

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 : Machines Electriques

Réf:.....

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

**MASTER**

***Thème***

*Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques  
dans la machine asynchrone triphasée par la transformée  
en ondelettes*

Présenté par :  
**RACHID Mostapha Amine**

Soutenu le: 31 Mai 2016

Devant le jury compose de :

Dr. Abdelhakim Dendouga  
Dr. Khaled Yahia  
Dr. Adel Ghoggal

MCA  
MCA  
MCA

Président  
Encadreur  
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 Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée par la transformée en ondelettes*

**Présenté par :**

Rachid Mostapha Amine

**Avis favorable de l'encadreur :**

Dr. Khaled Yahia

*signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Dr. Dendouga Abdelhakim**

*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 cassure de barres rotoriques dans  
la machine asynchrone triphasée par la transformée en  
ondelettes*

Réalisé par : **Rachid Mostapha Amine**

Proposé et dirigé par : **Dr. Khaled Yahia**

# *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,  
Mes frères et mes 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.*

*Mostapha*

## **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 mes collègues **LAADJEL KHALED** et **Mehdi Bechar** 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. Dendouga Abdelhkim**, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

***Dr. Adel Ghoggal** pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.*

*Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à **Mr. 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 mes amis.*

## *Liste des tableaux*

<b>Tab. II.1 :</b> Familles d'ondelettes.....	<b>25</b>
<b>Tab. III.1 :</b> Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).....	<b>33</b>
<b>Tab. III.2 :</b> FSD des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en pleine charge, expérimental.....	<b>47</b>
<b>Tab. III.3 :</b> FSD des méthodes utilisées en fonction du type de l'ondelette mère avec deux barres cassées du moteur en régime stationnaire, expérimental.....	<b>48</b>
<b>Tab. III.4 :</b> FSD du module de vecteur de Park (MVP) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.13.....	<b>49</b>
<b>Tab. III.5 :</b> FSD de la puissance réactive instantanée (PRI) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.13.....	<b>50</b>
<b>Tab. III.6 :</b> FSD du facteur de puissance (FP) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.13.....	<b>51</b>
<b>Tab. III.7 :</b> FSD, obtenu par db45, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire, expérimental.....	<b>59</b>

## *Liste des figures*

<b>Fig. I.1</b> : Constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	<b>3</b>
<b>Fig. I.2</b> : Stator de la machine asynchrone.....	<b>4</b>
<b>Fig. I.3</b> : Rotor à cage d'écureuil.....	<b>5</b>
<b>Fig. I.4</b> : Classification des défauts selon leurs origines.....	<b>7</b>
<b>Fig. I.5</b> : Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone.....	<b>8</b>
<b>Fig. I.6</b> : Proportion des défauts.....	<b>10</b>
<b>Fig. I.7</b> : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.....	<b>10</b>
<b>Fig. I.8</b> : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....	<b>11</b>
<b>Fig. II.1</b> : Représentation temporelle vers fréquentielle.....	<b>20</b>
<b>Fig. II.2</b> : Représentation temporelle vers ondelettes.....	<b>22</b>
<b>Fig. II.3</b> : Quelques formes des ondelettes usuelles.....	<b>23</b>
<b>Fig. II.4</b> : Pavage de la Transformée en ondelettes ( <i>TO</i> ).....	<b>24</b>
<b>Fig. II.5</b> : Décomposition du signal <i>f</i> en approximations et détails.....	<b>26</b>
<b>Fig. II.6</b> : Décomposition simple du signal <i>f</i> en approximations et détails.....	<b>27</b>
<b>Fig. II.7</b> : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	<b>28</b>
<b>Fig. III.1</b> : Banc d'essai expérimental.....	<b>31</b>
<b>Fig. III.2</b> : Rotors utilisés.....	<b>32</b>
<b>Fig. III.3</b> : Caractéristiques module du vecteur de Park ( <i>MVP</i> ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge , haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.....	<b>34</b>
<b>Fig. III.4</b> : Caractéristiques la puissance réactive ( <i>PRI</i> ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge , haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.....	<b>35</b>
<b>Fig. III.5</b> : Caractéristiques facteur de puissance ( <i>FP</i> ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge , haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.....	<b>36</b>
<b>Fig. III.6</b> : Signature de module du vecteur de Park ( <i>MVP</i> ), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, expérimental.....	<b>37</b>

<b>Fig. III.6</b> : Signature de module du vecteur de Park ( <i>MVP</i> ), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite), (b) 02 BC, (c) 04 BC, expérimental.....	<b>38</b>
<b>Fig. III.7</b> : Signature de la puissance réactive instantanée ( <i>PRI</i> ), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, (b) 02 BC, expérimental.....	<b>39</b>
<b>Fig. III.7</b> : Signature de la puissance réactive instantanée ( <i>PRI</i> ), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite), (c) 04 BC, expérimental.....	<b>40</b>
<b>Fig. III.8</b> : Signature de facteur de puissance ( <i>FP</i> ), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, expérimental.....	<b>40</b>
<b>Fig. III.8</b> : Signature de facteur de puissance ( <i>FP</i> ) obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite): (b) 02 BC, (c) 04 BC, expérimental.....	<b>41</b>
<b>Fig. III.9</b> : Signature du module de vecteur de Park ( <i>MVP</i> ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain.....	<b>42</b>
<b>Fig. III.9</b> : Signature du module de vecteur de Park ( <i>MVP</i> ),obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite),(b) 01BC, (c) 04BC.....	<b>43</b>
<b>Fig. III.10</b> : Signature de la puissance réactive instantanée ( <i>PRI</i> ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain, (b) 01 BC.....	<b>44</b>
<b>Fig. III.10</b> : Signature de la puissance réactive instantanée ( <i>PRI</i> ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite), (c) 04 BC.....	<b>45</b>
<b>Fig. III.11</b> : Signature du facteur de puissance ( <i>FP</i> ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain.....	<b>45</b>
<b>Fig. III.11</b> : Signature du facteur de puissance ( <i>FP</i> ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite), (b) 01BC, (c) 04BC.....	<b>46</b>

<b>Fig. III.12 :</b> FSD, obtenu par db45 en fonction du nombre de barres cassées.....	<b>48</b>
<b>Fig. III.13 :</b> FSD du MVP en fonction de l'ondelette mère utilisée.....	<b>49</b>
<b>Fig. III.14 :</b> FSD du MVP en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées.....	<b>50</b>
<b>Fig. III.15 :</b> FSD de la PRI en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées.....	<b>50</b>
<b>Fig. III.16 :</b> FSD du FP en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées.....	<b>51</b>
<b>Fig. III.17 :</b> Signature du module de vecteur de Park (MVP) du moteur asynchrone avec quatre barres cassées en régime stationnaire et non stationnaire, expérimental.....	<b>52</b>
<b>Fig. III.18 :</b> Signature de la puissance réactive instantanée (PRI) du moteur asynchrone avec quatre barres cassées en régime stationnaire et non stationnaire, expérimental.....	<b>53</b>
<b>Fig. III.19 :</b> Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain.....	<b>54</b>
<b>Fig. III.19 :</b> Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 01 BC, (c) 04BC.....	<b>55</b>
<b>Fig. III.20 :</b> Signature de la puissance réactive instantanée (PAI), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain, (b) 01BC.....	<b>56</b>
<b>Fig. III.20 :</b> Signature de la puissance réactive instantanée (PRI), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 04BC. ....	<b>57</b>
<b>Fig. III.21 :</b> Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain.....	<b>57</b>
<b>Fig. III.21 :</b> Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 01BC, (c) 04 BC.....	<b>58</b>

## *Liste des symboles*

$H$ :	Champ magnétique.
$B$ :	Induction magnétique.
$\Psi_S$ :	Flux magnétique
$p$ :	Nombre de paires de pôles.
$B_s$ :	Induction magnétique dans l'entrefer créée par le courant statorique.
$\mu_0$ :	Perméabilité magnétique de l'air.
$\sigma$ :	La force radiale créée par le champs d'entrefer.
$N$ :	Fonction d'enroulement.
$N_s$ :	Nombre de spires.
$N_e$ :	Nombre d'encoches statoriques.
$N_b$ :	Nombre de barres rotoriques.
$N$ :	Fonction de distribution.
$g$ :	glissement.
$W$ :	Vitesse angulaire électrique du rotor
$f$ :	Fréquence d'alimentation.
$f_r$ :	Fréquence rotorique.
$fb$ :	Fréquence caractéristique du défaut de barres.
$l_d$ :	Nombre de niveaux de la décomposition.
$MVP$ :	Module de vecteur de Park.
$FP$ :	Facteur de puissance.
$PRI$ :	Puissance réactive instantanée.
$TFR$ :	Transformée de Fourier rapide.
$TOD$ :	Transformée en ondelettes discrete.
$TO$ :	Transformée en ondelettes.
$RTF$ :	Représentation temps fréquence.
$DWV$ :	Distribution de Wigner Ville.
$Sig. Orig (t)$ :	Signal original en fonction du temps.

