la transformée dépend du facteur de dilatation par le principe de Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.
- ❖ Pour des signaux physiques présentant des variations très rapides et des discontinuités, l'analyse en ondelettes est adaptée car l'ondelette va détecter ces variations et les analyser.

Cette particularité rend l'analyse en ondelettes complémentaire à l'analyse de Fourier. En effet, avec l'analyse de Fourier, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables.

- ❖ La localisation en temps est précieuse pour beaucoup d'applications.
- ❖ La transformée en ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque avec peu de coefficients.

### II. 4.2. La transformée en ondelettes continue

La transformée continue en ondelettes (TOC), réalise une projection sur une base de fonctions dont la construction diffère de celle de la Transformée de Fourier à Court Terme et auxquelles on réserve classiquement le terme d'ondelettes. Les ondelettes sont construites à partir d'une ondelette mère  $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$ . À l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle[25], les paramètres de translation et de dilatation varient de manière continue. En d'autres mots, la transformée utilise les fonctions :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \text{ (Equ. II.24)}$$

Cette dernière est dilatée avec d'un facteur d'échelle " a " et tradlatée par "b", le facteur  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  normalise ba,  $\psi$  afin de préserver l'énergie du motif analysant.

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés.

- Ondelette de Haar
- Ondelette de Daubechies

- Ondelettes biorthogonales
- Ondelette de Meyer
- Approximation discrète de l'ondelette de Meyer
- Ondelettes de Battle et Lemarié
- Chapeau mexicain
- Ondelette de Morlet
- Ondelettes de Morlet complexes

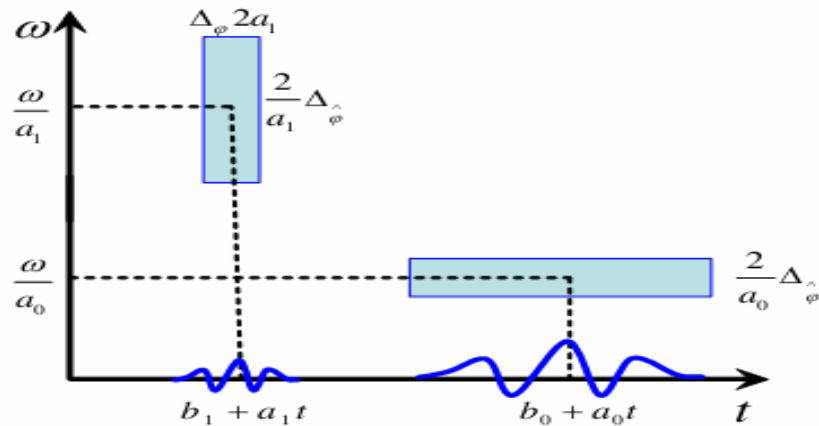
La transformée en ondelettes de  $x \in L^2(\mathbb{R})$  au temps  $t$  et à l'échelle  $a$  se calcule en projetant  $x(t)$  sur la famille d'ondelettes,  $\Psi_{t,a}(s)$  ;  $t \in \mathbb{R}$  et  $a \in \mathbb{R}^+$ . La représentation temps-échelle obtenue est appelée transformée en ondelettes continue (TOC), sa définition est :

$$W(a, b) = \langle x, \Psi_{a,b} \rangle = \int x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{Equ. II.25})$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$W(a, b) = |a|^{1/2} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \Psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \quad (\text{Equ. II.26})$$

La transformée prend les deux arguments  $a$  et  $b$  qui sont respectivement des coefficients de dilatation et de translation. En faisant varier ces arguments, on peut couvrir complètement le plan temps-fréquence avec des boîtes; on obtient ainsi une représentation complète et redondante du signal à analyser.



**Fig. II.4 :** Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes  $\Psi_{a_1, b_1}$  et  $\Psi_{a_0, b_0}$  [25].

Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est traduite de manière continue, cependant il existe des méthodes pour diminuer cette redondance l'une de ces méthodes consiste en l'emploi de la transformée en ondelettes discrète.

La transformée prend les deux arguments  $a$  et  $b$  qui sont respectivement, la translation temporelle  $b$  et l'échelle  $a$ .

La notion de représentation temps-échelle ou espace-échelle permet de voir la transformée en ondelettes comme un microscope mathématique, le zoom étant l'échelle et l'optique, l'ondelette. Le paramètre échelle est très similaire à la notion d'échelle pour les cartes géographiques. En tant qu'opération mathématique, les grandes échelles, ou basses fréquences, dilatent le signal et correspondent à des vues plus globales non détaillées du signal. Les petites échelles, ou hautes fréquences, correspondent à des vues détaillées et donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal [25].

### II. 4.3. 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 discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle  $a = 2^l$ . Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE  $\mu P$ ...) [26].

Pour mettre en œuvre la transformée en ondelette sur des signaux numériques, une discrétisation des paramètres de résolution  $a$  et position  $b$  est nécessaire. Cette discrétisation

du plan temps fréquence correspond à la construction d'une grille non uniforme définie par les paramètres de l'équation (Equ. II.25).  $b_0$  dépend de l'ondelette choisie.

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0^m > 1, m \in \mathbb{Z} \text{ (Equ. II.27)}$$

L'idée essentielle de cette discrétisation est la suivante. Une fois choisi un grossissement  $a_0^m$  et étudié le processus à une position donnée. Si le grossissement  $a_0^m$  est important (analyse des détails à petite échelle), les déplacements se font par petits incréments. Si le grossissement  $a_0^m$  est faible (analyse à plus grande échelle), les déplacements peuvent être plus rapides. L'atome de cette transformée discrète se définit alors comme décrit dans l'équation (Equ. II.26) :

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) \text{ (Equ. II.28)}$$

La transformée en ondelette discrète de  $x(t)$ , calculée à partir de  $\Psi_{m,n}(t)$  est donnée par l'équation :

$$T_{dx}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int x(t) \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) \text{ (Equ. II.29)}$$

Le passe-bande dyadique filtrage mené par cette transformation. Fourni un certain signal échantillonné  $x = (x_1, x_1, x_1 \dots, x_n)$ , la (TOD), il décompose sur plusieurs signaux d'ondelettes (un signal de rapprochement et détail  $n$  signaux) [27]. Une certaine bande de fréquence est associée à chaque signal ondelettes ; le signal de l'ondelette reflète l'évolution temporelle des composantes de fréquence du signal original  $x$ , qui figurent dans sa bande de fréquences connexes [27].

$$f(d_j) \in [2^{-(j+1)} f_e, 2^{-j} f_e] \text{ Hz} \quad \text{(Equ. II.30)}$$

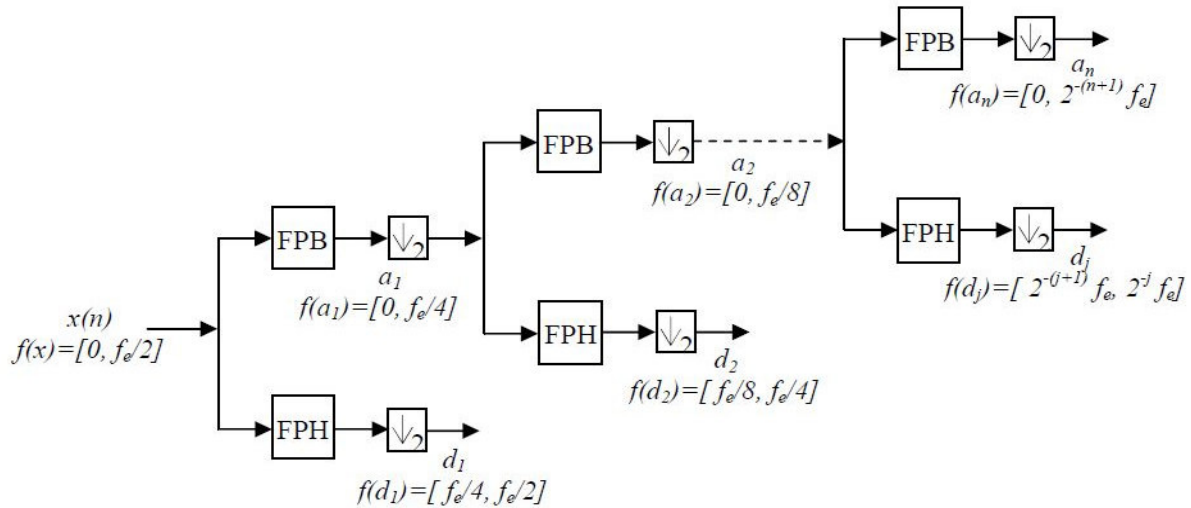
Le signal  $a_n$  de rapprochement comprend les composantes de basse fréquence du signal appartenant à l'intervalle.

$$f(a_n) \in [0, 2^{-(n+1)} f_e] \text{ Hz} \quad \text{(Equ. II.31)}$$



Par conséquent, la (TOD) exécute le processus de filtrage illustré à la Figure (Fig. II.5). Notez que le filtrage n'est pas idéal, un fait entraînant un certain chevauchement entre les bandes de fréquence adjacente. Cela provoque une Légère distorsion si une certaine composante de fréquence du signal est proche de la limite d'une bande.

Avant l'application de la TOD, le type de la mère d'ondelettes et le nombre des niveaux de décomposition doivent être bien choisis.



**Fig. II.5 :** Principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète au niveau n (FPB : Filtre Passe Bas, FPH : Filtre Passe Haut, 2 : décimation)[1].

L'ondelette mère sélectionnée est liée aux coefficients des filtres utilisés dans le processus de filtrage inhérent à la TOD [. Au cours de ces dernières décennies, plusieurs familles d'ondelettes aux propriétés mathématiques plutôt différentes ont été développées. Infini-prise en charge des ondelettes (gaussienne, chapeau mexicain, Morlet, Meyer, etc.) et ondelettes avec support compact (ondelettes orthogonales telles que Daubechies ou Coiflet et bi-orthogonale ondelettes) ont été proposés [27].

Le nombre de niveaux de décomposition est déterminé par les composants de basse fréquence à extraire. Plus les composants de fréquence à extraire sont petites, plus le nombre de niveaux de décomposition grand. Pour cela, il faut vérifier la condition donnée dans (Equ. II.32) Cette condition signifie que la limite inférieure de la bande de fréquences qui contient l'élément caractéristique de défaut est inférieure à cette fréquence de défaut.

$$l > \frac{\log(f_s/f_{cc})}{\log(2)} - 1 \text{ (integer)} \text{ (Equ. II.32)}$$

Les énergies concernant le signal décomposé pour les coefficients  $E(a_n)$  de rapprochement et chaque détail  $E(d_j)$  peuvent être calculées en [28] :

$$E(a_n) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (a_n)^2 [i]} \text{ (Equ. II.33)}$$

$$E(d_j) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (d_j)^2 [i]} \text{ (Equ. II.34)}$$

Où  $j=1,2, \dots$  et  $N_l$  la longueur de données le niveau de décomposition  $l$ . Elle est donnée par :

$$N_l = \frac{N}{2^l} \text{ (Equ. II.35)}$$

Où  $l$  est défini précédemment en ce qui concerne la bande passante. (Equ. II.30) et (Equ. II.31), on peut calculer les différentes énergies correspondent à chaque bande de fréquences du signal décomposé, et ils sont utilisés comme critères pour montrer comment les changements de niveau d'énergie de bande passante sous inter-turecourt-circuitez faute dans la messagerie instantanée.

## II. 5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons développé les méthodes de diagnostic utilisé pour détection des défauts par traitement du signal, en suite on a vu les méthodes dédiées pour le diagnostic de défaut de court-circuit dans la machine asynchrone. Il s'agit des méthodes de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env i_a$ ), le module du vecteur de Park ( $MVP$ ), et la puissance apparent ( $S$ ). Les signatures des défauts précédents dans ces méthodes sont aussi bien illustrées.

La deuxième partie nous a permis de mettre en évidence les limitations de la transformée de Fourier (ou régime non stationnaire) et nous avons présenté une étude sur l'application de la transformée en ondelettes continue et discrète comme on a tiré les avantages de la méthode de traitement de signal utilisée ( $TOD$ ).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude et à la détection des défauts de court-circuit dans une machine asynchrone décrivant le comportement de la machine dans l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre III

### Diagnostic de défaut de court-circuit et l'excentricité mixte dans la machine asynchrone.

#### Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation des résultats expérimentaux de diagnostic du défaut de court-circuit entre spires en régime stationnaire (couple de charge constant). Et les résultats expérimentaux de défaut d'excentricité mixte en régime non stationnaire (couple de charge variable) Dans le moteur asynchrone triphasé. Ces défauts sont diagnostiqués par l'utilisation des signaux de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env i_a$ ), le module du vecteur de Park ( $MVP$ ), et la puissance apparente ( $s$ ). Les techniques de détection des défauts considérées sont à base de l'analyse spectrale de la transformée de Fourier rapide FFT et la transformée de l'Ondelette (TOD).

#### III. 1. Régime stationnaire

##### III. 1. 1. Banc d'essai expérimental de court-circuit

Le moteur asynchrone utilisé dans l'étude expérimentale du défaut de court-circuit entre spires est de 15 kW, type DV160L4, 50 Hz, à quatre pôles, 29,5 A et 1450 r / min. L'enroulement de stator a été modifié par l'addition d'un certain nombre de piquages connectés aux bobines de stator, pour chacune des trois phases. L'autre extrémité de ces fils externes est reliée à une boîte à bornes du moteur à plus grande échelle, ce qui permet l'introduction de plusieurs nombres de spires en court-circuit, à plusieurs endroits dans les enroulements du stator. Le moteur a deux voies parallèles par phase et un total de 147 tours par voie / phase. Le système d'instrumentation de diagnostic utilisé essentiellement comprend un micro-ordinateur équipé d'une carte d'acquisition, deux capteurs de courant, deux capteurs de tension, et un module de pré-conditionnement.

### III. 1. 2. Résultats expérimentaux de court-circuit entre spires

Les résultats expérimentaux sont analysés, pour un fonctionnement stationnaire (couple de charge constant) du moteur, Deux méthodes de traitement de signal sont utilisées, la transformée de Fourier rapide (*TFR*) appartient aux méthodes fréquentielles et la transformée en ondelettes discrète (*TOD*) appartient aux méthodes temps-fréquence. L'analyse spectrale (FFT) des grandeurs électriques du moteur asynchrone réalisée avec une fréquence d'échantillonnage de 12.8 kHz a été choisie. Par conséquent,  $N_e = 128000$  échantillons sont acquis avec une résolution de fréquence égale à 0.1 Hz. Les spectres obtenus par la TFR sont présentés en échelle linéaire et en format normalisé, c'est à dire, l'amplitude de la composante continue.

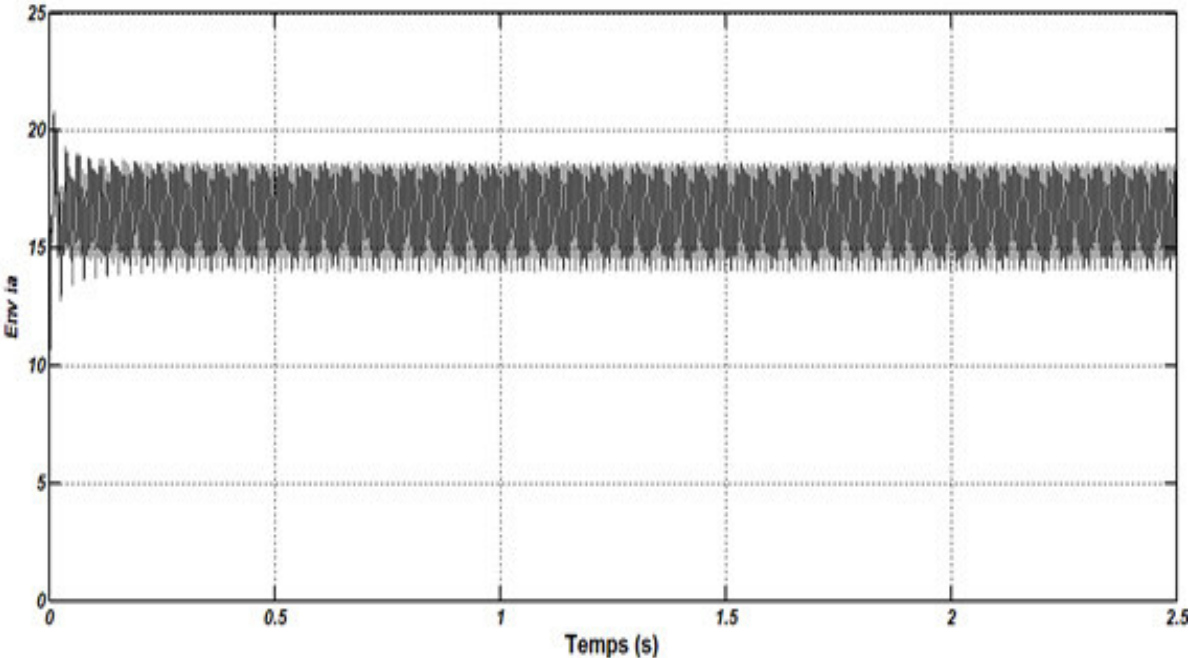
Les spectres des signaux analysés a été attribué à la valeur de 100%. Daubechies-44 (*db44*) a été l'ondelette mère utilisée dans l'analyse des résultats expérimentaux utilisant la TOD. Le nombre des niveaux de décomposition est  $l_d = 6$  dans le but d'obtenir plus d'informations sur le court-circuit. Ainsi, la bande de fréquence affectée par le défaut est [100 : 200] Hz. Les signaux intéressants et leurs bandes de fréquences sont présentés dans Tab. III.1.