---

## *Sommaire*

<b>Introduction générale</b> .....	1
 <b>Chapitre I : Etat de l'art</b>	
<b>I.1. Eléments de constitution de la machine asynchrone</b> .....	3
I.1.1. Stator.....	4
I.1.2. Rotor.....	4
<b>I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone</b> .....	5
<b>I.3. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences</b> .....	6
I. 3. 1. Défauts statoriques.....	6
I. 3. 2. Défauts rotoriques.....	6
I. 3. 2. 1. Cassure de barres et de portions d'anneau de la cage d'écureuil.....	8
I. 3. 2. 2. Défauts de roulements.....	9
I. 3. 2. 3. Défauts Excentricité rotoriques.....	9
<b>I. 4. Etude statistique</b> .....	9
<b>Conclusion</b> .....	12
 <b>Chapitre II : Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone</b>	
<b>II. 1. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone</b> .....	13
<b>II. 2. Approches de diagnostic de défauts de la machine asynchrone</b> .....	13
II. 2. 1. Approche signal.....	13
1. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques.....	14
2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	15
3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	15
4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	15
5. Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	15
6. Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park.....	16
7. Diagnostic par l'analyse des puissances instantanées.....	16

<b>II. 3. Méthodes dédié au diagnostic de la machine asynchrone</b> .....	16
II. 3. 1. Méthodes basées sur un seul courant statorique.....	17
II. 3. 2. Méthodes basées sur les trois courants statoriques.....	17
II. 3. 3. Méthodes basées sur les courants et tensions statoriques.....	19
<b>II. 4. Techniques de traitement de signal dédiées au diagnostic de la machine asynchrone</b>	
II. 4. 1. Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	20
II. 4. 2. Transformée en ondelettes (TO).....	22
II. 4. 2. 1. Transformée en ondelettes continue (TOC).....	23
II. 4. 2. 2. Transformée en ondelette discrète (TOD).....	25
II. 4. 2. 3. Energie de la décomposition d'ondelette.....	28
II. 4. 3. Avantages de la transformée en ondelettes.....	29
<b>Conclusion</b> .....	30
 <b>Chapitre III : Diagnostic de défaut de cassure de barres rotorique dans la machine asynchrone</b>	
<b>III.1. Banc d'essai expérimental</b> .....	31
<b>III. 2. Résultats expérimentaux</b> .....	32
III. 2. 1 Régime stationnaire.....	33
a). Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic.....	33
b). Analyse par la transformée de Fourier rapide ( <i>TFR</i> ).....	37
c). Analyse par la transformée en ondelettes discrète ( <i>TOD</i> ).....	42
III. 2. 2 Régime non stationnaire.....	52
a). Analyse par la transformée de Fourier rapide ( <i>TFR</i> ).....	52
b). Analyse par la transformée en ondelettes discrète ( <i>TOD</i> ).....	54
<b>Conclusion</b> .....	60
<b>Conclusions générales</b> .....	62
<b>Bibliographie</b> .....	64

# Introduction générale

Ce travail expose le diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles, du fait de sa grande robustesse. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...et dans la propulsion électrique des véhicules, de tramway et de train de grande vitesse, voire même de bateaux de croisière [2].

Malgré ces avantages remarquables, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats [8].

L'objectif principal du présent travail est d'exploiter deux méthodes de traitement de signal appliquées pour le diagnostic des défauts cassures de barres rotoriques en régime non stationnaire, la transformée de Fourier rapide (*TFR*) et la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).

Le présent mémoire sera organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone, où nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts affectant cette machine avec leurs causes.

Dans la première partie du second chapitre, nous présentons les différentes approches utilisées pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Nous présentons par la suite 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 (courant statorique instantané  $i_a$ ). Le deuxième groupe contient les méthodes basées sur l'analyse du contenu spectral des trois courants statoriques à travers 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 statoriques à travers le facteur de puissance (*FP*) et la puissance réactive instantanée (*PRI*). 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*) et la transformées en ondelettes (*TO*).

Dans le troisième chapitre, nous présentons, respectivement, les résultats expérimentaux de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés fonctionnant en régimes stationnaire (couple de charge constant) et non stationnaire (couple de charge variable). Ces défauts sont diagnostiqués en utilisant les signaux électriques du moteur analysés par la transformé de Fourier rapide (*TFR*) et la transformé en ondelettes discrète (*TOD*).

Enfin, une conclusion générale clôture ce modeste travail.

## Résumé :

L'utilisation de la machine asynchrone est la plus croissante dans les différents domaines industriels. Pour cela, la nécessité impose plusieurs projets de recherche pour l'étude de la commande, la maintenance et la détection des défauts de cette machine.

Dans ce travail nous avons utilisé deux techniques, la transformée de Fourier rapide (*TFR*) et la transformée en ondelettes discrète (*TOD*) dans le but du diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans les moteurs asynchrones. La première est une technique largement utilisée pour le diagnostic des défauts. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge variables. Donc, la nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire. Sur cette problématique, l'utilisation de la transformée en ondelettes discrète (*TOD*) des grandeurs électriques de la machine asynchrone en vue du diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans le cas des fonctionnements à couple de charge variable est obligatoire. Dans ce cas, l'analyse par la *TOD* peut accomplir la tâche du diagnostic de défaut est donné des bons résultats.

**Mots-clés :** Moteur asynchrone, Transformée de Fourier rapide (*TFR*), Transformée en ondelettes discrète (*TOD*), cassure de barres rotoriques.

## ملخص :

لقد أصبحت الآلة الغير متزامنة الأكثر استعمالا في العديد من المجالات الصناعية، لذلك وضعت أبحاث مختلفة لدراستها من أجل التحكم بها و حمايتها وصيانتها واكتشاف اعطابها. في هذا العمل قمنا باستعمال تقنيتين تحويل فورية السريع (*TFR*) و التحويل المويجي المتقطع (*TOD*) لهدف تشخيص اعطاب انكسار قضبان الدوار في الآلات الغير متزامنة. الأولى هي طريقة واسعة الانتشار في تشخيص الاعطاب. هذه الطريقة تعطي نتائج جيدة في حالات التشغيل باستطاعة كبيرة او بعزم ثابت لكن الصعوبات تظهر في شروط التشغيل تحت العزم وسرعة الدوران وتوترات التغذية المتغيرة. هذا يتطلب إيجاد طرق أخرى لمعالجة الإشارات الغير مستقرة. حول هذه المسألة، الطريقة الثانية استعمال التحويل المويجي المتقطع للمقادير الكهربائية للآلات غير متزامنة من أجل تشخيص اعطاب انكسار قضبان الدوار في حالة التشغيل تحت عزم متغير. في هذه الحالة التحليل المويجي يمكن ان يكمل عملية التشخيص ويعطي نتائج جيدة.

**كلمات مفتاحية :** الآلات الغير متزامنة ، التحويل فورية السريع ، التحويل المويجي المتقطع ، انكسار القضبان.

# Chapitre I

## Etat de l'art

### Introduction

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes avec un bon rendement et de son excellente fiabilité.

Ce chapitre, la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous effectuons une analyse des différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux en donnant leurs causes, conséquences et signatures sur les différentes grandeurs de la machine [1].

### I. 1. Eléments de constitution de la 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).

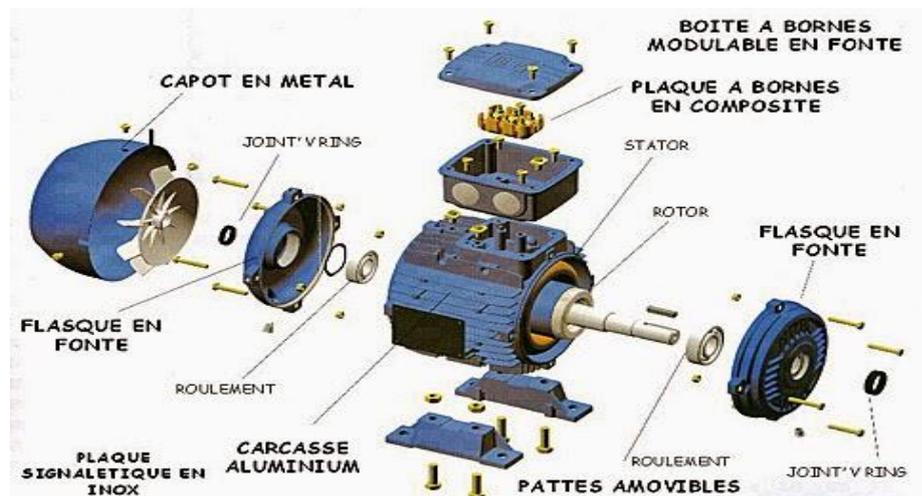


Fig. I.1 : Constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

La machine asynchrone à cage est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor.

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

### I. 1. 1. Stator

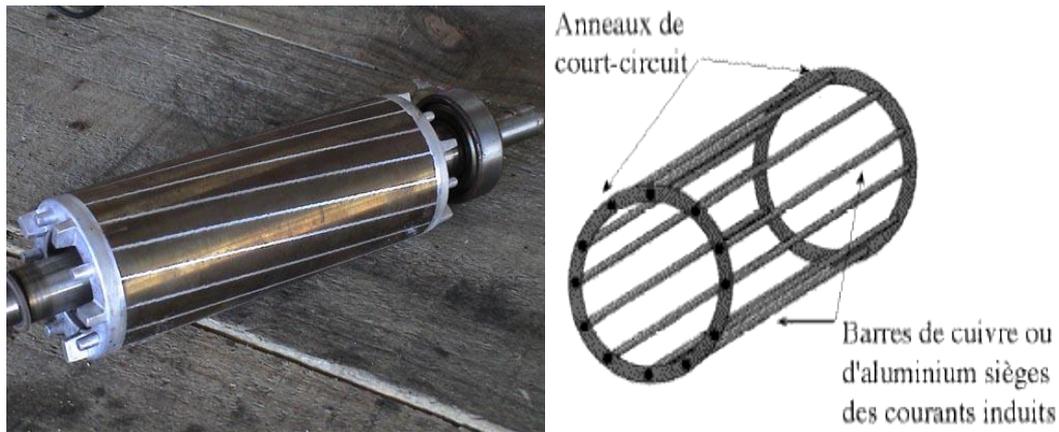
Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (fig. I.2) [2].



**Fig. I.2 :** Stator de la machine asynchrone.

### I. 1. 2. Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lumination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites 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 forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre (Fig. I.3) [3].



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

## I. 2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé 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  $N_s$  différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques 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 limitée 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 [4] :

$$n = f/p \quad (\text{I.1})$$

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

$p$  : représente le nombre de paire de pôles.

### **I. 3. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences**

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, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [1] :

#### **I. 3. 1. Défauts statoriques :**

- Court-circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

#### **I. 3. 2. Défauts rotoriques :**

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

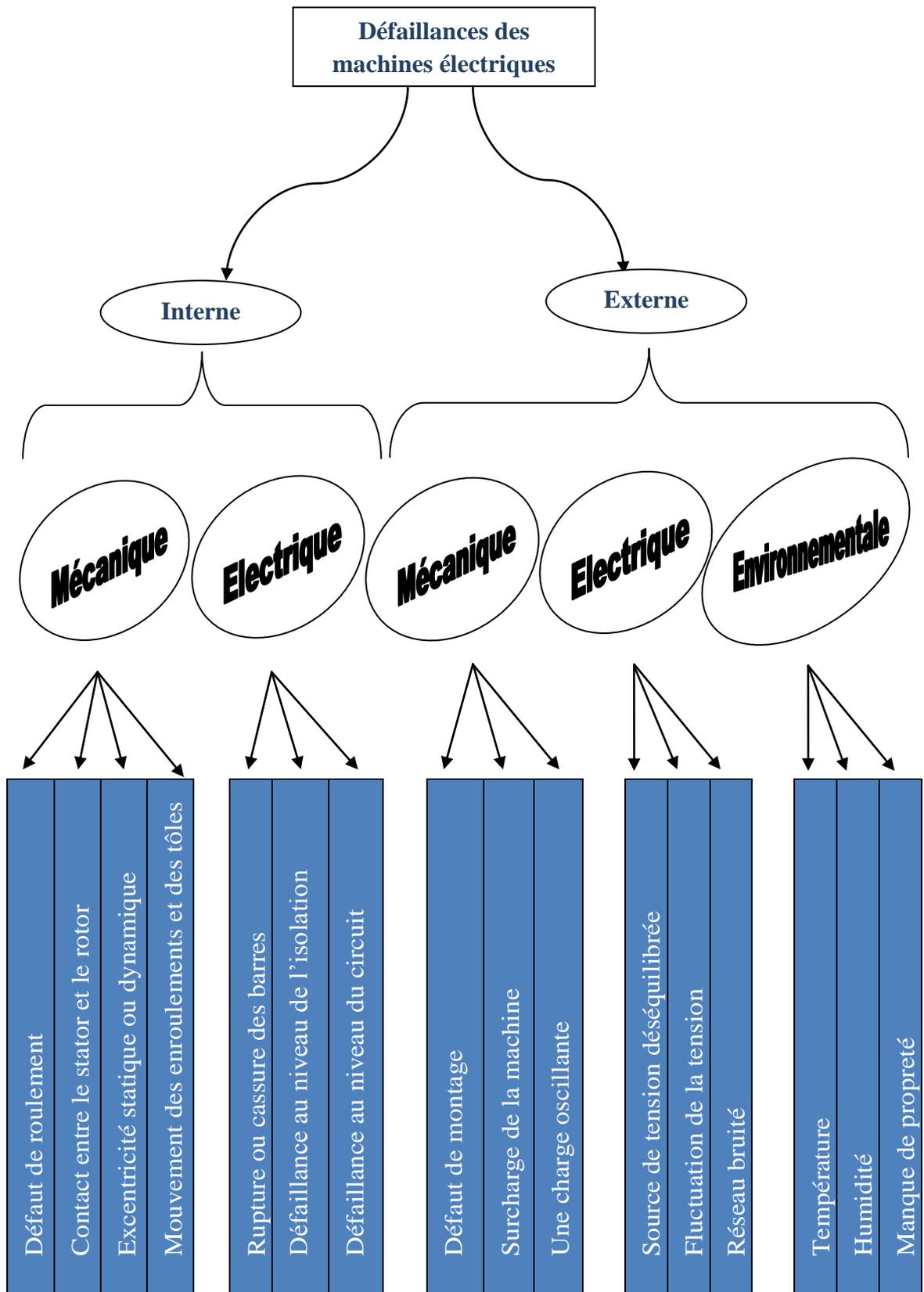
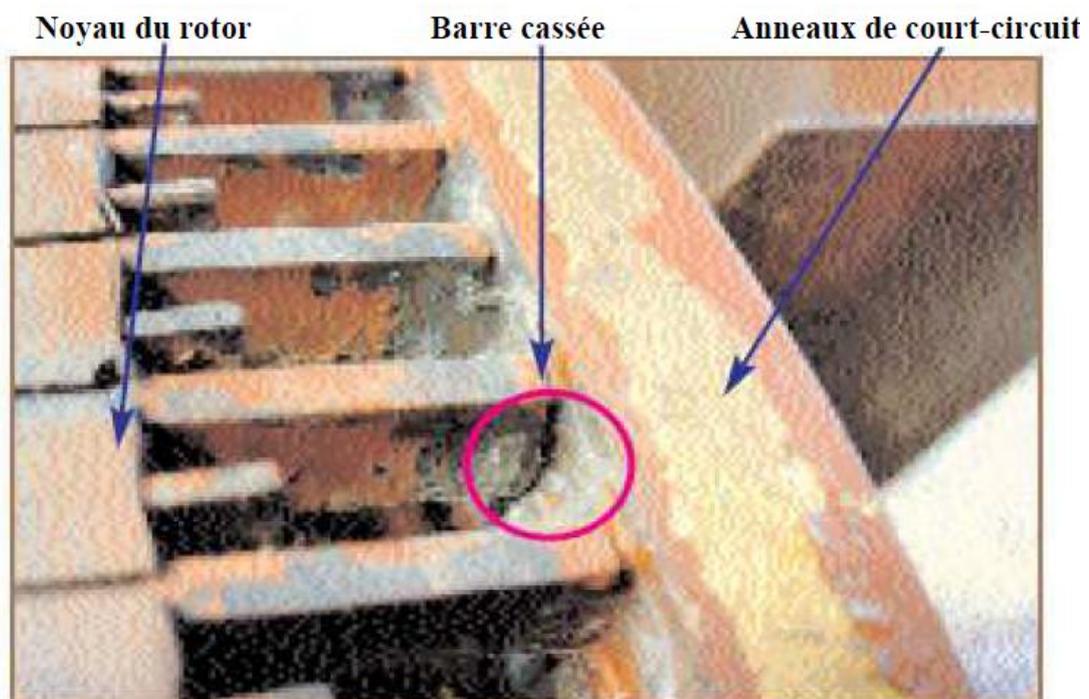


Fig. I.4 : Classification des défauts selon leurs origines.