**Tab. III.1 :** Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.

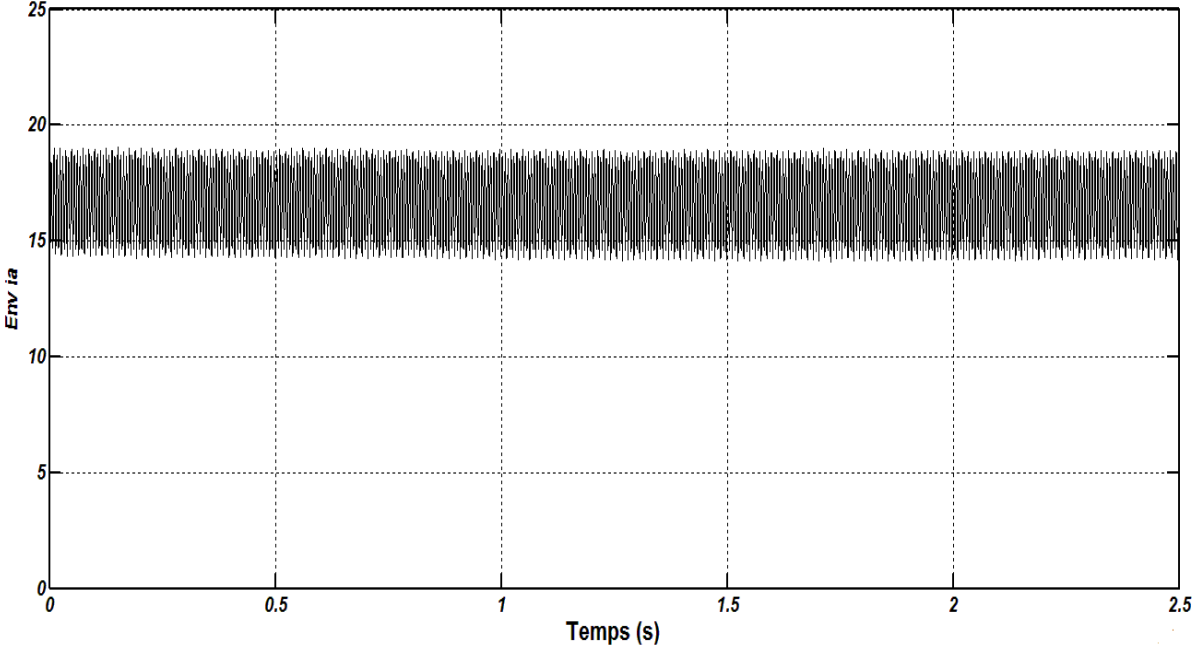
Signal	Bande fréquentielle (Hz)
$a_6$	0-100
$d_6$	100-200
$d_7$	50-100
$d_5$	200-400

#### a) Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic

Les figures représentent les caractéristiques électriques du moteur asynchrone en cas de l'état sain et court-circuit, en régime stationnaire. Les allures temporelles de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  (*Env  $i_a$* ) et le module du vecteur de Park (*MVP*), et de la puissance apparent (s) d'un moteur asynchrone fonctionne avec des spires statorique court-circuitées. Elles sont affectées par la présence du défaut et modulées par la fréquence caractéristique du défaut  $2f$ . Cette modulation augmente avec l'augmentation du défaut.

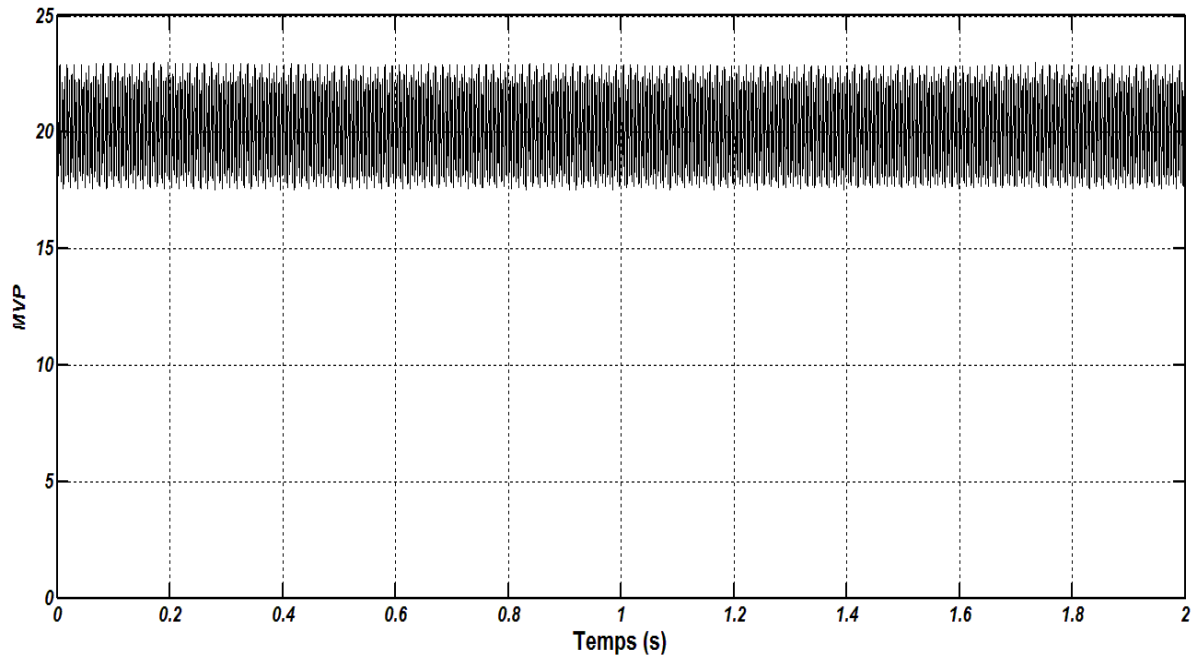


(a)

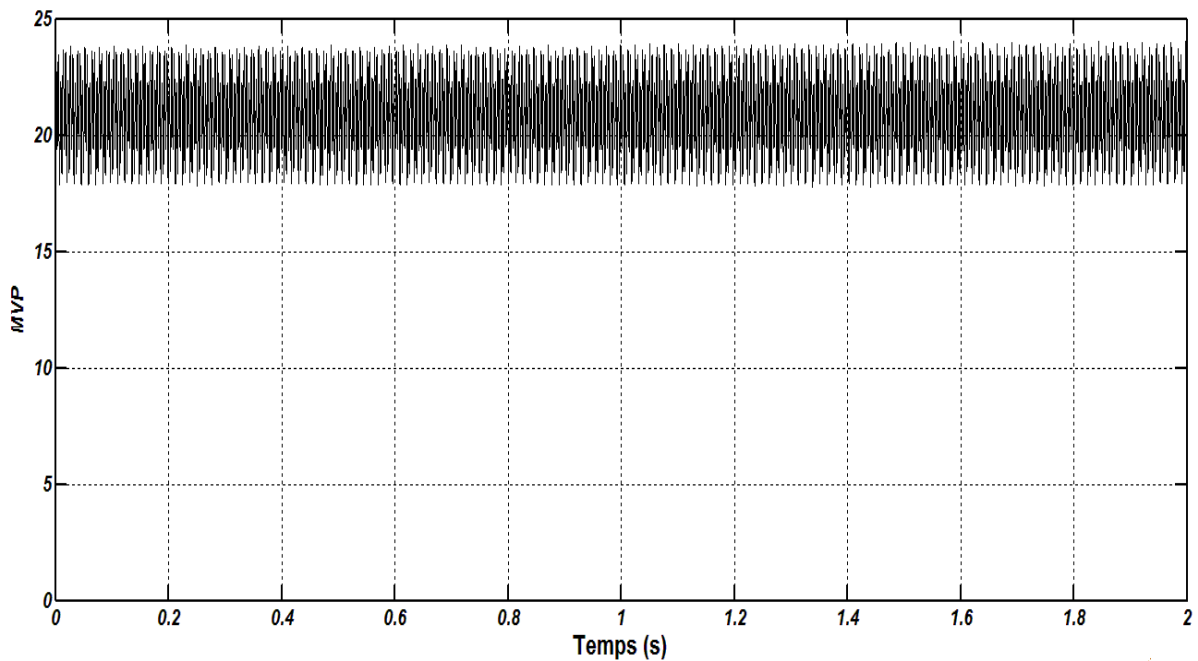


(b)

**Fig. III.1 :** Allure temporelles de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env_{i_a}$ ) un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.

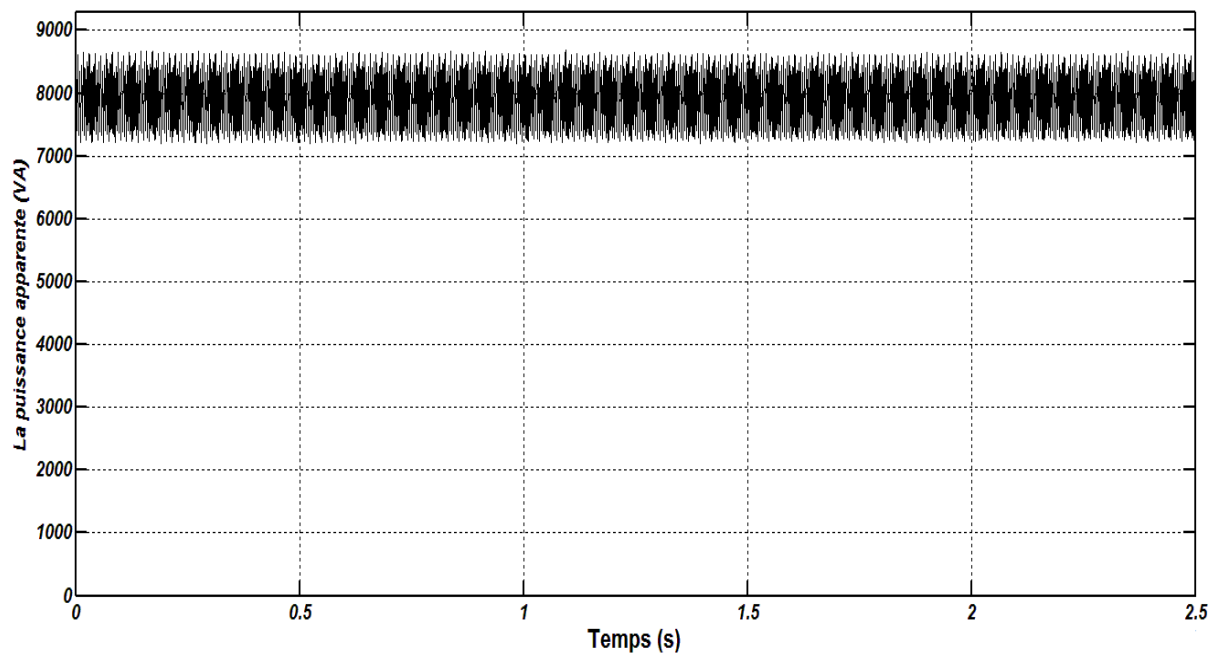


(a)

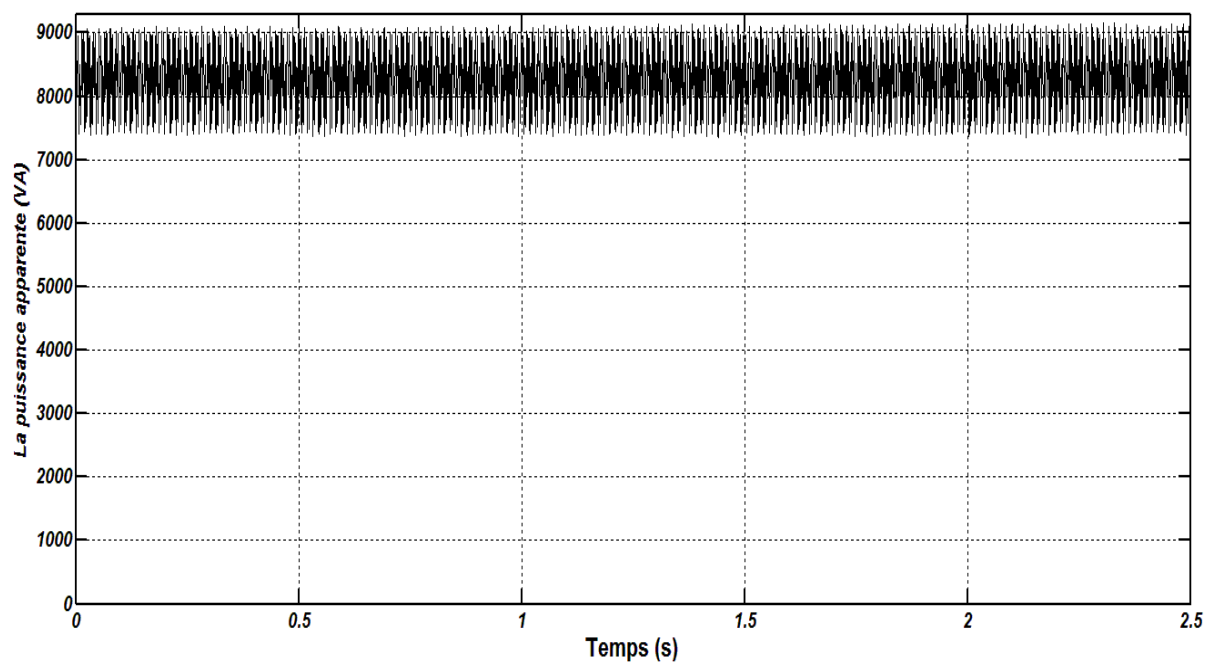


(b)

**Fig. III.2 :** Allures temporelles de module de vecteur de Park (MVP) un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.



(a)



(b)

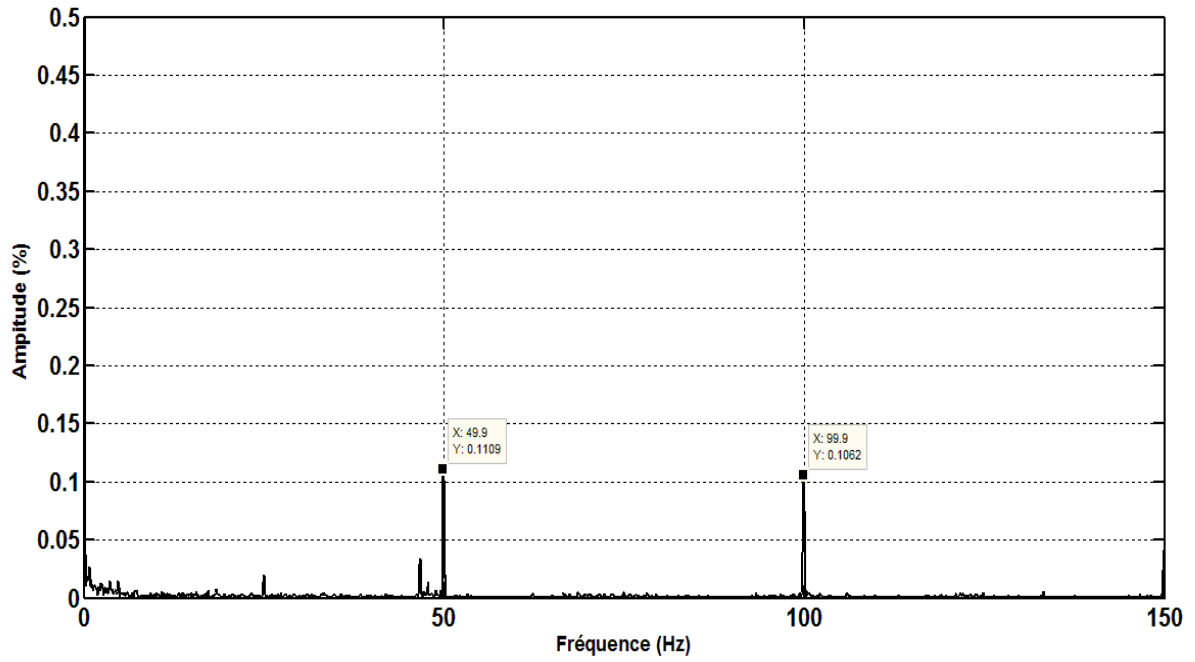
**Fig. III.3 :** Allure temporelles de la puissance apparente (s) d'un moteur asynchrone en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.