### I. 3. 2. 1. Cassure de barres et de portions d'anneau de la cage d'écureuil

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [3].

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [5].



**Fig. 1.5 :** Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone [1].

### **I. 3. 2. 2. Défauts de roulements**

Statistiquement c'est le défaut le plus répandu dans les moteurs asynchrone, surtout pour les machines de grande puissance.

Les défauts de roulement se manifestent comme de défauts d'asymétrie au rotor qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur [2].

Classiquement il est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique vibratoire. La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre des courants statorique est telle que toutes les excentricités résultantes interfèrent sur le champ d'entrefer de la machine asynchrone [6].

### **I. 3. 2. 3. Défauts Excentricité rotoriques**

Il y a deux types d'excentricité : statique et dynamique :

1. L'excentricité statique : déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor
2. L'excentricité dynamique : lorsque le centre du rotor n'est pas le centre de rotation.

L'excentricité provoque la variation de l'entrefer donc une répartition non homogène des courants dans le rotor et un déséquilibre des courants statoriques. La résultante des forces magnétique radiales (traction magnétique) se trouve déséquilibrée. Lorsque cette excentricité s'accroît, elle peut causer un frottement du rotor avec le stator endommageant le circuit magnétique et l'enroulement statorique [7, 8].

## **I. 4. Etude statistique**

Dans la littérature, des statistiques ont été émises concernant les défauts qui peuvent affecter la machine. La classification se fait selon des critères précis mais différents pour chaque auteur alors :

Une étude statistique, effectuée d'une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 [kw] à 200[kw]) a donné les résultats suivants (Fig. I.5) [7] :

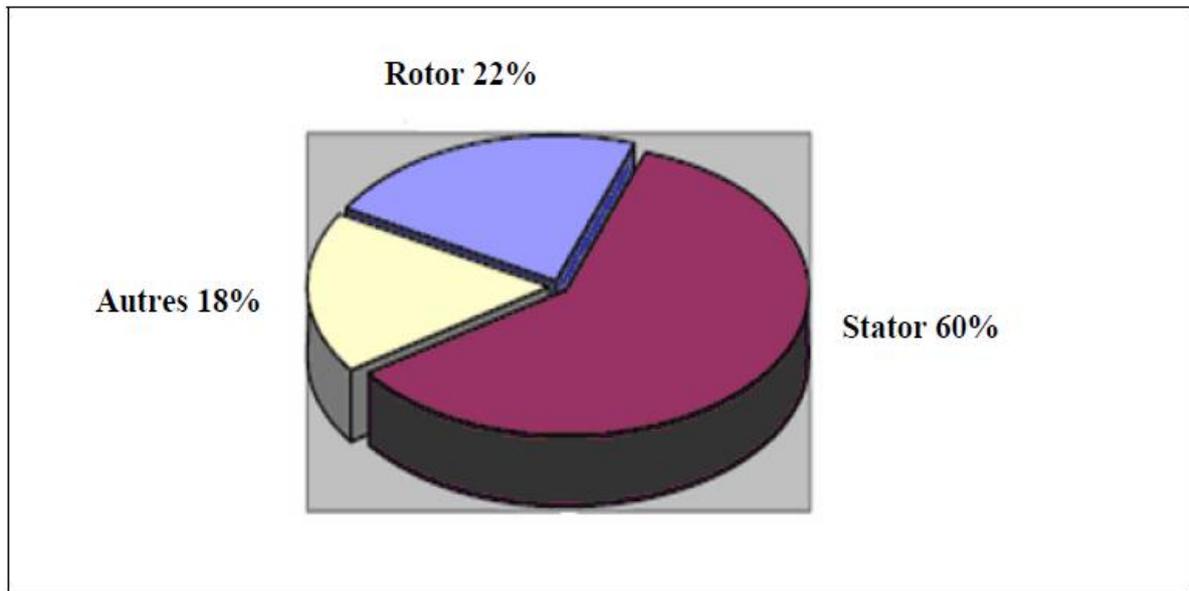


Fig. I.6 : Proportion des défauts [7].

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 [Kw] à 1 [Mw]) donne des résultats qui sont présentés sur la (Fig. I.7) :

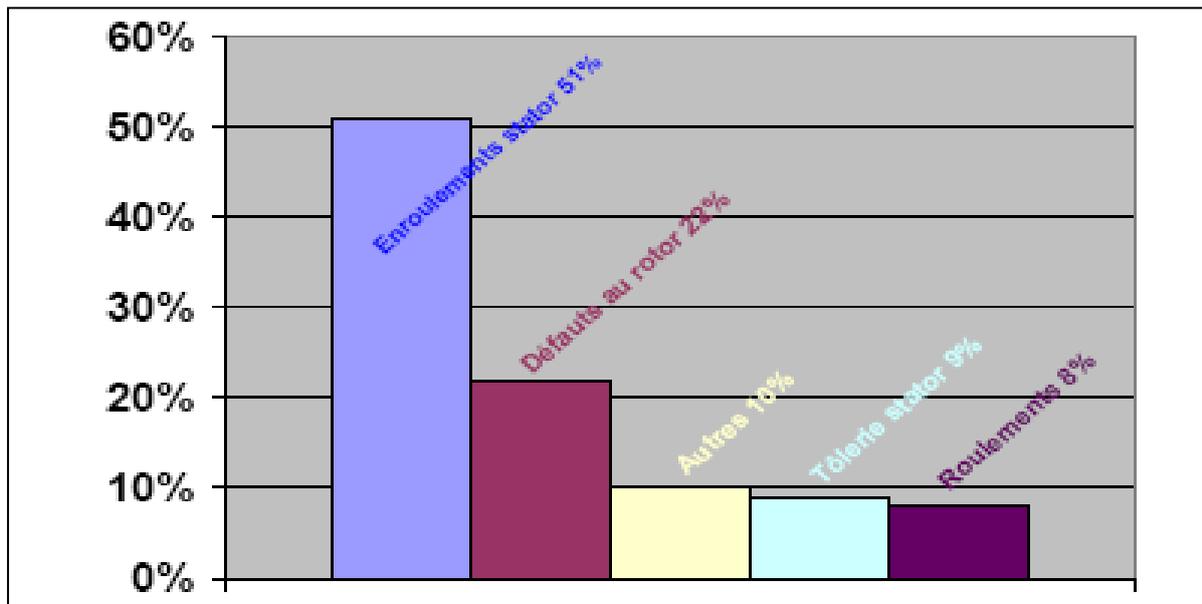
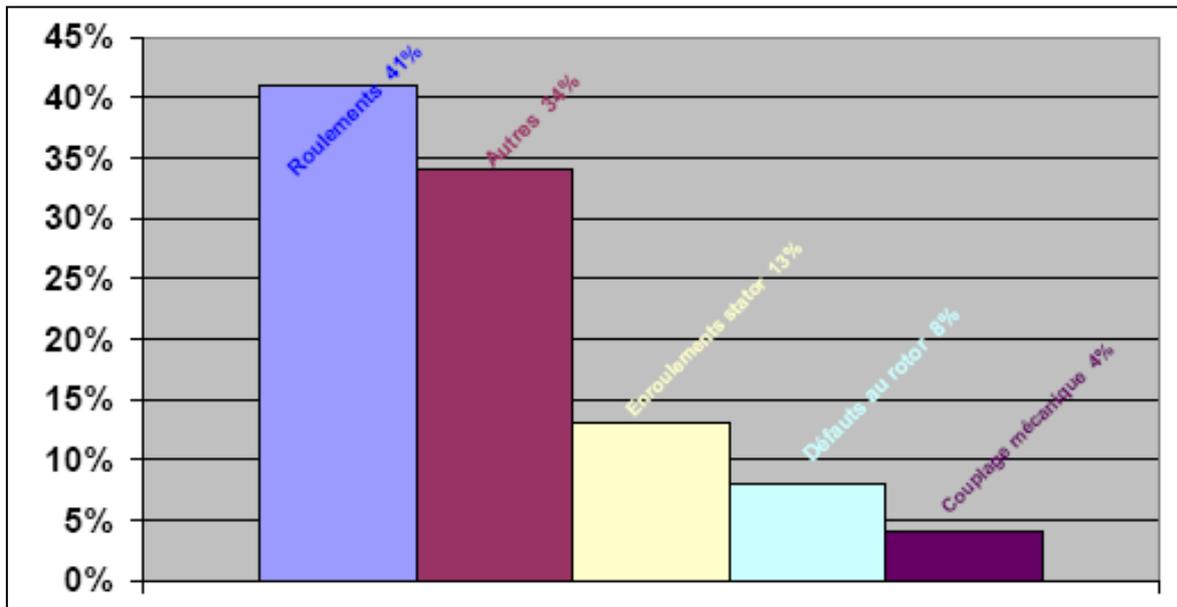


Fig. I.7 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [7].



**Fig. I.8 :** Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

Ces défauts peuvent avoir pour origines des causes de nature très différentes, souvent reliés les uns aux autres :

- Causes thermiques : balourds, points chauds, température ambiante élevée, ...
- Causes électriques : transitoire d'alimentation, déséquilibres, ...
- Causes mécaniques : chocs en service, vibrations, jeux, ...
- Causes chimiques : corrosion, humidité, ....

La diversité des défauts et des causes possibles entraînant une panne dans la machine Asynchrone, facilite les erreurs sur la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite donc une bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que leurs conséquences sur les signaux issus de la machine.

**Conclusion**

D'après l'état de l'art nous avons présenté les éléments de constitution du moteur asynchrone et le principe de fonctionnement de la machine et on a présentés les différents défauts qui peuvent affecter les différentes parties de la machine (court-circuit, rupture ou cassures des barres, roulement ...), ainsi que les causes et les conséquences de la défaillance. Des méthodes utilisées pour l'identification et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil, dans sa partie rotorique, on a constaté que : Les défauts rotoriques de la machine asynchrone occupent une partie importante dans le domaine du diagnostic.

# Chapitre II

## Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

### Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons les diverses méthodes de détection de défauts dans la machine asynchrone. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à une étude plus détaillée de la transformée en ondelettes (*TO*) en passant brièvement par la transformée de Fourier rapide (*TFR*).

### II. 1. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [9].

### II. 2. Approches de diagnostic de défauts de la machine asynchrone

#### II. 2. 1. Approche signal :

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs  $X$  physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

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

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, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce qui suit, on présente brièvement la transformée de Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes (TO) [1]. Parmi les méthodes appartenant à cette approche, on peut citer :

### 1. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

D'après [9], le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. 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 [10].

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

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m ( $F_m$ ) et de la perméance ( $P$ ).

$$B_s = F_m \cdot p \quad (\text{II.2})$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité).

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien

des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

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

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les 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 axial 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. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique [1, 11, 12].

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

J. Milimonfared [13], a proposé une nouvelle technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités.

## **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 [14]. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [15].

## **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 [1].

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

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées  $id_s$  et  $iq_s$  qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de vecteur de Park  $iq_s = f(id_s)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [1].

La deuxième est appelée l'approche étendue du vecteur de Park, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park  $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}\right)$ . Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [8, 16].

De plus on a Cardoso et Saraiva [17] utilisent le vecteur de Park pour détecter le défaut de non uniformité de l'entrefer (l'excentricité).

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

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux [18, 19, 20, 21]. La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

## II. 3. Méthodes dédié au diagnostic de la machine asynchrone

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 :

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

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

### II. 3. 1. Méthodes basées sur un seul courant statorique

➤ *Analyse du courant statorique instantané  $i_a$*

Le courant statorique est largement utilisé dans les stratégies de détection et de diagnostic des défauts des machines asynchrones. La présence des défauts dans ces machines asynchrones se caractérise par la présence de nouvelles composantes fréquentielles ou l'amplification des composantes fréquentielles déjà existantes à l'état sain dans le spectre du courant statorique. Les défauts de cassure de barres rotoriques caractérisés par la présence d'une série d'harmoniques autour de la fréquence fondamentale  $f_{d,c} = f \pm kf_x$  dans le spectre du courant statorique [16, 1]. Dans ce cas, le courant statorique, par exemple,  $a$  du moteur est donné par :

$$i_{a,d}(t) = I_M \cos(\omega t) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ I_{dg,m} \cos [2\pi(f - kf_x)t] + I_{dd,m} \cos [2\pi(f + kf_x)t] \} \quad (\text{II.5})$$

L'analyse de l'expression (II.5) dans le domaine fréquentiel montre l'apparition de deux composantes fréquentielles autour de la composante fondamentale à des fréquences  $(f - f_x)$  et  $(f + f_x)$  pour  $k=1$ . La fréquence  $f_x$  est égale à  $2gf$  pour le cas de défaut de cassure de barres rotoriques.

### II. 3. 2. Méthodes basées sur les trois courants statoriques

La méthode du module de vecteur de Park (*MVP*) est parmi les méthodes les plus connues [22]. C'est une méthode simple, qui exploite le contenu spectral des trois courants statoriques. Les composantes  $i_{\alpha s}(t)$  et  $i_{\beta s}(t)$  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 suivantes:

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

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

$$\begin{cases} i_{ds}(t) = i_{\alpha s}(t)\cos(\omega t) + i_{\beta s}(t)\sin(\omega t) \\ i_{qs}(t) = -i_{\alpha s}(t)\sin(\omega t) + i_{\beta s}(t)\cos(\omega t) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Le module du vecteur de Park (MVP) est :

$$\text{MVP} = \sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)} \quad (\text{II.8})$$

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

Pour le cas du fonctionnement avec défaut comme les défauts de cassure de barres rotoriques, les expressions données par (II.7) ne sont pas valides parce que les courants d'alimentation du moteur contiennent des composantes fréquentielles caractéristique de défauts comme illustré par (II.5). L'explication est la suivante:

A cause de l'existence du défaut de cassures de barres rotoriques, les courants d'alimentation  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$ , et du moteur peuvent être exprimés par [22] :

$$\begin{cases} i_{a,d}(t) = I_M \cos(\omega t) + I_{dg,m} \cos[2\pi(f - f_x)t] + I_{dd,m} \cos[2\pi(f + f_x)t] \\ i_{b,d}(t) = I_M \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_{dg,m} \cos[2\pi(f - f_x)t - \frac{2\pi}{3}] + I_{dd,m} \cos[2\pi(f + f_x)t - \frac{2\pi}{3}] \\ i_{c,d} = I_M \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + I_{dg,m} \cos[2\pi(f - f_x)t - \frac{4\pi}{3}] + I_{dd,m} \cos[2\pi(f + f_x)t - \frac{4\pi}{3}] \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

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

$$\begin{cases} i_{\alpha s}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_M \cos(\omega t) + I_{dg,m} \cos[2\pi(f - kf_x)t] + I_{dd,m} \cos[2\pi(f + kf_x)t] \\ i_{\beta s} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_M \sin(\omega t) + I_{dg,m} \sin[2\pi(f - kf_x)t] + I_{dd,m} \sin[2\pi(f + kf_x)t] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

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

$$|i_{\alpha s} + j i_{\beta s}|^2 = \left(\frac{3}{2}\right) (I_M^2 + I_{dg}^2 + I_{dd}^2) + 3I_M I_{dg} \cos(2\pi f_x t) + 3I_M I_{dd} \cos(2\pi f_x t) + 3I_{dg} I_{dd} \cos(4\pi f_x t) \quad (\text{II.11})$$

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 cassure de barres entraîne principalement l'apparition, dans les spectres des signaux précédents, des composantes harmoniques  $2gf$ .