**b) Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR)**

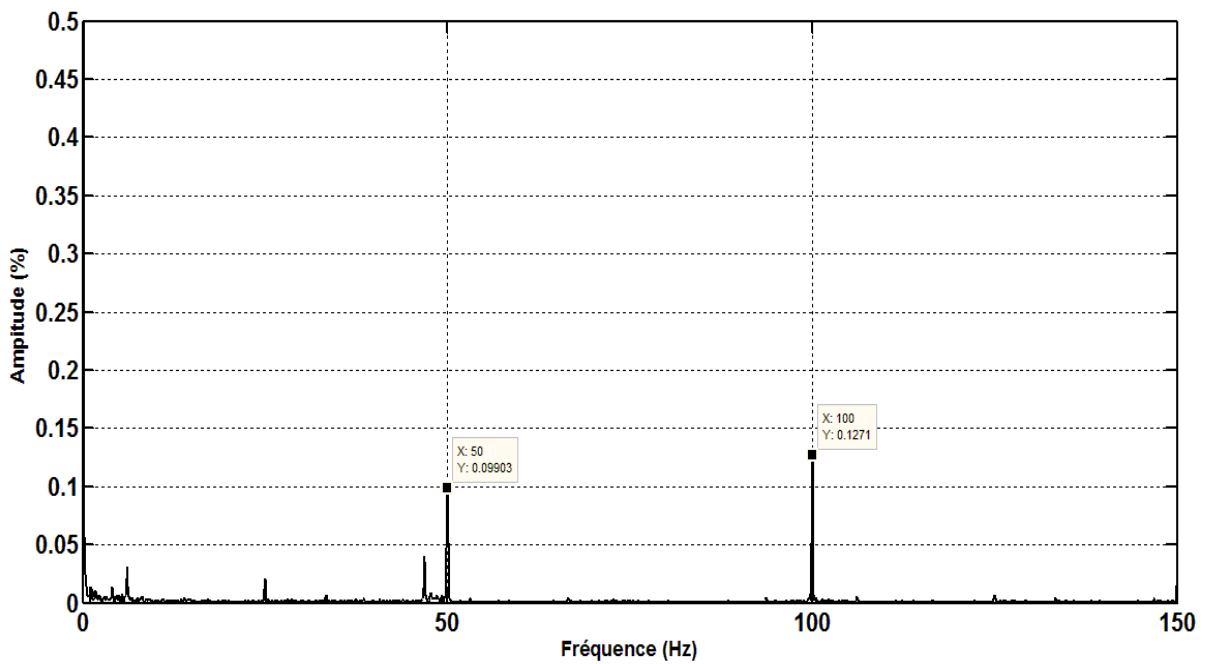
Les figures III.4 et III.5 et III.6 représentent les spectres des résultats expérimentaux obtenue par la (TFR de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  (Env  $i_a$ ) et du module du vecteur de Park (MVP) et la puissance apparente (s) pour un moteur asynchrone fonctionnant en régime stationnaire (couple de charge constant).l'analyse des spectres montre la présence de la composante fondamentale à 50Hz,et une autre composante caractéristique du défaut elle sont affectées par la présence du défaut et modulées par la fréquence caractéristique de défaut  $2f$ . Cette modulation augmente avec l'augmentation de la sévérité du défaut.

Les performances de l'analyse par la TFR est bien illustré aux Tab. III.2 par le facteur de sévérité du défaut (FSD) correspond aux résultats expérimentaux. Ce FSD est défini par le rapport de la composante caractéristique de défaut  $2f$  et la composante continue. Ce FSD est calculé pour toutes les méthodes utilisées afin d'établir une étude comparative en donnant la méthode la plus sensible au défaut de court-circuit. Comme on peut le constater, la valeur du FSD augmente avec l'augmentation de nombre des court-circuites pour toutes les méthodes utilisées. Ce qui en fait un bon indicateur de l'état de santé de spires statoriques. la méthode du vecteur de Park (MVP) est la plus sensible au défaut suivie par, respectivement, la puissance apparente (s), les méthodes de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  (Env  $i_a$ ) sont les moins sensible au défaut. Ces constatations sont bien démontrées dans la figure III.7 par le FSD des méthodes utilisées pour le cas de six (6) spires en court-circuites.



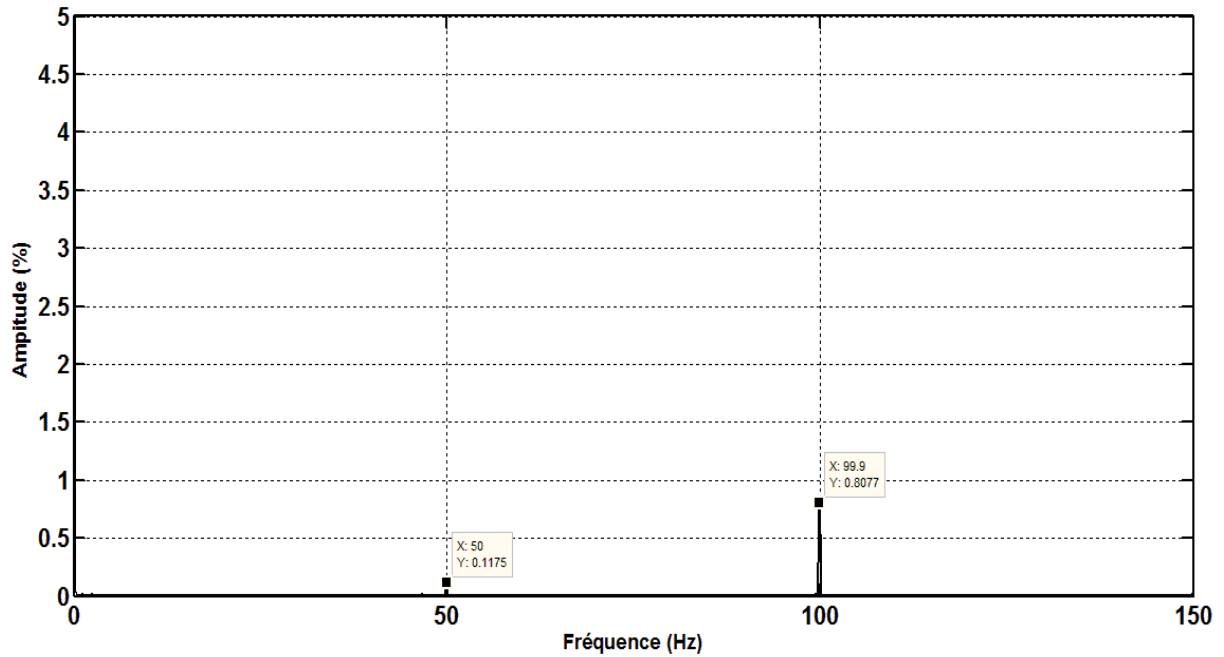


(a)

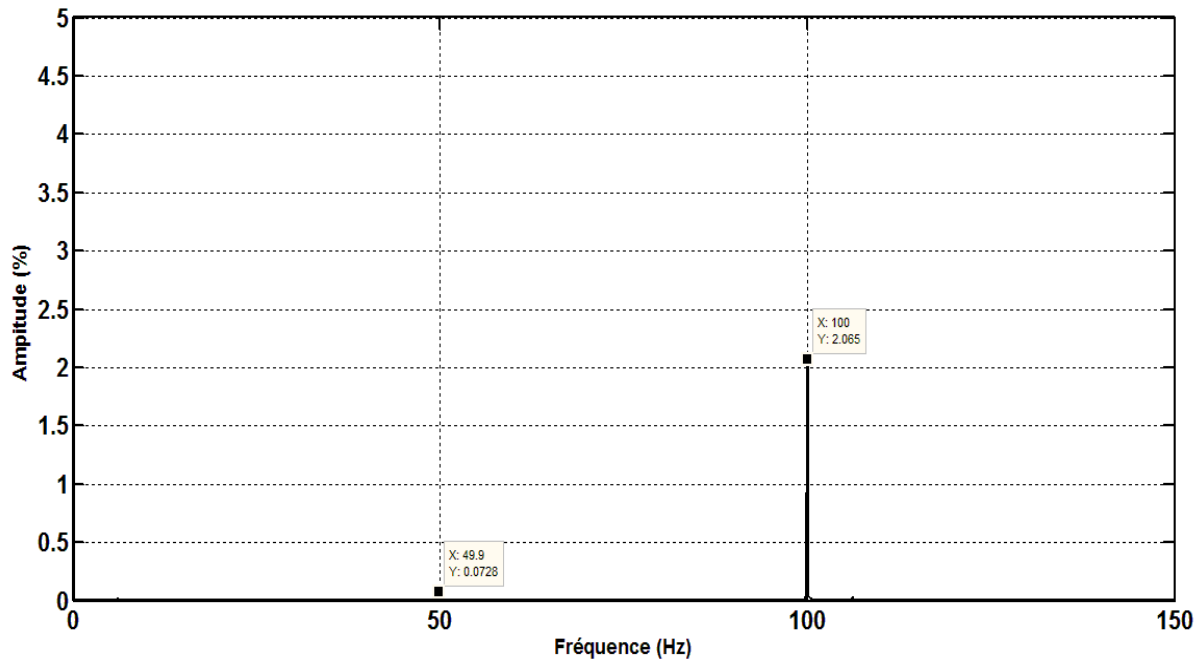


(b)

**Fig. III.4 :** Signature de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env_{i_a}$ ), obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.

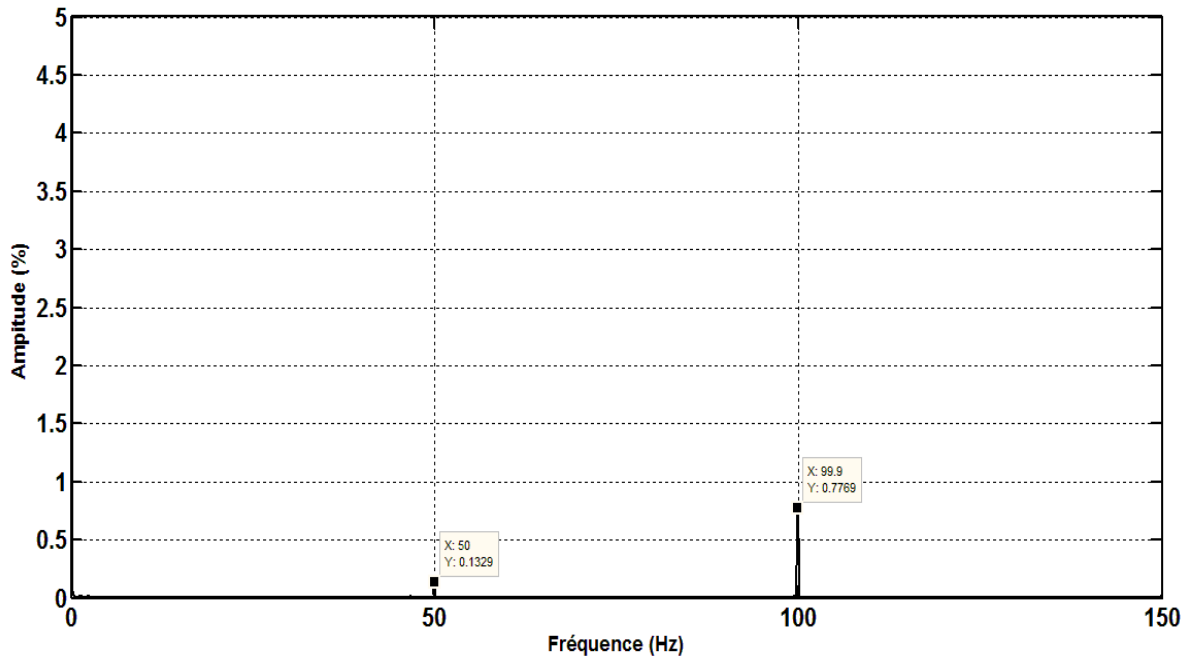


(a)

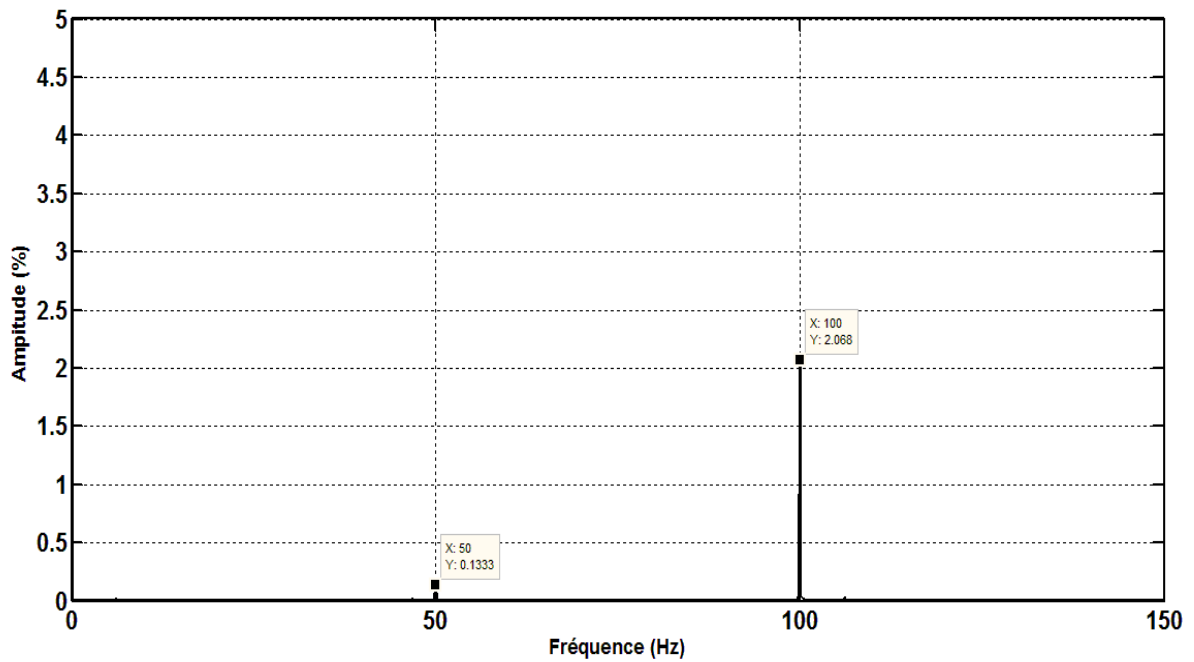


(b)

**Fig. III.5 :** Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.



(a)

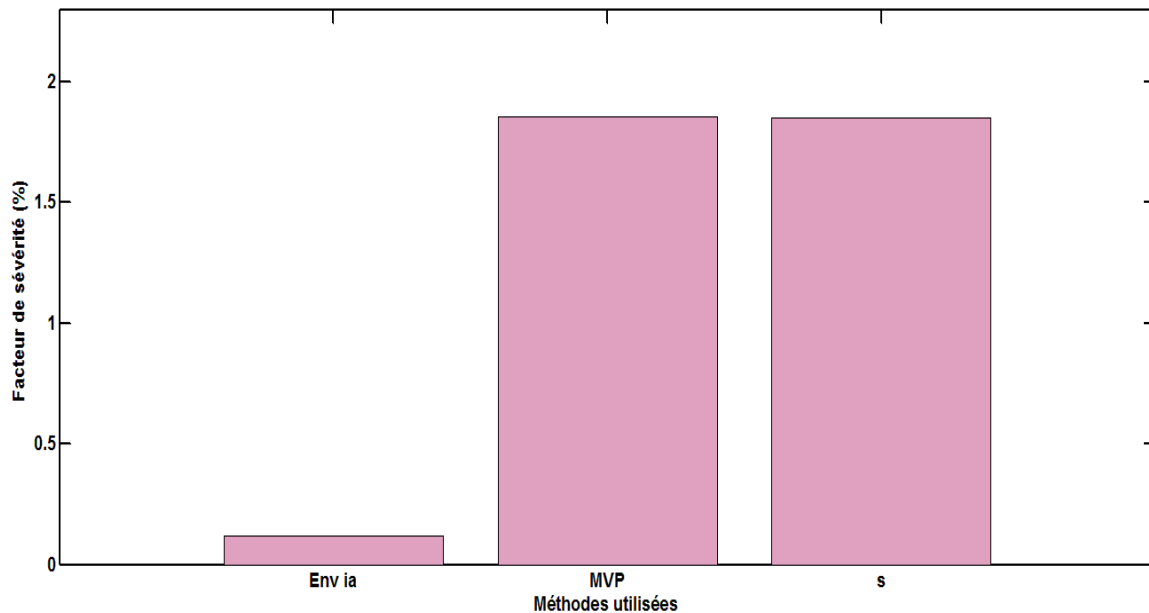


(b)

Fig. III.6 : Signature de l'apuisance apparente (s), obtenue par la TFR du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.

**Tab. III.2 :** FSD obtenue par la TFR, pour les méthodes utilisées en fonction du nombre de spires en court-circuit, expérimental.

<i>Nombre de spires en court-circuit</i>	<i>Envia (%)</i>	<i>MVP (%)</i>	<i>(s) (%)</i>
0	0.1062	0.8077	0.7769
6	0.1199	1.854	1.849
12	0.1271	2.065	2.068
18	0.243	2.284	2.35



**Fig. III.7 :** FSD des méthodes utilisées pour un moteur fonctionnant avec six (6) spires en court-circuit.

### c) Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

Après la sélection de l'ondelette mère et le nombre de niveau de décomposition (Daubechies-44 au niveau 6). Les figures III.8 et III.9 et III.10 montrent respectivement, les résultats expérimentaux de l'enveloppe de courant statorique ia (Envia), le module du vecteur de Park (MVP) et la puissance apparent (s) chaque figure comporte le signal original  $s(t)$  à l'état sain et à l'état de 12 spires en court-circuit respectivement et les détails  $d_5$ ,  $d_6$  et  $d_7$ .

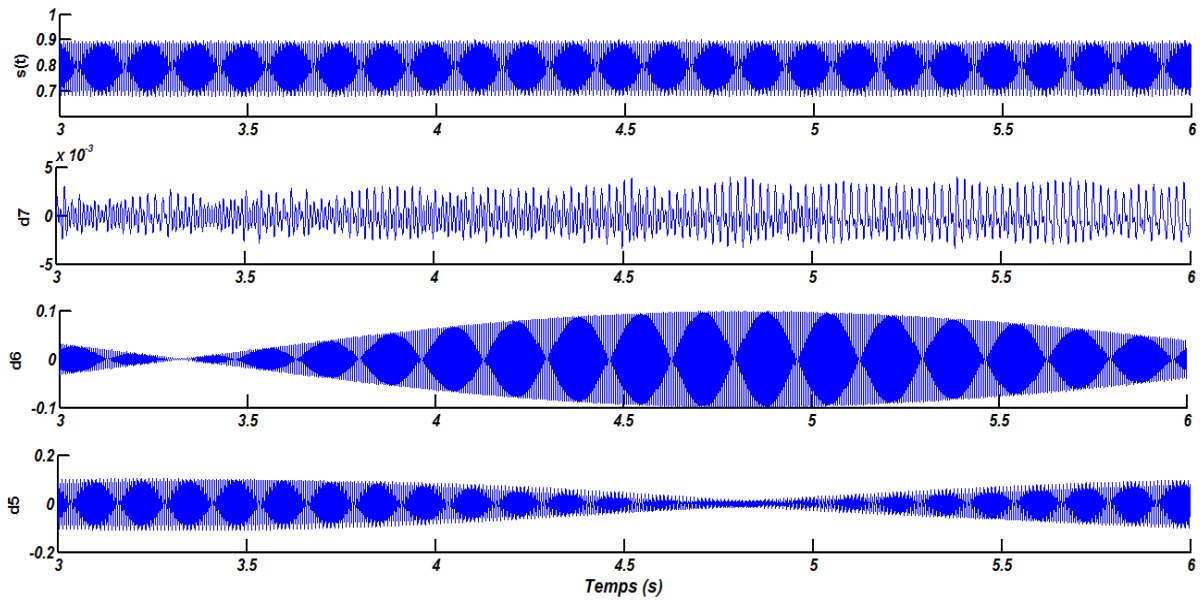
L'objectif de cette analyse qualitative est d'étudier la présence des composantes fréquentielles caractéristique de défaut  $2f$  dans les signaux de détail correspondants. Les figures III.8 et III.9 et III.10. L'analyse par la TOD de Envia pour le cas de 12 spires en court-circuitées est représentée dans les figures III.7. Dans ce cas, des oscillations fréquentielles caractéristiques de défaut court-circuitées sont observées particulièrement dans  $d_6$  pour le cas expérimental. Ces oscillations abaissent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuitées. Et pour l'analyse de MVP puissance apparent (s) sont représentée dans les figures III.8 et III.9. Dans ce cas, ils y-a des oscillations fréquentielles caractéristiques de défaut court-circuitées sont observées particulièrement dans  $d_6$  pour le cas expérimental. Ces oscillations augmentent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuitées. Et permettent de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut court-circuitée.

Afin d'évaluer quantitativement le défaut, le FSD donné en Tab. III.3 est défini maintenant l'énergie de signal de détail  $d_6$  le cas expérimentale est donné en pourcentage (%). Ce FSD est défini par le rapport de la composante caractéristique de défaut  $2f$  et la composante continue. Ce FSD est calculé pour toutes les méthodes utilisées afin d'établir une étude comparative en donnant la méthode la plus sensible au défaut de court-circuit. Comme on peut le constater, la valeur du FSD augmente avec l'augmentation de nombre des court-circuitées pour toutes les méthodes utilisées. Ce qui en fait un bon indicateur de l'état de santé de spires statoriques. La méthode du module de vecteur de Park (MVP) est la plus sensible au défaut suivie par, respectivement, la puissance apparente (s).

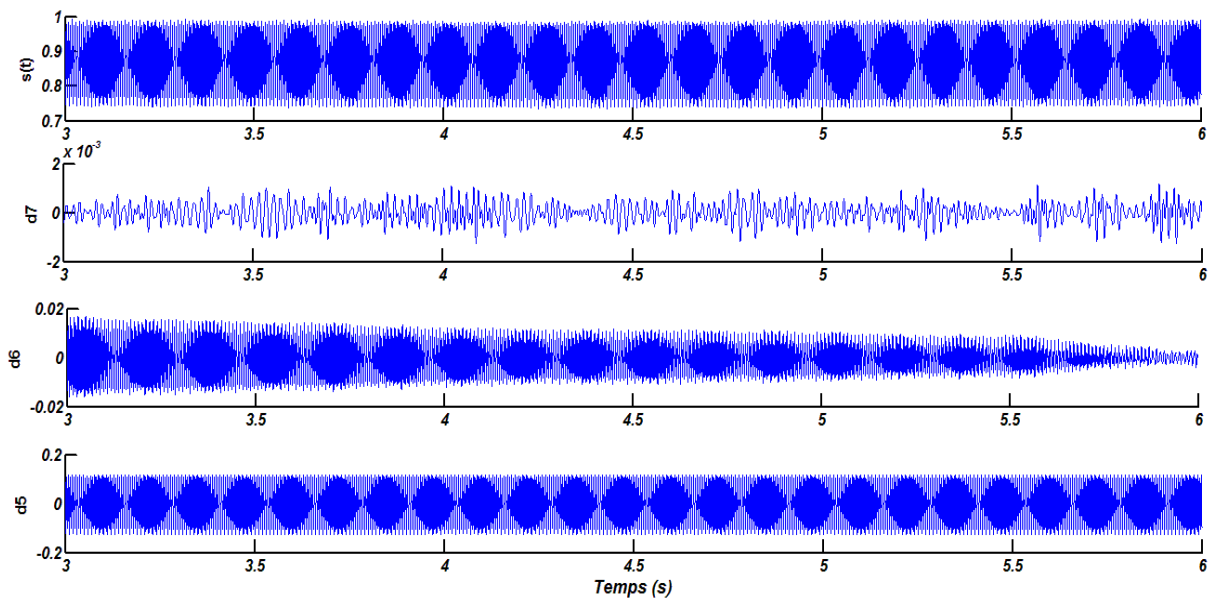
Pour justifier le choix d'utiliser la famille d'ondelette de Daubechies comme ondelette mère dans ce travail, Tabs. III.4 illustrent, respectivement, les valeurs expérimentales du FSD des méthodes utilisées analysées par les ondelettes de *db44*, *sym8*, *coif5*, *bior 6.8*, *rbio 6.8* et *dmey* pour le cas d'un moteur avec six(6) spires en court-circuit. D'après ces résultats qui pré dans Fig. III.11, *db45* donne des valeurs élevées du FSD comparé aux autres types d'ondelettes et comme notre intérêt est de mieux quantifier le défaut, on a opté pour le choix de la famille Daubechies.

Et pour justifier l'ordre de l'ondelette mère de Daubechies (db), ont calculé FSD pour différent ordre de l'ondelette utilise, les Tab. III.5, III.6, et III.7 qui illustrent, respectivement, les valeurs expérimentales du FSD de l'enveloppe de courant statorique  $i_a$  (Envia), le module du vecteur de Park (MVP) et la puissance apparent (s) pour le cas d'un moteur avec six (6) spires en court-circuit. Il est évident que les grandes valeurs du FSD sont obtenues pour un

ordre compris entre 5 et 30 de l'ondelette mère de Daubechies. Ceci est bien illustré dans le cas expérimental.

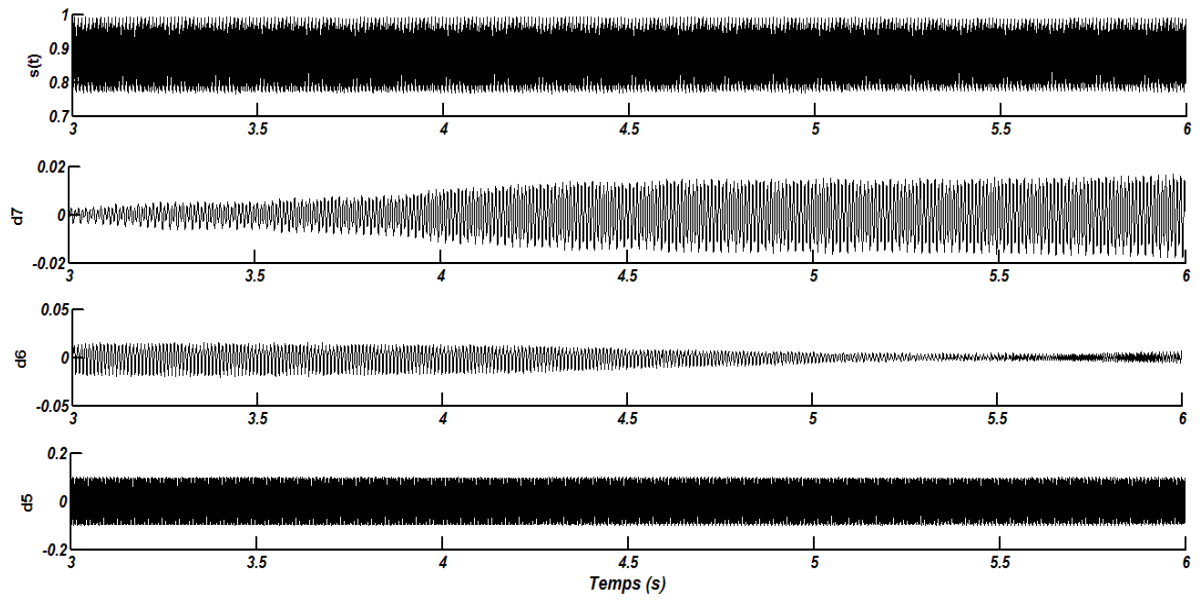


(a)

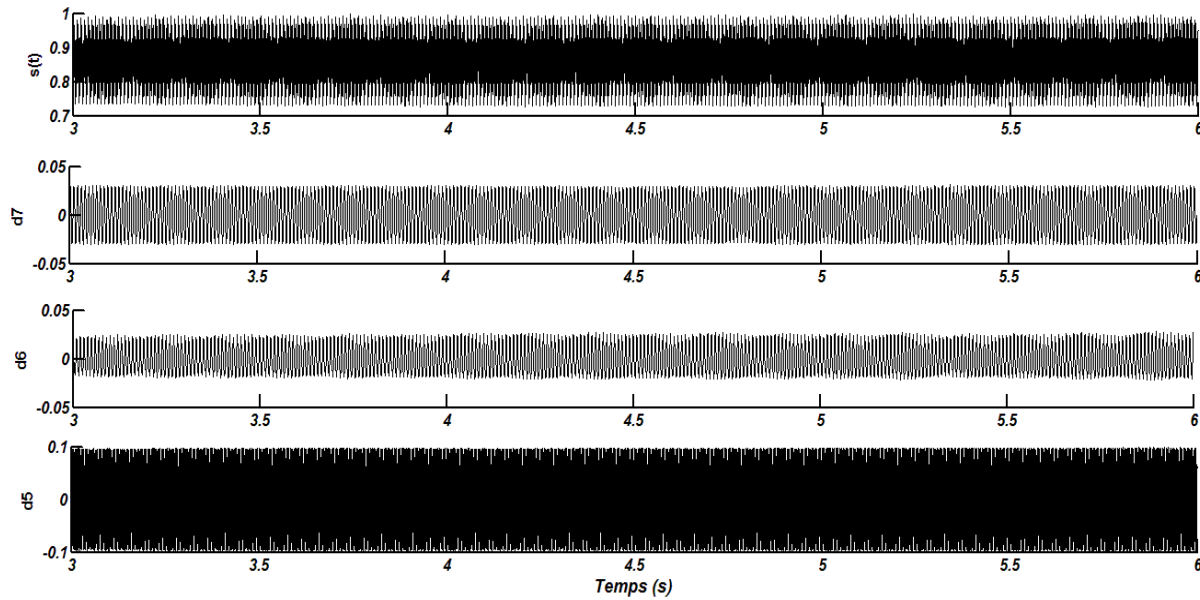


(b)

**Fig. III.8 :** Signature de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Envi_a$ ), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.

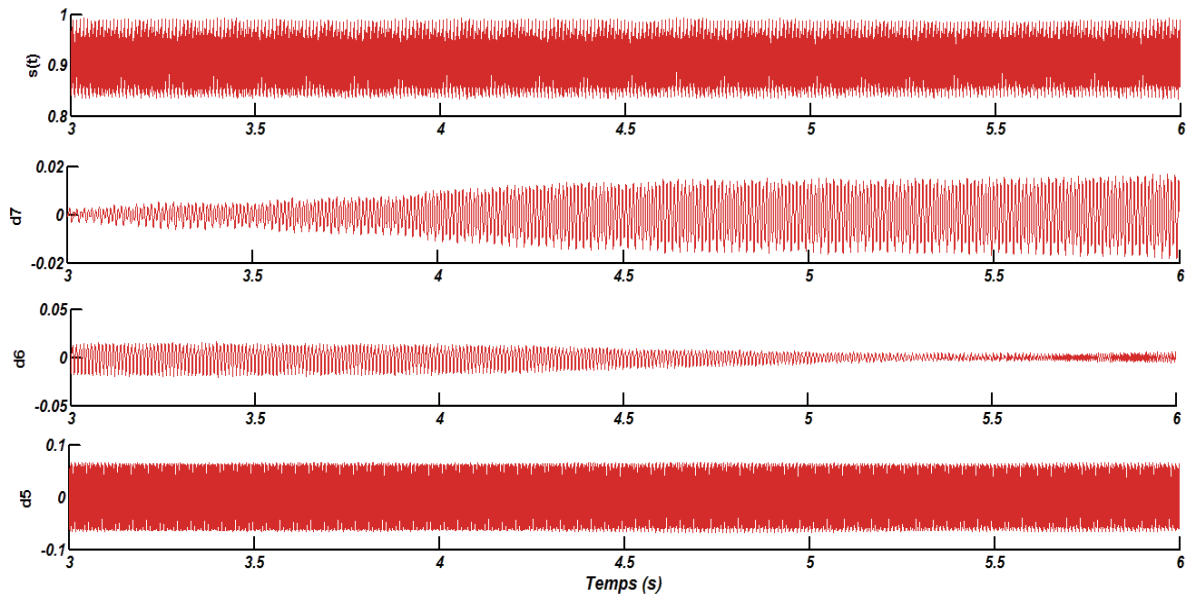


(a)

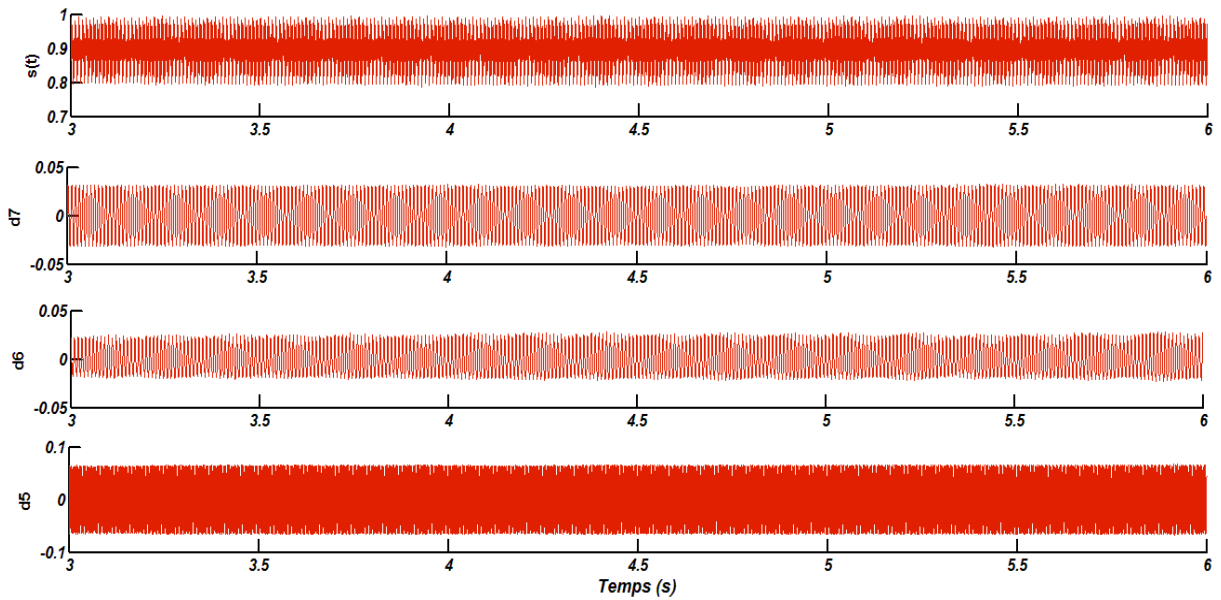


(b)

**Fig. III.9 :** Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.



(a)



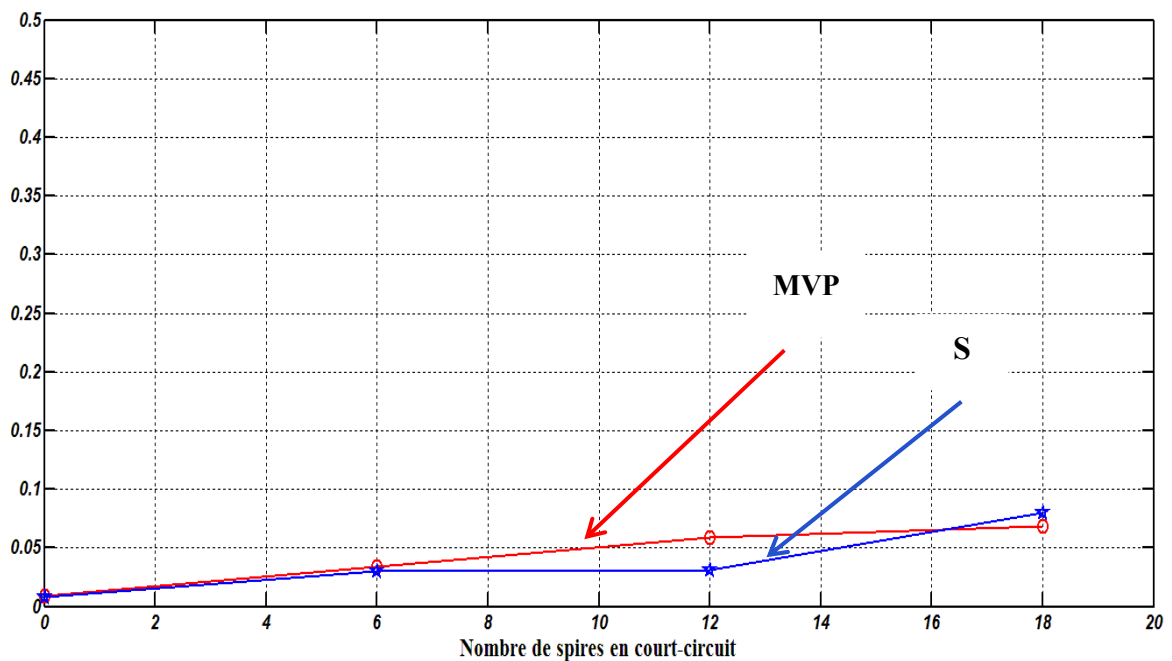
(b)

**Fig. III.10 :** Signature de lapuissance apparent ( $s$ ), obtenue par db44 du moteur en régime stationnaire, (a) sain, (b) 12 SC.