### II. 3. 3. Méthodes basées sur les courants et tensions statoriques

La puissance apparente peut être exprimée dans le domaine complexe par [23, 24]:

$$\begin{aligned} \bar{s} &= \bar{v} \bar{i}^* = (v_{ds} + j v_{qs})(i_{ds} - j i_{qs}) = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) + j(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (\text{II.12}) \\ &= p_r + j q_i \end{aligned}$$

La puissance réactive instantanée (*RAI*) est donnée par :

$$\text{PRI} = q_i = (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (\text{II.13})$$

Le facteur de puissance instantané (*FP*) est donné par :

$$\text{FP} = \cos(\varphi(t)) = \frac{p_r(t)}{s(t)} \quad (\text{II.14})$$

Pour un moteur sain, les spectres de la puissance réactive instantanée (*PRI*) et le facteur de puissance (*FP*) contiennent seulement une composante fréquentielle continue.

Le défaut de cassure de barres rotoriques caractérisés par la présence des harmoniques ( $f \pm f_x$ ) autour de la fréquence fondamentale dans le spectre du courant statorique comme illustré dans (II.9) [25]. Les spectres de la puissance réactive instantanée (*PRI*) et le facteur de puissance (*FP*) 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  $2gf$  pour le cas de défaut de cassure de barres [1].

Les méthodes du module du vecteur de Park (MVP), le facteur de puissance (FP) et la puissance réactive instantanée (PRI) peuvent être utilisées pour éliminer quelque limitation de la méthode du courant statorique instantané  $i_a$ . En effet, il est très connu que le filtrage de la composante fondamentale à 50 Hz du courant d'alimentation du moteur peut affecter aussi les composantes latérales ( $f \pm 2gf$ ) pour le cas de défaut de cassure de barres rotoriques. Par contre, les composantes fréquentielles  $2gf$  et  $4gf$  dans les spectres du MVP, du FP et de la PAI peuvent être extraites facilement comme la composante fondamentale est localisée à la fréquence nulle et même peut être éliminée en analysant seulement les composantes alternatives de ces grandeurs. En plus, l'analyse des trois courants statoriques via le MVP et la combinaison entre les trois courants et tensions statoriques via le FP et la PRI peut donner plus d'informations sur l'état de la machine.

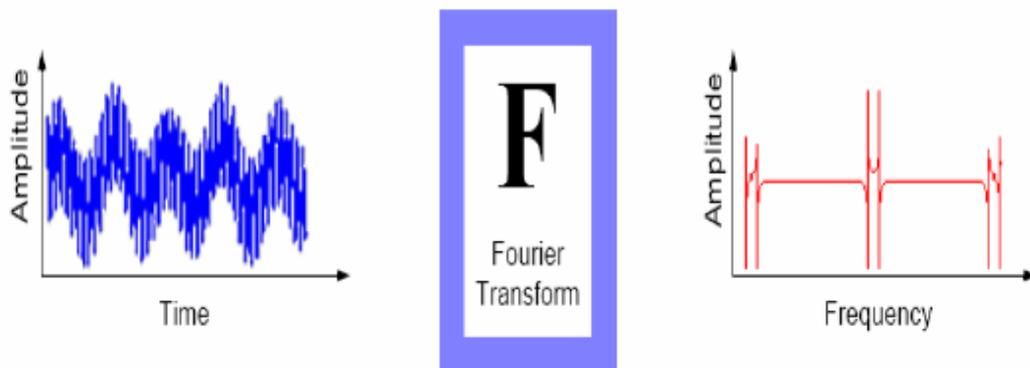
## II. 4. Techniques de traitement de signal dédiées au diagnostic de la machine asynchrone

### II. 4. 1. Transformée de Fourier Rapide (TFR)

C'est une transformée basée sur 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. Ceci permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD, de :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.15})$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle en ligne dans certains processus à travers d'une fenêtre glissante d'observation [26].



**Fig. II.1 :** Représentation temporelle vers fréquentielle.

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 [27]:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{II.16})$$

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{j2\pi f t} df \quad (\text{II.17})$$

Sa transformée de Fourier discrète (TFD) de  $N$  points avec une période d'échantillonnage  $T$  est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{j2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{II.18})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{\frac{j2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{II.19})$$

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux  $\{e^{j2\pi f t}\}_{f \in R}$ . Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

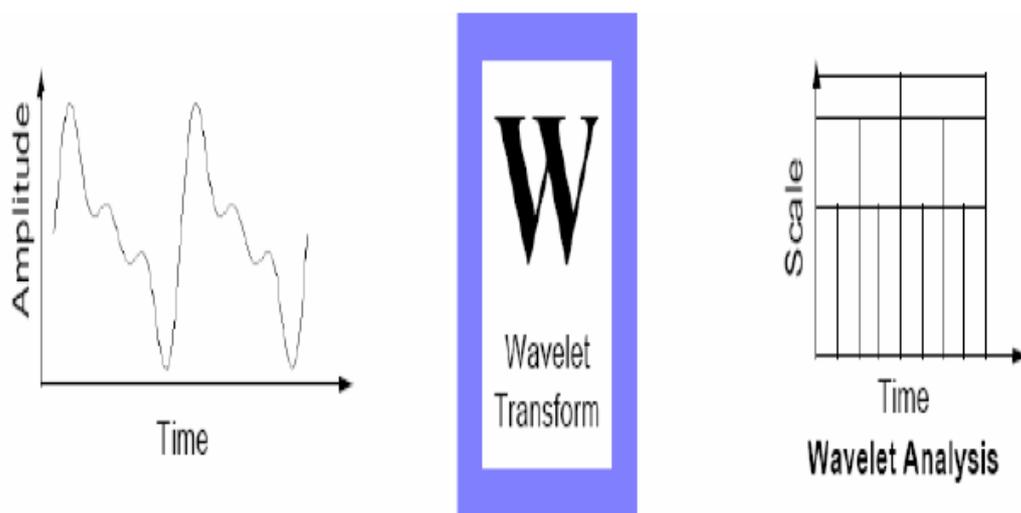
Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [28, 29] Ces

phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transforme).

#### II .4. 2. Transformée en ondelettes (TO)

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement de signal [25]. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [26]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique.



**Fig. II.2 :** Représentation temporelle vers ondelettes.

### II. 4. 2. 1. Transformée en ondelettes continue (TOC)

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"  $\psi(t)$  à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle [30].

Une ondelette est une fonction de moyenne nulle:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.20})$$

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle " a " , et translatée par : " b "

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.21})$$

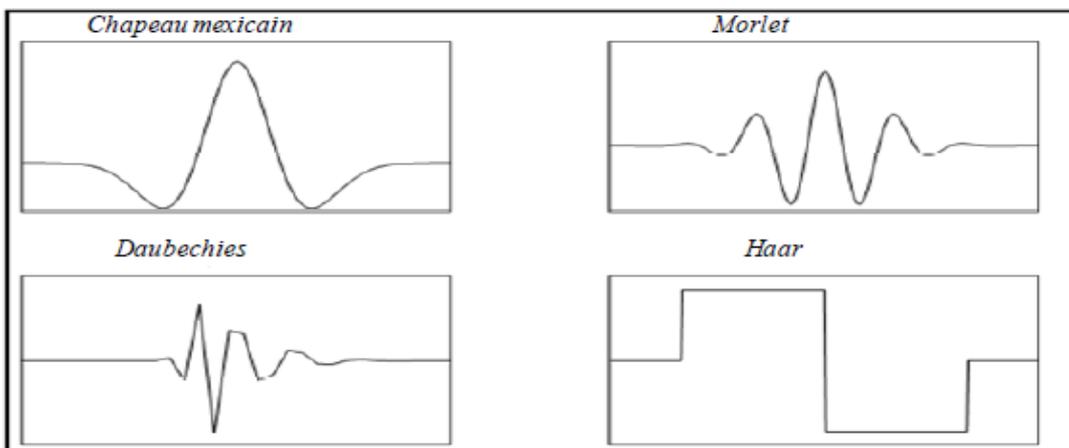
La transformée continue en ondelettes est définie par

$$T_x(b, a) = \langle x, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{II.22})$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$T_x(b, a) = |a|^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \quad (\text{II.23})$$