**Tab. III.3:** FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction du nombre de spires en court-circuit en régime stationnaire, expérimental.

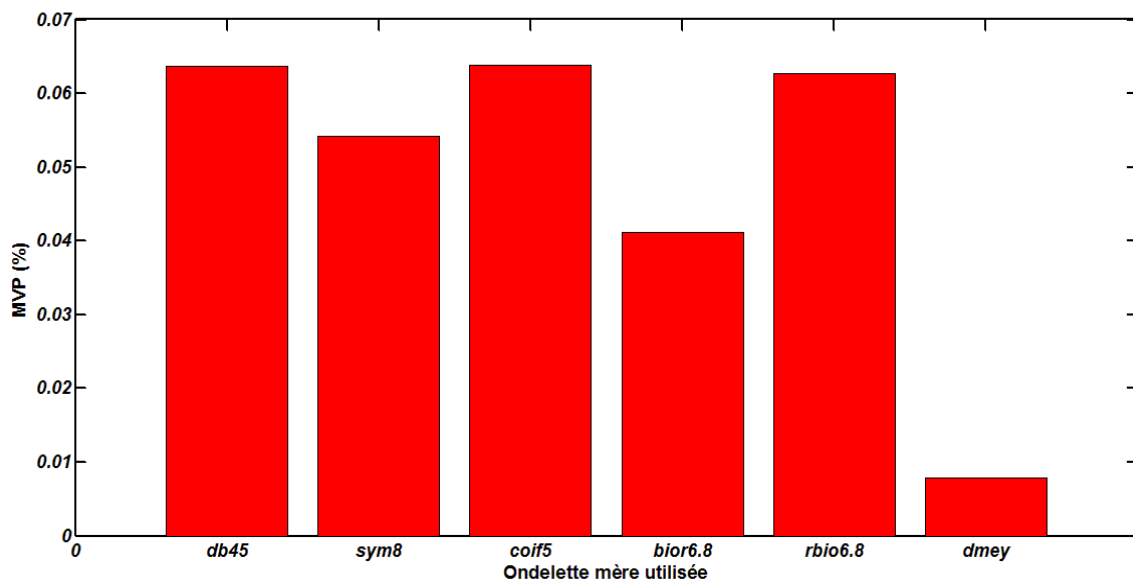
<i>Nombre de spires en court-circuit</i>	<b>Enveloppe de <math>i_a</math></b> (Env $i_a$ ), (%)	<b>MVP</b> (%)	<b>La puissance apparente(s)</b> (%)
0	0.0969	0.0094	0.0084
6	0.3598	0.0342	0.0306
12	0.7288	0.0585	0.0313
18	1.0706	0.0686	0.0800



**Fig. III.11 :** FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées (MVP, s) en fonction du nombre de spires court-circuitent en régime stationnaire.

**Tab. III.4 :** FSD des méthodes utilisées en fonction du type de l'ondelette mère avec six(6) spires en court-circuit du moteur en régime stationnaire, expérimental.

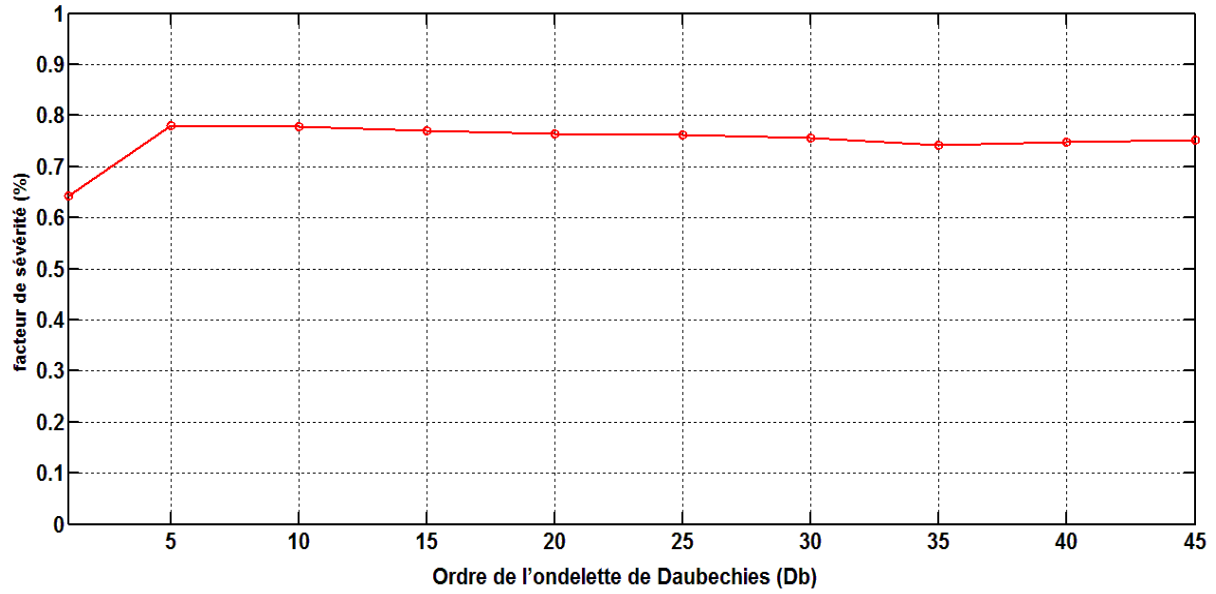
<i>Ondelette mère utilisée</i>	<b>Enveloppeia (%)</b>	<b>MVP(%)</b>	<b>La puissance apparente (s) (%)</b>
<i>db45</i>	0.7519	0.0637	0.0080
<i>sym8</i>	0.7737	0.0542	0.0581
<i>coif5</i>	0.7672	0.0639	0.0614
<i>bior 6.8</i>	0.8863	0.0412	0.0446
<i>rbio 6.8</i>	0.7233	0.0677	0.0733
<i>dmey</i>	0.7663	0.0078	0.0083



**Fig. III.12 :** FSD du module du vecteur de Park (MVP) en fonction du type de l'ondelette mère avec six(6) spires en court-circuit du moteur en régime stationnaire, expérimental.

**Tab. III.5 :** FSD de l'enveloppe de courant statorique ia en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

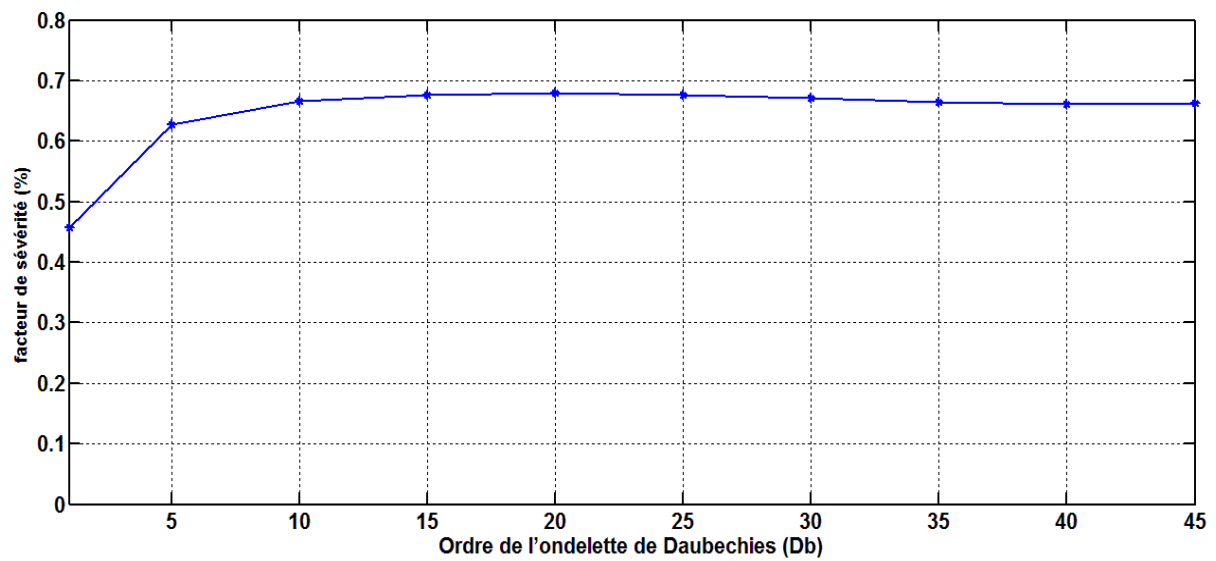
Ordre de (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
<b>FSD</b>	0.6425	0.7803	0.7780	0.7711	0.7633	0.7620	0.7567	0.7420	0.7487	0.7519



**Fig. III.13 :** FSD de l'enveloppe de courant statorique ia en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

**Tab. III.6 :** FSD du module du vecteur de Park (MVP) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

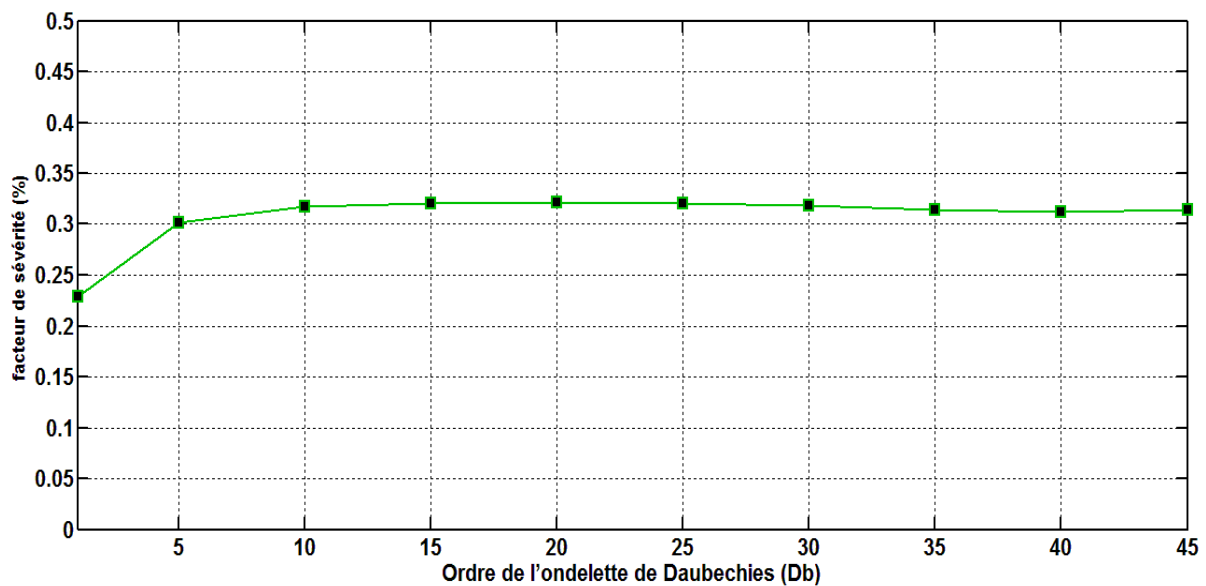
Ordre de (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
<b>FSD</b>	0.4571	0.6282	0.6665	0.6758	0.6795	0.6766	0.6718	0.6651	0.6604	0.6625



**Fig. III.13 :** FSD du module du vecteur de Park (MVP) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

**Tab. III.7 :** FSD de la puissance apparente (s) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

Ordre de (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
FSD	0.2287	0.3013	0.3170	0.3202	0.3211	0.3201	0.3183	0.3147	0.3121	0.3141



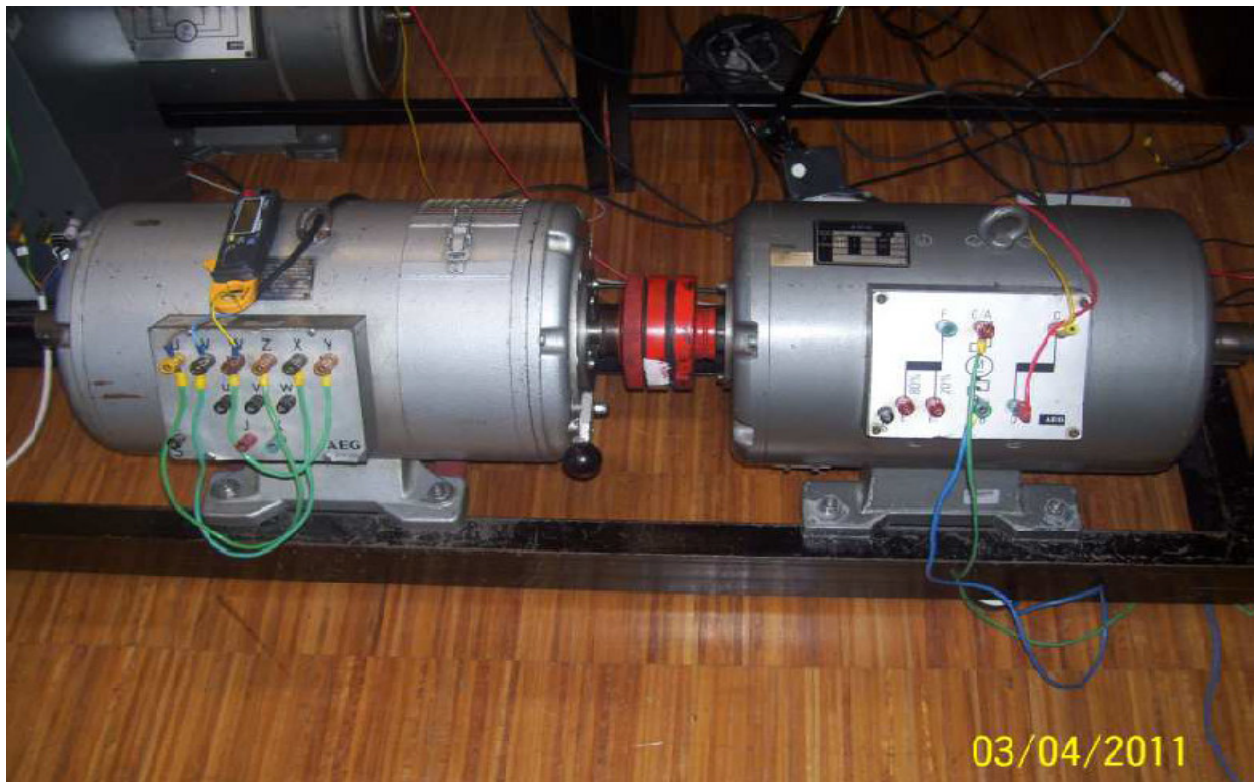
**Fig. III.15 :** FSD de la puissance apparente (s) en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db).

## III. 2. Régime non stationnaire

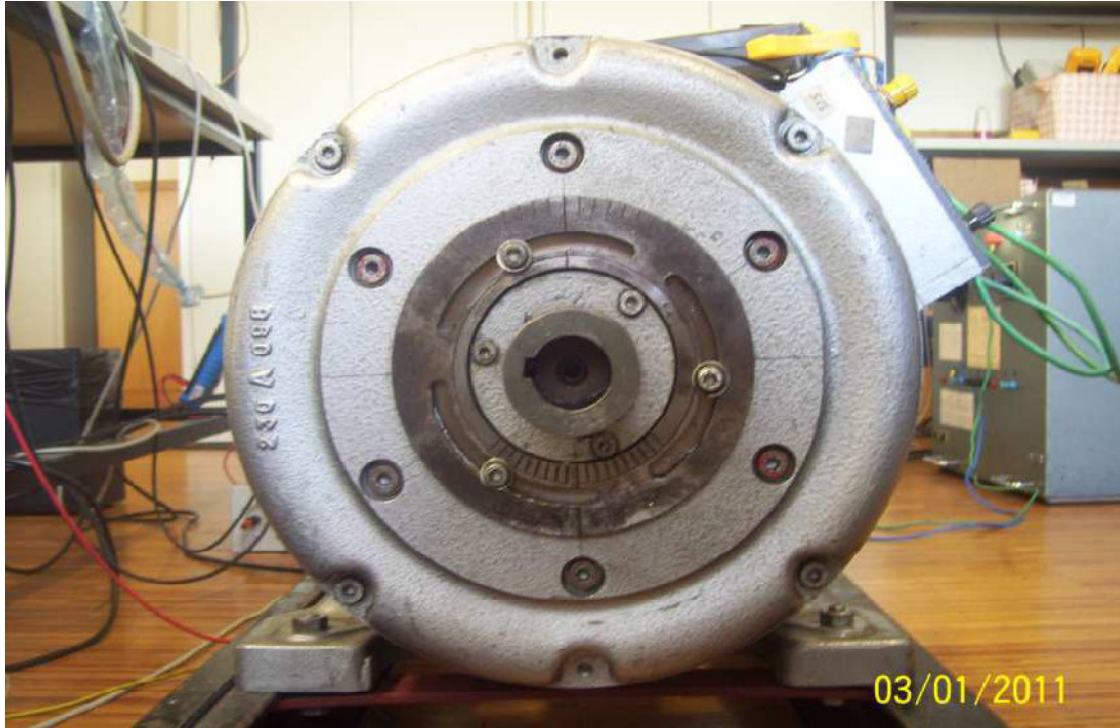
### III. 2. 1. Banc d'essai expérimental

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire des Machines Électriques (LME) de l'Université de Coimbra. Le banc d'essai comportant un moteur asynchrone à cage d'écuréuil de 28 barres dans le rotor et 36 encoches dans le stator, de 3 kW, 4 pôles, 380/660 V, 7.8/4.6 A, 50 Hz. Ce moteur entraîne comme charge mécanique une génératrice à courant continu alimentant une charge résistive variable (Fig. III.10). Pour choisir une excentricité continuellement variable, un mécanisme spécial a été introduit (Fig. III.11). Chacun des deux flasques a été modifié par l'introduction d'une paire de deux

anneaux excentrique placés l'un dans l'autre. Les deux anneaux ont tous deux la même excentricité. Dans ces conditions, la variation de l'excentricité de l'entrefer est obtenue en faisant tourner un des deux anneaux par rapport à l'autre. L'anneau intérieur a une graduation circulaire de sorte que la variation de l'excentricité entre deux graduations consécutives correspond au  $1/6$  de la longueur radiale typique de l'entrefer (1.2mm) du moteur. En manipulant simultanément les deux anneaux intérieur et extérieur, on peut choisir le niveau d'excentricité et la position angulaire de l'entrefer minimal. Les deux flasques ont une commande indépendante, permettant l'ajustement des niveaux d'excentricité d'entrefer égaux ou différents sur les deux extrémités du moteur [1]



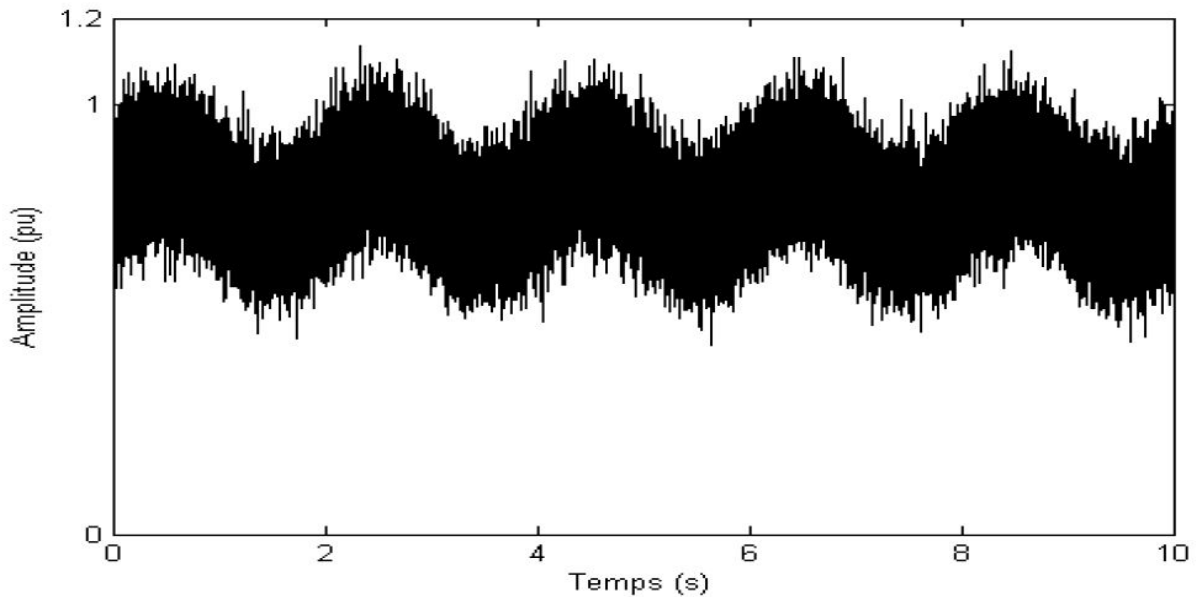
**Fig. III.16 :** Banc d'essai expérimental.



**Fig. III.17 :** Mécanisme spécial de changement de l'excentricité statique.

Les caractéristiques électriques du moteur asynchrone en cas de l'état sain et avec défaut d'excentricité mixte en régime non stationnaire (couple de charge variable). Avec 16.7 % d'ES et 10 % d'ED sous le profil du couple de charge variable et régi par l'expression (Equ. III.1). Ce couple variable est imposé en simulation en ajoutant une variation arbitraire autour de 80 % du couple nominal  $C_{rn}$  du moteur afin d'assimiler le couple de charge arbitrairement variable des essais expérimentaux.

$$C_r = 0.8C_{rn} + 0.1C_{rn}\sin(\pi t) + 0.1C_{rn}\text{Randn}(\text{size}(t)) \quad (\text{Equ. III.1})$$



**Fig. III.18 :** Profil du couple de charge arbitrairement variable imposé dans les tests de simulation et expérimentaux.

Les caractéristiques électriques sont affectées par la présence du défaut et modulées par la fréquence caractéristique de défaut  $f_r$ . Comme la charge est variable, le glissement  $g$  est aussi variable ainsi que la composante  $f_r$ . Ces caractéristiques électriques deviennent non stationnaires avec un contenu fréquentiel variable avec le temps. Cela peut engendrer des problèmes de diagnostic utilisant la TFR. La section suivante illustre l'analyse de ces signaux non stationnaire par la TFR en vue d'extraire les composantes caractéristiques de défaut.

### III. 2. 2. Résultats expérimentaux d'excentricité

Les résultats d'expérimentaux sont analysés, pour un fonctionnement non stationnaire (couple de charge variable) du moteur, Deux méthodes de traitement de signal sont utilisées, la transformée de Fourier rapide (*TFR*) appartient aux méthodes fréquentielles et la transformée en ondelettes discrète (*TOD*) appartient aux méthodes temps-fréquence. L'analyse spectrale (FFT) des grandeurs électriques du moteur asynchrone réalisée avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz a été choisie. Par conséquent,  $N_e = 100000$  échantillons sont acquis avec une résolution de fréquence égale à 0.1 Hz. Les spectres obtenus par la TFR sont présentés en échelle linéaire et en format normalisé, c'est à dire, l'amplitude de la composante continue.

Daubechies-44 (*db44*) a été l'ondelette mère utilisée dans l'analyse des expérimentaux utilisant la TOD. Afin de reproduire les conditions expérimentales, 10 % d'excentricité dynamique (*ED*) a été introduite dans tous les essais de simulation pour modéliser l'excentricité dynamique inhérente supposée existante dans le moteur des essais expérimentaux.

le moteur de test expérimentale comportent deux paires de pôles et d'après les expressions  $f_{exc-mix,1} = f - f_r = f(1 - \frac{1-g}{p})$  et  $f_{exc-mix,2} = f_r = f(1 - g)/p$  les composantes de fréquence caractéristiques du défaut d'excentricité mixte à extraire sont situées, approximativement, dans la moitié de la fréquence fondamentale d'alimentation  $f$  quel que soit la variation du glissement du fonctionnement à vide au fonctionnement en pleine charge. Le nombre des niveaux de décomposition est  $l_d = 8$ . Ainsi, la bande de fréquence affectée par le défaut est [19.53 : 39.06] Hz. Les signaux intéressants et leurs bandes de fréquences sont présentés dans Tab. III.8.

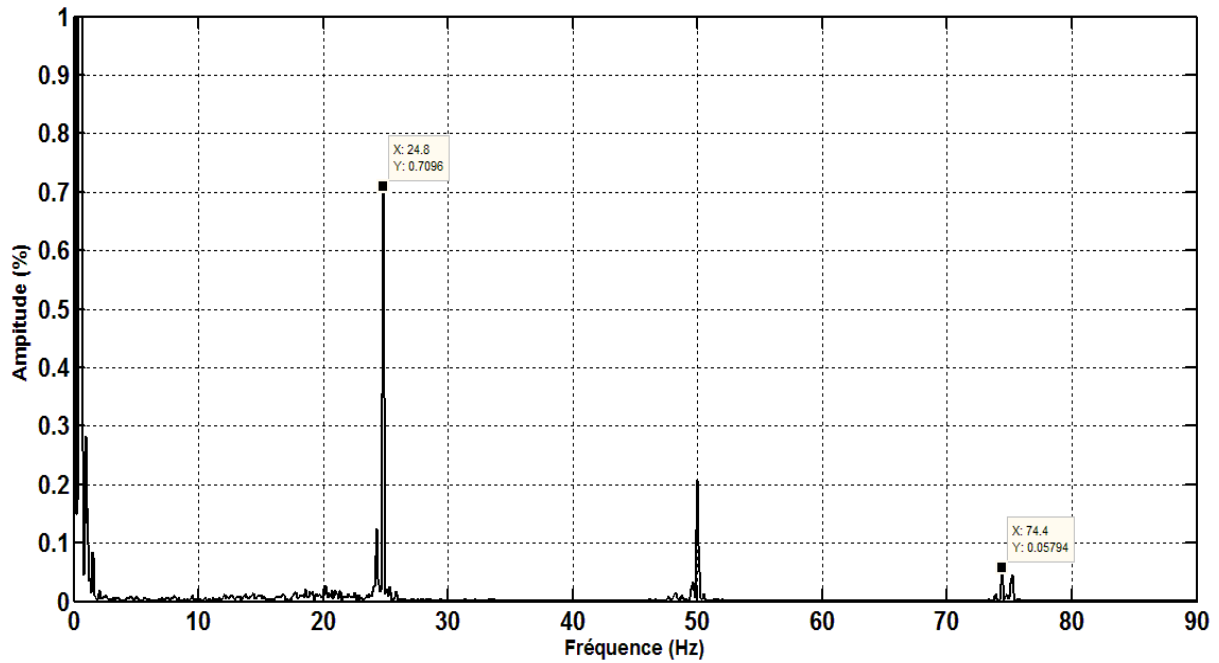
**Tab. III.8:** Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).

Signal	Bande fréquentielle (Hz)
$a_8$	0-19.53
$d_8$	19.53-39.06
$d_7$	39.06-78.12
$d_6$	78.12-156.25

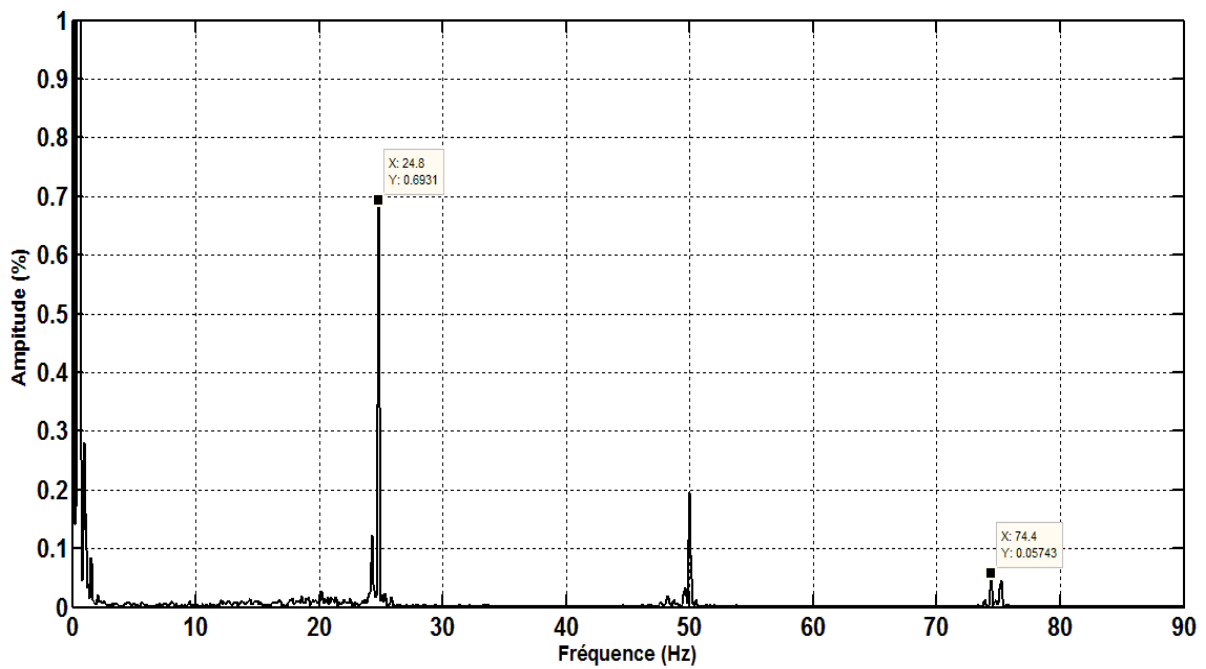
#### a. Analyse par la transformée de Fourier rapide (*TFR*)

Les spectres expérimentaux du l'enveloppe du courant statorique  $i_a(Env i_a)$ , et de la puissance apparent ( $s$ ) pour un moteur asynchrone présentant 66.7 % d'excentricité statique et un degré d'excentricité dynamique résiduelle pour le cas du couple de charge variable sont représentés dans les figures III.12 (a) et (b), respectivement. Il est évident que ces spectres sont influencés par la variation arbitraire du couple de charge. Les amplitudes des composantes caractéristiques de défauts ( $f \pm f_r$ ) et  $f_r$  sont démunies et cette diminution est proportionnelle à la variation de la charge. La localisation, dans les spectres, de ces composantes devient plus difficile et conduit même à un diagnostic erroné.





(a)



(b)

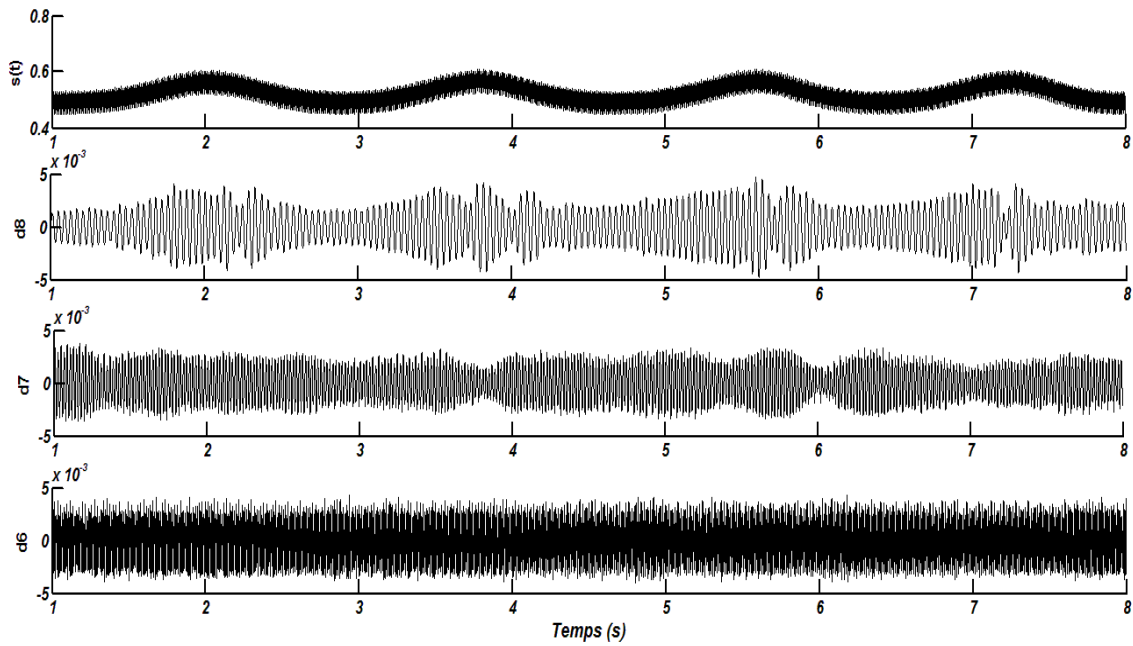
Fig. III.19 : Spectres du l'enveloppe du courant statorique  $i_a(Env i_a)$ (a)et (b) puissance apparent (s)  $la$ , du moteur asynchrone avec 66.7 % d'ES en régime non stationnaire, expérimental.