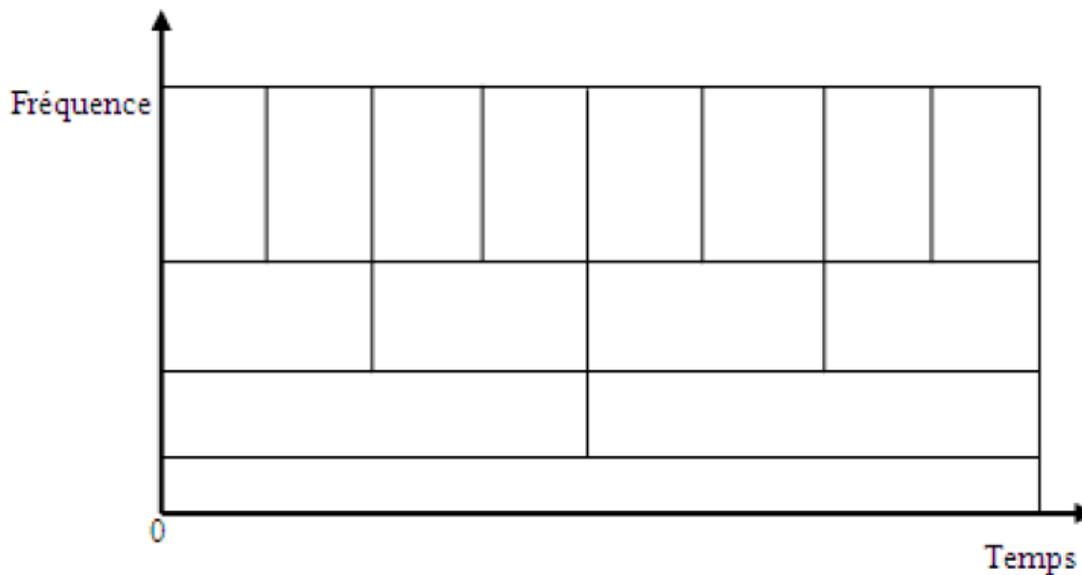
Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Le tableau (1.1) contient les familles les plus usuelles:



**Fig. II.3 :** Quelques formes des ondelettes usuelles.

**Tab. II.1** : Familles d'ondelettes.

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	Dmey
Ondelettes de Battle et Lemarié	Btlm
Ondelettes gaussiennes	Gaus
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelettes gaussiennes complexes	Cgau
Ondelettes de Shannon complexes	Shan
Ondelettes B-spline fréquentielles complexes	Fbsp
Ondelettes de Morlet complexes	Cmor

**Fig. II.4** : Pavage de la Transformée en ondelettes (TO).

### II. 4. 2. 2. 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  $a = 2^i$  [31]. L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

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 (II.24).  $b_0$  dépend de l'ondelette choisie.

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0 > 1, m \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.24})$$

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, nous nous déplaçons à une autre position. Si le grossissement est important (analyse des détails à petite échelle), les déplacements se font par petits incréments. Au contraire, si le grossissement est faible (analyse à plus grande échelle), les déplacements peuvent être plus rapides. Ceci est automatiquement accompli si l'incrément de déplacement est inversement proportionnel au grossissement. Un atome de cette transformée discrète se définit alors comme décrit dans l'équation (II.25).

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (\text{II.25})$$

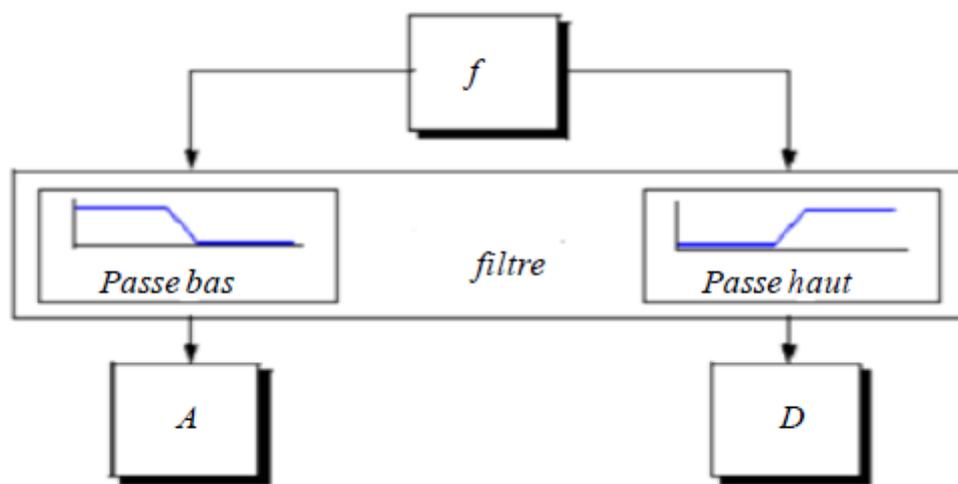
La transformée en ondelette discrète de  $x(t)$ , calculée à partir de  $\psi_{m,n}(t)$ , est donnée par l'équation :

$$T_{dx}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int x(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (\text{II.26})$$

Dans la formalisation de l'analyse multi-résolution, deux choix de discrétisation sont possibles. Le premier consiste en une décomposition continue où  $a_0$  est très proche de 1 et  $b_0$

est suffisamment petit. Dans ce cas, il sera nécessaire d'étudier les fréquences en fonction de coefficients de dilatation imposés par une évolution en puissance de  $m$ , avec  $m$  le niveau de détails. Le second choix ( $a_0=2$ ,  $b_0=1$ ) correspond à un échantillonnage dyadique du plan temps-fréquence (transformée en ondelettes discrète, *TOD*) [32, 33].

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine  $f(t)$ , traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations  $A$  et le signal de détails  $D$  comme le montre la figure (II.5).



**Fig. II.5 :** Décomposition du signal  $f$  en approximations et détails.

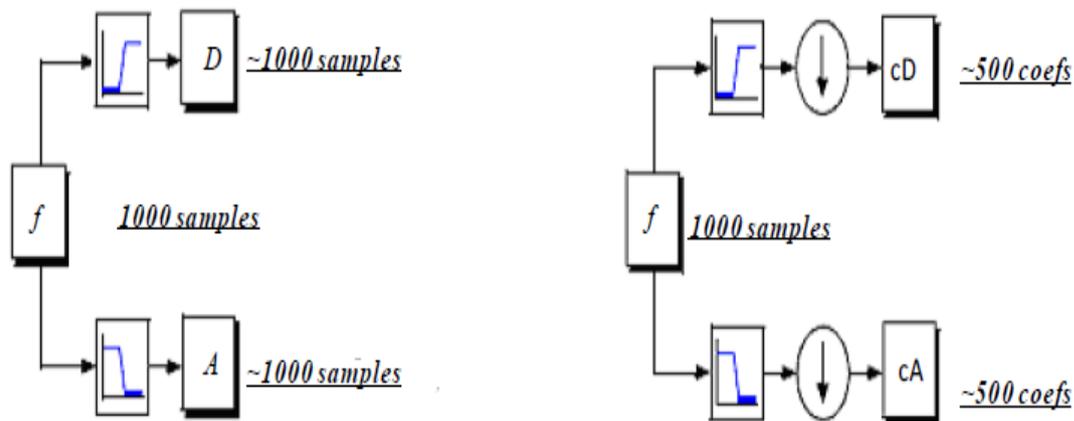
- L'approximation: est la partie grand échelle, basse -fréquence du signal,
- Le détail: est la partie petit-échelle, haute-fréquence du signal.

### ➤ Décomposition simple

Comme on a dit précédemment le signal  $f$  est divisé en deux signaux mais, actuellement pour faire cette opération dans un signal réelle, on trouve deux signaux de même taille que le signal original.

Supposé pour l'instant, que le signal original  $f$  contient 1000 échantillons donc le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement  $CA$  (*Coefficients ondelette d'approximation*) et  $CD$  (*Coefficients ondelette de détails*). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est du au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling) [34].