**b) Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)**

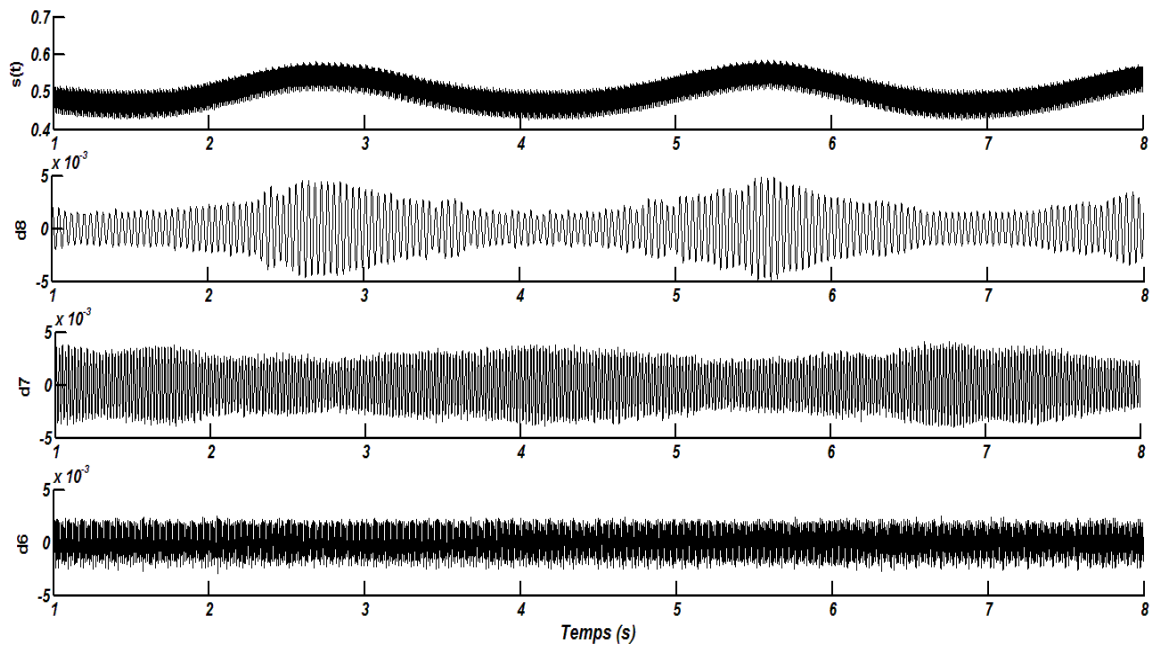
Les figures III.19 et III.20 et III.21 montrent, respectivement, les résultats expérimentaux des signaux de l'enveloppe du courant statorique  $i_a(Env_{i_a})$ , le module de vecteur de Park (MVP), et de la puissance apparent ( $s$ ), comme signaux originaux et les signaux de détail d6, d7 et d8 obtenus par la décomposition en ondelettes en utilisant db44 au niveau 8 des signaux originaux prés cités. Les résultats expérimentaux à l'état sain (Figs. III.13(a), III.14(a) et III.15(a)), montrent clairement des oscillations de faibles amplitudes sont observées dans le signal d8 reflétant l'excentricité résiduelles du moteur. Ces observations indiquent l'état sain du moteur. L'augmentation de l'amplitude de ces oscillations dans les figures III.13(b), III.14(b) et III.15(b)) permet de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut d'excentricité mixte dans le moteur.

Les figures III.13(c), III.14(c) et III.15(c) montre que ci de défaut d'excentricité mixte dans le moteur devina grave l'amplitude d'oscillations augmente parallèlement.

Afin d'évaluer quantitativement le défaut, le FSD donné en Tab. III.9 est défini de la même façon du FSD de l'analyse par la TOD en régime stationnaire. La figure III.22 représente les valeurs du FSD des méthodes utilisées pour le cas de 66.7 % d'ES et 10 % d'ED du moteur. Ce FSD permet aussi de détecter la présence de défaut d'excentricité mixte dans le moteur en régime non stationnaire pour le cas expérimental. Les mêmes observations du cas de régime stationnaire peuvent être tirées aussi dans ce cas. Si le diagnostic du défaut sans connaissance des valeurs instantanées du glissement constitue un avantage très important de cette analyse dans le régime non stationnaire vue la variation arbitraire de la charge. la méthode de l'enveloppe du courant statorique  $i_a(Env_{i_a})$  est la plus sensible au défaut suivie par, respectivement, la puissance apparente ( $s$ ) et MVP sont les méthodes moins sensible au défaut. Ces constatations sont bien démontrées dans la figure III.22

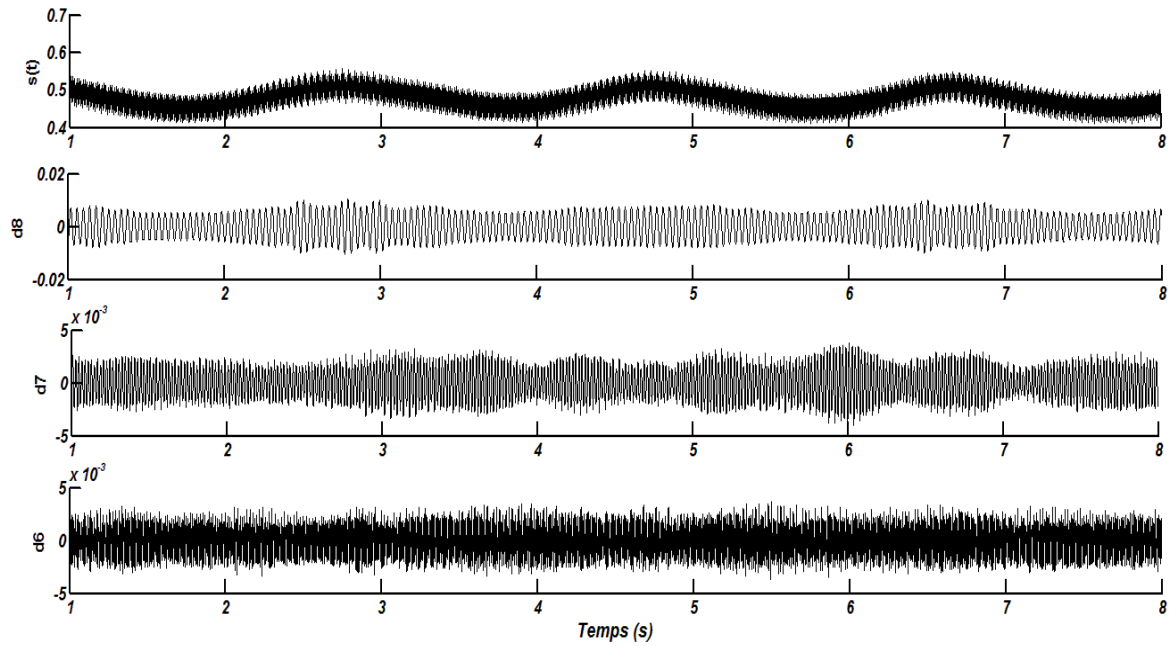


(a)



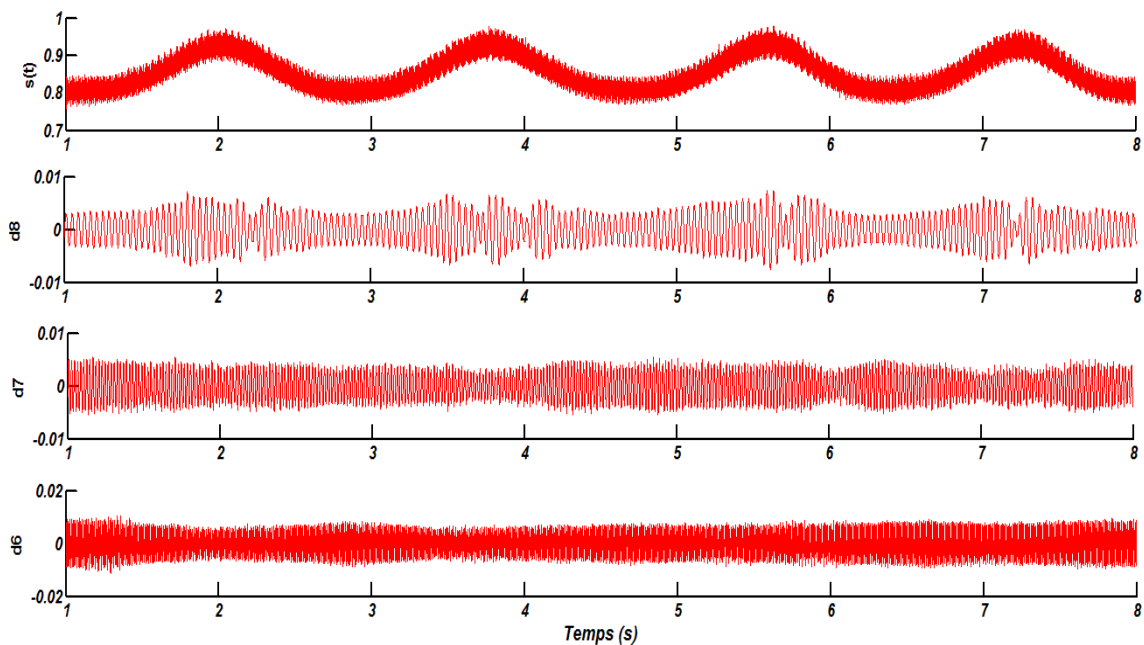
(b)

Fig. III.20 : Signature de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Envi_a$ ), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain (b) 16.7 % ES.



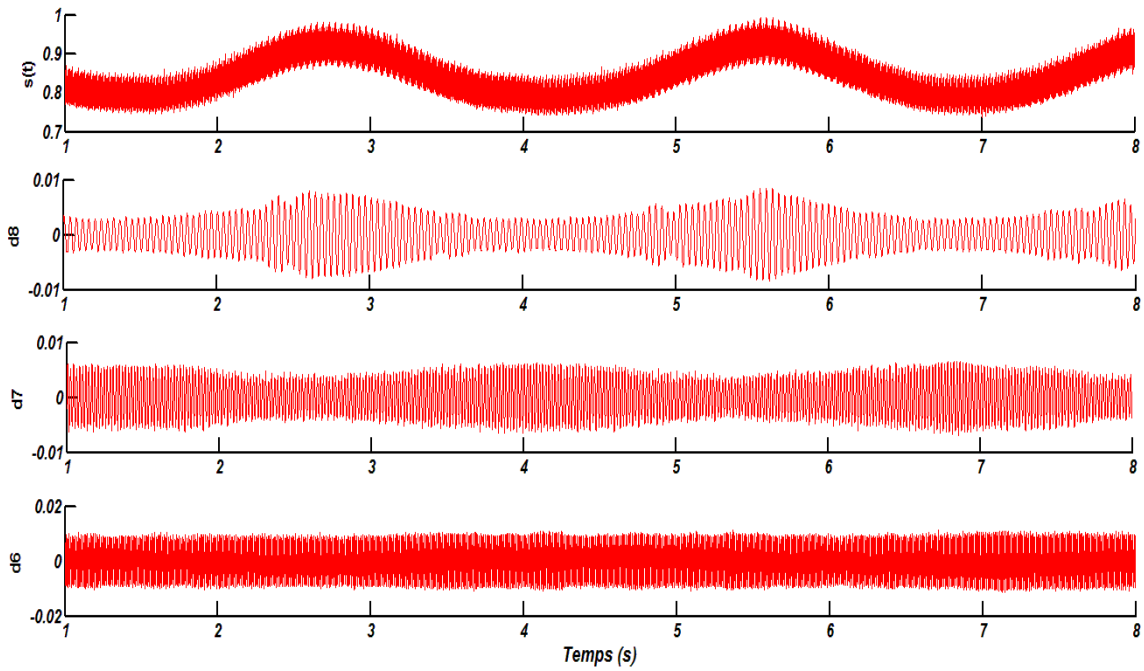
(c)

**Fig. III.20 :** Signature de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env_{i_a}$ ), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 66.7% ES.

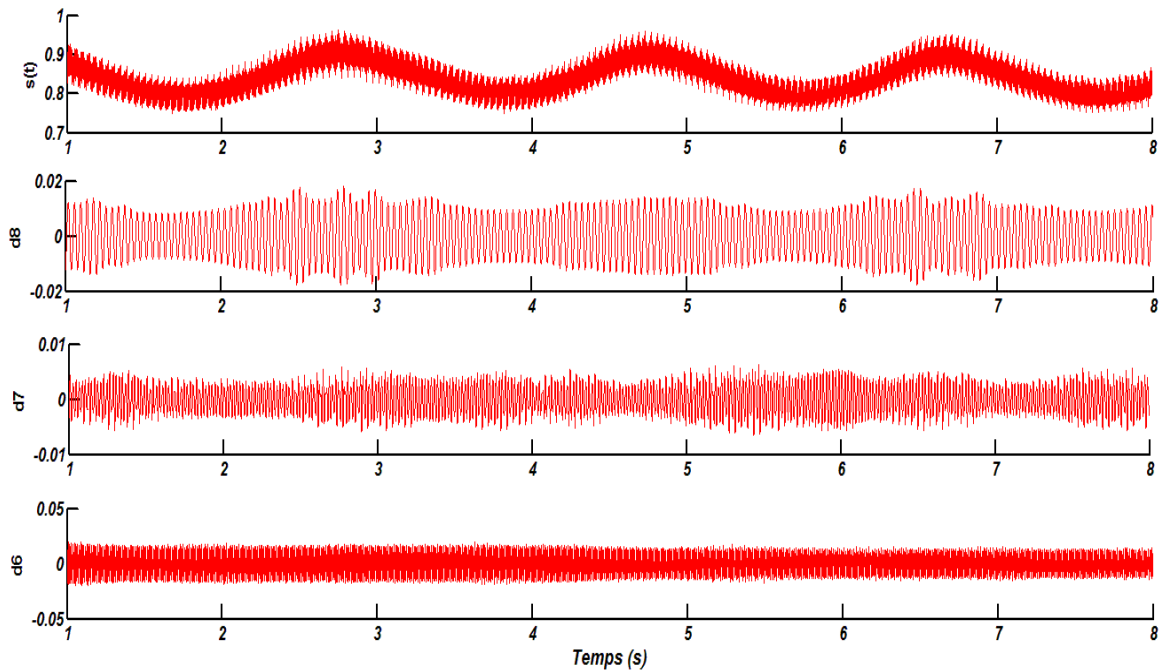


(a)

**Fig. III.21 :** Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain.

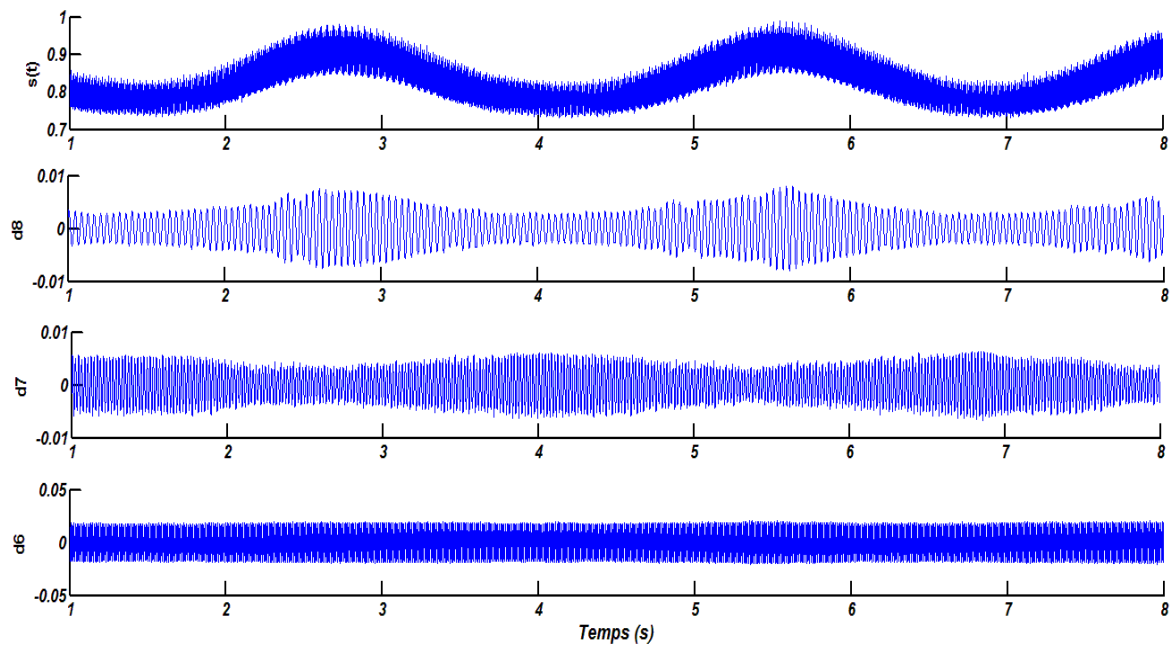
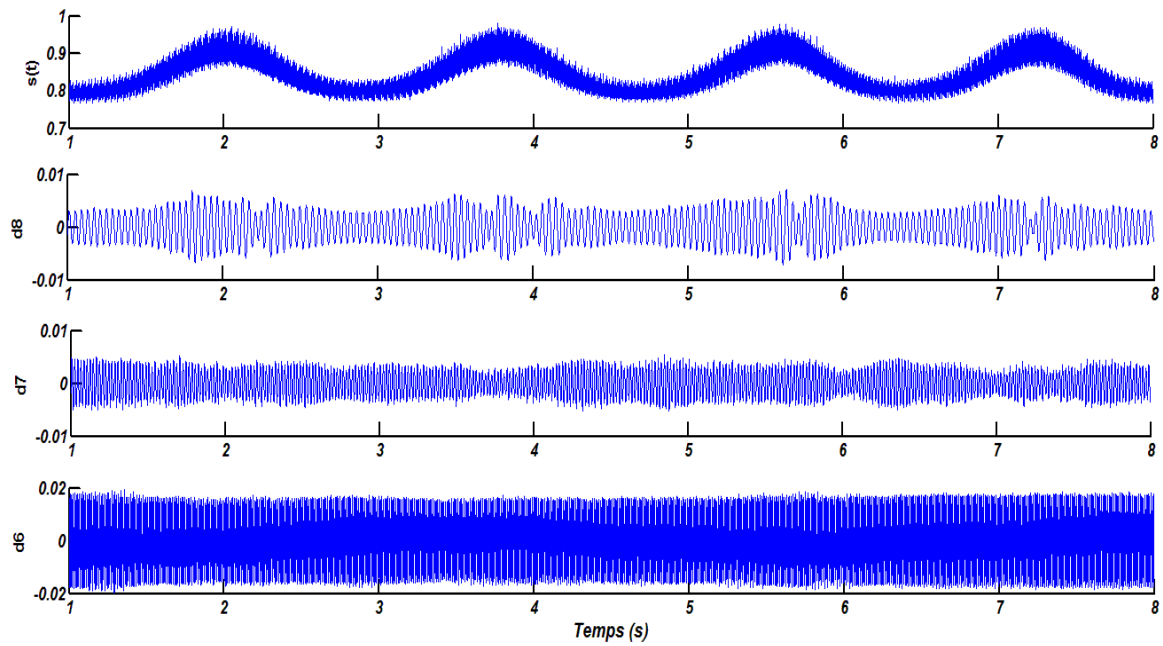


(b)

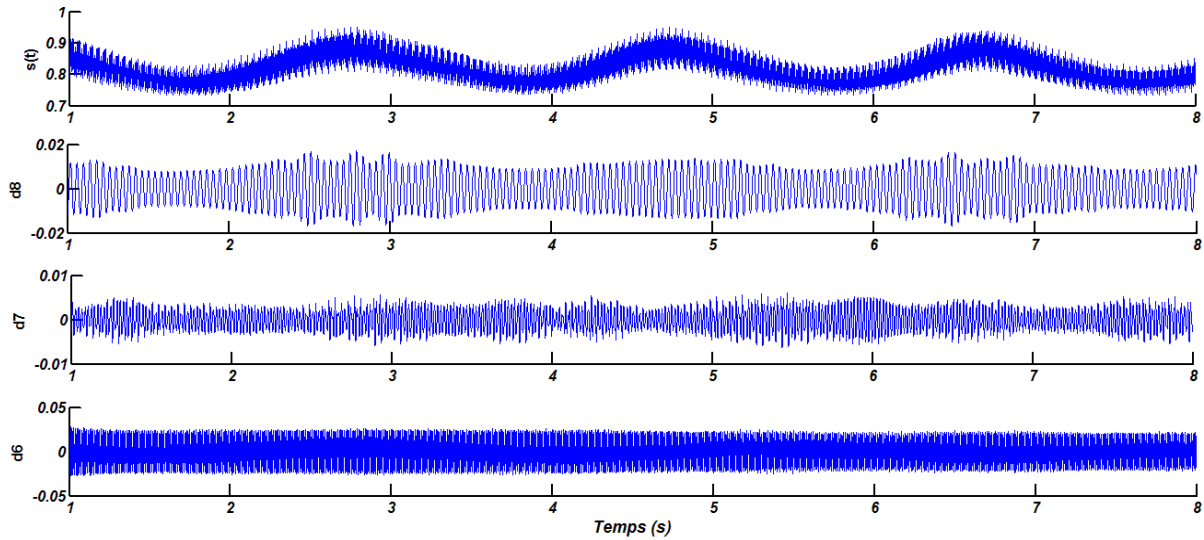


(c)

**Fig. III.21** : Signature de module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 16.7 % ES, (c) 66.7% ES.



**Fig. III.22 :** Signature de la puissance apparent ( $s$ ), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain, (b) 16.7 % ES.



(c)

Fig. III.21 : Signature de la puissance apparent (s), obtenue par db44, pour un moteur en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 66.7% ES.

Tab. III.9 : FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction de niveau de l'excentricité mixte du moteur en régime non stationnaire, expérimental.

Degré d'excentricité	Env <sub>ia</sub> %	MVP %	S %
Sain	0.0310	0.0011	0.0011
16 % ES	0.0306	0.0030	0.0014
66 % ES	0.0352	0.0090	0.0087

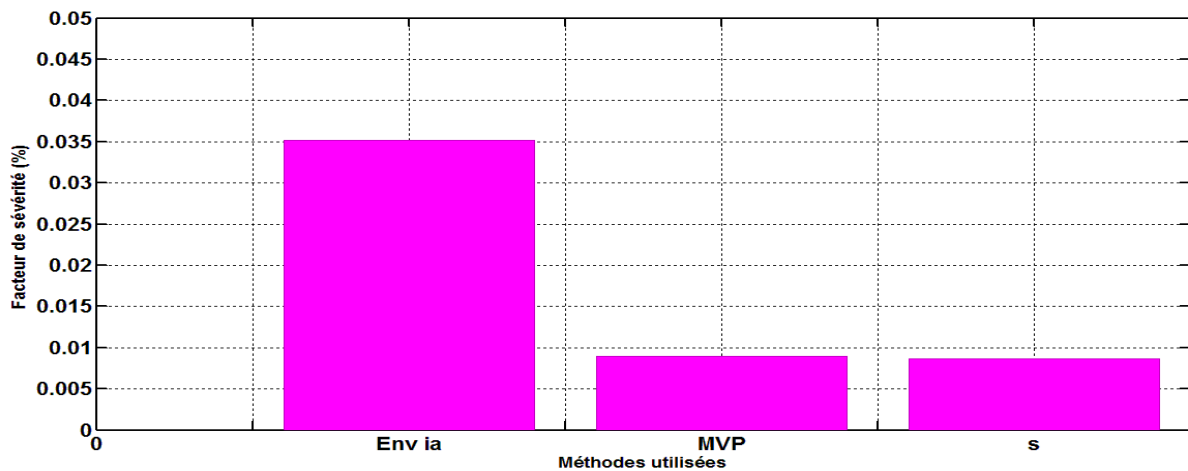


Fig. III.23 : FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées pour un moteur asynchrone fonctionnant en régime non stationnaire avec 66.7 % ES et 10 % ED.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude comparative détaillée sur l'application de la TFR et TOD pour le diagnostic de défaut des courts-circuits en régime stationnaire (couple de charge constant) et le défaut d'excentricité mixte en régime non stationnaire (couple de charge variable) dans la machine asynchrone, en utilisant divers signaux électriques issus de cette machine. Il s'agit du l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Envi_a$ ), du module du vecteur de Park (MVP) et de la puissance apparente.

Les tests expérimentaux montrent que, les deux méthodes d'analyse, la TFR et la TOD permettent un diagnostic fiable de défaut dans le régime stationnaire avec une supériorité remarquable de la TFR. En régime non stationnaire, le diagnostic de d'excentricité mixte devient très difficile et même erroné en utilisant TFR. En effet, l'amplitude des composantes caractéristiques des défauts ont été diminuées et cette diminution est proportionnelle à la variation du couple de charge. Le diagnostic par la TOD peut être réalisé en utilisant une analyse qualitative en suivant l'augmentation de l'énergie du signal de détail qui contient la composante caractéristique de défaut, ou bien par une analyse quantitative à travers l'utilisation du FSD. Comme pour le diagnostic du défaut de court-circuit, le diagnostic de l'excentricité mixte par la TOD a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance des valeurs instantanées du glissement du moteur. Ce dernier doit être mesuré ou estimé une fois seulement au départ des tests afin de définir les valeurs minimale et maximale de la bande fréquentielle recouvrant les fréquences des composantes caractéristique de défaut pour tous les régimes de fonctionnement du moteur.



# Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur le diagnostic des défauts de court-circuit entre spires statoriques en régime stationnaire et d'excentricité mixte en régime non stationnaire dans la machine asynchrone triphasée en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR) et la transformée en ondelettes discrète (TOD). Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage parce qu'ils sont les plus utilisés.

Le premier chapitre, de ce mémoire a été marqué par l'état de l'art de la machine asynchrone. Après avoir rappelé les éléments de constitution du moteur asynchrone et le principe de fonctionnement de la machine, on a présenté les différents défauts qui peuvent affecter les différentes parties de la machine, ainsi que les causes et les conséquences de la défaillance.

La première partie du second chapitre a été consacrée au développement des méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de court-circuit entre spires et d'excentricité mixte dans la machine asynchrone. Il s'agit des méthodes de l'enveloppe du courant statorique  $i_a$  ( $Env i_a$ ) et le module du vecteur de Park ( $MVP$ ) et la puissance apparente ( $s$ ). Les signatures des défauts de court-circuit entre spires et d'excentricité mixte dans ces méthodes sont aussi bien illustrées. La seconde partie de ce chapitre a été consacré à une étude théorique plus détaillée des techniques de traitement de signal en particulier la transformée de Fourier rapide ( $TFR$ ) la transformées en ondelettes ( $TO$ ).

Le dernier chapitre comporte deux parties, la première partie a été consacrée à la présentation des résultats expérimentaux de diagnostic du défaut de court-circuit entre spires en régime stationnaire (couple de charge constant), et la seconde partie a exposé les résultats expérimentaux de défaut d'excentricité mixte en régime non stationnaire (couple de charge variable) dans le moteur asynchrone triphasé. Ces défauts sont diagnostiqués en utilisant la transformée de Fourier rapide ( $TFR$ ) et par la transformée de l'ondelette ( $TOD$ ).

Les tests expérimentaux montrent que, les deux méthodes d'analyse, la TFR et la TOD permettent un diagnostic fiable de défaut de court-circuit entre spires dans le régime stationnaire avec une supériorité remarquable de la TFR. Mais en régime non stationnaire, le diagnostic d'excentricité mixte devient très difficile et même erroné en utilisant la TFR. En effet, l'amplitude des composantes caractéristiques des défauts ont été diminuées et cette diminution est proportionnelle à la variation du couple de charge.

Le diagnostic par la TOD peut être réalisé en utilisant une analyse qualitative en suivant l'augmentation de l'énergie du signal de détail qui contient la composante caractéristique de défaut, ou bien par une analyse quantitative à travers l'utilisation du FSD, la définition de nouveaux facteurs de sévérité de défaut, peut mieux quantifier les défauts et faciliter la tâche de diagnostic. Comme pour le diagnostic du défaut de court-circuit, le diagnostic de l'excentricité mixte par la TOD a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance des valeurs instantanées du glissement du moteur. Ce dernier doit être mesuré ou estimé une fois seulement au départ des tests afin de définir les valeurs minimale et maximale de la bande fréquentielle recouvrant les fréquences des composantes caractéristique de défaut pour tous les régimes de fonctionnement du moteur.

En perspective, pour améliorer notre étude du diagnostic des défauts de la machine, l'étude pourrait être élargit en considérant le défaut de court-circuit en régime non stationnaire et d'autre outil de diagnostic et de détection avancées (réseaux neurones, logique floue, neuro flou) surtout en régime variable.

## Bibliographie

- [1] **K. Yahia** « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone triphasée par une approche signal », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2013.
- [2] **A. Bouraiou** « Diagnostic de défaut par logique floue », université Annaba 2010
- [3] **G. Didier**, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-i, octobre 2004
- [4] **F. Filippetti, g. Franceschini, c. Tassoni**, « broken bar detection in induction machines; comparison between current spectrum approach aparameter estimation approach », IEEE industry application conference 94, vol. 1, Denver, USA, Oct 1994.
- [5] **M. Retima** « Diagnostic des Défaits statoriques dans les moteurs asynchrones triphasés » Université Mohamed Khider – Biskra. 2013
- [6] **N. Bessous** « contribution au diagnostic des machines asynchrones » mémoire de Magister en électrotechnique, Université Constantine 2007.
- [7] **W. R. Finley, m. M. Hodowanec, w. G. Holter**, « An analytical approach to solving motor vibration problems, » IEEE transactions on industry application, vol. 363, no. 5, pp. 1467-1480. Sept. / oct. 2000.
- [8] **J. Penman, h. G. Sedding, b. A. Lloyd, w. T. Fink**, « Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors, » IEEE transactions on energy conversion, vol. 9, no. 4, pp. 652-658, Dec. 1994.
- [9] **S. Nandi, h. A. Toliyat**, « Novel frequency domain based technique to detect incipient stator interturn faults in induction machines using stator induced voltage after switch-off, » IEEE transactions on industry application, vol. 38, no. 1, pp. 101–109, Jan./ Feb. 2002.
- [10] **A. Khezzar, e. K. Oumaamar, m. Hadjami, m. Boucherma, h. Razik**, « Induction motor diagnosis using line neutral voltage signatures, » IEEE transactions on industrial electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4581-4591, nov. 2009.
- [11] **A. Ghoggal**, « Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modélisation et détection des défauts, » Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.
- [12] **M. Sahraoui, A. Ghoggal, s. E. Zouzou, A. Aboubou, H. Razik**, « Modelling and detection of interturn short circuits in stator winding of induction motors, » IEEE industrial electronics conference iecon'06, France, pp. 4981-4986, Nov. 2006.

- 
- [13] **M. Sahraoui**, «Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones,» Thèse de Doctorat, Université de Biskra, déc. 2010
- [14] **A. Menacer**, «contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts»Thèse de doctorat, Université de Batna, Déc. 2007.
- [15] **V .Perrier** «Idée de la base application de la théorie des ondelettes», laboratoire de modélisation et calcul de l'image institut national Polytechnique de Grenoble 2005.
- [16] **M. Misiti. Y. Misiti. G. Oppenheim. j. M. Poggi**. «Wavelet toolbox for use with Matlab 2010»
- [17] **G. Baudoin. j.-f. Bercher** «Transformée de Fourier Discrete» Ecole supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électroniqueNov. 2001 – version 0.1
- [18] **E. Oran Brigham**, «Fast Fourier transform and its applications,» prentice hall, 1988
- [19] **B. Trajin**, «analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défautsmécaniques dans les entraînements asynchrones, application à la surveillance des roulements à billes,» Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, Déc. 2009.
- [20] **W. T. Thomson, M. Fenger**, « Current signature analysis to detect induction motor faults, » IEEE industry application magazine, pp. 26-34, Jul. /Aug. 2001.
- [21] **M. G. Joksimovic, J. Penman, N. Arthur**, « The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors, » IEEE transaction on industry electronics, vol. 47, no. 5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.
- [22] **M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys**, « Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques, » IEEE transactions on industrial electronics, vol. 14, no. 1, pp. 14-22, Jan. 1999.
- [23] **G. Bossio, c.D. Angelo, J. Solsona, G. García, m. I. Valla**, « a 2-d model of the induction machine: extension of the modified winding function approach, » IEEE transactions on energy conversion, vol. 19, no. 1, pp. 144-150, mar. 2004.
- [24] **M. Eltabach, A. Charara, I. Zein**,«A comparison of external and internal methods of signal spectral analysis for broken rotor bars detection in induction motors," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 51, no. 1, Feb. 2004..
- [25] **H. Cherif** «Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes. » Thèse de Magister, UniversitéMohamed Khider– Biskra 2014

- [26] **R. Benzid.** «Ondelettes et statistiques d'ordre supérieur appliquées aux signaux unidimensionnels», Thèse doctorat, Université de Batna, septembre 2005.
- [27] **J. A. Daviu, p. J. Rodriguez, m. R. Guasp, m. P. Sanchez, and a. Arkkio,** « Detection of combined faults in induction machines with stator parallel branches through the DWT of the startup current, » mechanical systems and signal processing journal, vol. 23, pp. 2336–2351, 2009.
- [28] **S. H. Kia, h. Henaoui, g. A. Capolino,** «Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation,» IEEE transactions on industry application, vol. 45, no. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.