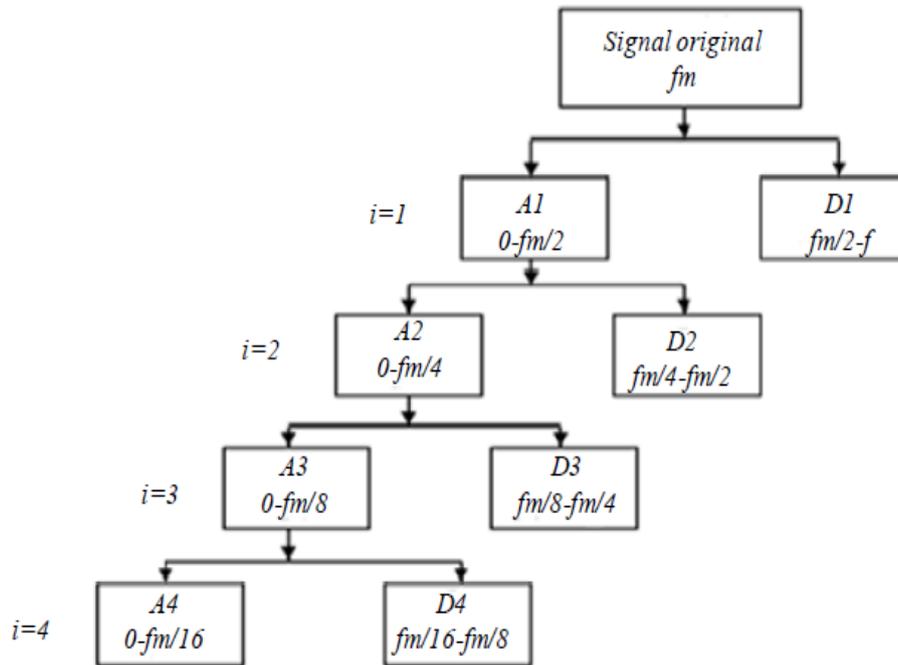
**Fig. II.6 :** Décomposition simple du signal  $f$  en approximations et détails.

➤ **Décomposition multi niveaux :**

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal  $f$  en plusieurs niveaux comme illustré à la figure (II.7). Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple.

Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie [35].

Le signal  $f(n)$  est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolution. Les premiers coefficients de décomposition sont  $A1$  et  $D1$ , où  $A1$  est la version approximative du signal original  $f(n)$  et  $D1$  est la représentation détaillée du signal original  $f(n)$ .



**Fig. II.7 :** *Arbre* de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

D'après l'arbre de décomposition (figure.2.5), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$\begin{aligned}
 i = 1, f(n) &= A_1(n) + D_1(n) \\
 i = 2, f(n) &= A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \\
 i = 3, f(n) &= A_3(n) + D_3(n) + D_2(n) \\
 i = 4, f(n) &= A_4(n) + D_4(n) + D_3(n) \\
 i = K, f(n) &= A_k(n) + D_5(n) + D_{k-1}(n)
 \end{aligned} \tag{II.27}$$

#### II. 4. 2. 3. Energie de la décomposition d'ondelette

Quand le défaut des barres rotoriques de la machine asynchrone apparaît, l'information de défaut du signal du courant statorique est incluse dans chaque bande de fréquence résultante de la décomposition en ondelettes. En calculant l'énergie associée à chaque niveau ou à chaque nœud de décomposition, on peut construire un outil de diagnostic très efficace [35].

La valeur propre d'énergie de chaque bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} D_{j,k}^2(n)$$

(II.28)

tel que  $j$  est le niveau de décomposition.

Les valeurs propres d'énergies des niveaux des décompositions contiennent l'information des signaux dans un moteur asynchrone, le tracé de ces valeurs peut être utilisé pour diagnostiquer les défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil et on peut également identifier le degré de défaut. La déviation de certaine valeur propre indique la sévérité du défaut.

Le nombre de niveaux de la décomposition est déterminé par la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  et les composantes basses fréquences à extraire. A cet effet, la condition donnée en (II.29) doit être vérifiée. Cette condition implique que la limite inférieure de la bande de fréquence qui contient la composante caractéristique de défaut est inférieure à cette fréquence de défaut.

$$l > \frac{\log(f_s/f_b)}{\log(2)} - 1 \quad (\text{II.29})$$

### II. 4. 3. 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 [1] :

- 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.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons développé les méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone. Un aperçu sur les ondelettes continues et discrètes appliqués aux signaux unidimensionnels a bien été détaillé à travers la décomposition en ondelettes discrètes. Cette technique qui propose une analyse très fine des signaux permettra par la suite de construire un outil très efficace dans le domaine de traitement de signal en vue de diagnostiquer les machines asynchrones à cage.

Le chapitre suivant sera consacré au diagnostic du de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone en régime non stationnaire utilisant la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).

## Chapitre III

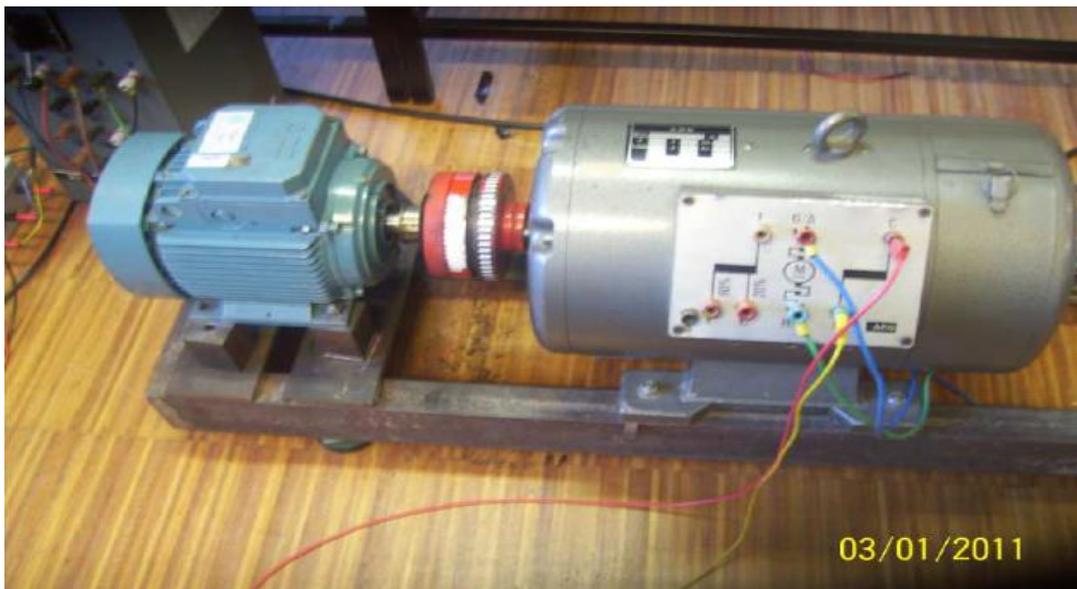
# Diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone

### Introduction

Ce chapitre expose les résultats expérimentaux du diagnostic du défaut de cassure de barres rotoriques du moteur asynchrone triphasé à cage en régime stationnaire (couple de charge constant) ainsi que non stationnaire (couple de charge variable). Ce défaut est diagnostiqué en utilisant les signaux du le module du vecteur de Park (*MVP*), la puissance réactive instantanée (*PRI*) et le facteur de puissance (*FP*) analysés par la transformée de Fourier rapide (*TFR*) et la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).

### III. 1. Banc d'essai expérimental

Ces essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire des Machines Électriques (LME) de l'Université de Coimbra, Portugal. Le banc d'essai comportant un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de 28 barres dans le rotor et de 36 encoches dans le stator, de 3 kW, 4 pôles, 120/208V, 12.3/7.1 A, 50 Hz.



**Fig. III.1** : Banc d'essai expérimental.

Ce moteur entraîne une génératrice à courant continu comme charge mécanique alimentant une charge résistive variable. Afin de faire l'acquisition des signaux du moteur sur PC et les exploiter, deux capteurs de courant et deux autres de tension sont reliés à un PC à travers un module de conditionnement et une carte d'acquisition (Fig. III.1).

Cinq rotors ont été utilisés dans les essais expérimentaux, un rotor sain et quatre autres avec une, deux, trois et quatre barres cassées (Fig. III.2).



**Fig. III.2 :** Rotors utilisés.

### III. 2. Résultats expérimentaux

Le défaut de cassure de barres s'obtient par l'augmentation de la résistance de la barre concernée par le défaut. Les résultats expérimentaux sont analysés, d'abord pour un fonctionnement stationnaire (couple de charge constant), puis en 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. 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 dans les spectres des signaux analysés a été attribué à la valeur de 100%. Daubechies-45 (db45) a été l'ondelette mère utilisée dans l'analyse des résultats

expérimentaux utilisant la TOD. Dans le cas d'expérimental (pour  $k = 2$ ) le nombre des niveaux de décomposition est  $l_d = 11$ . et la bande de fréquence affectée par le défaut est  $[2.8:20] Hz$ . Les signaux intéressants et leurs bandes de fréquences sont présentés dans Tab. III.1.

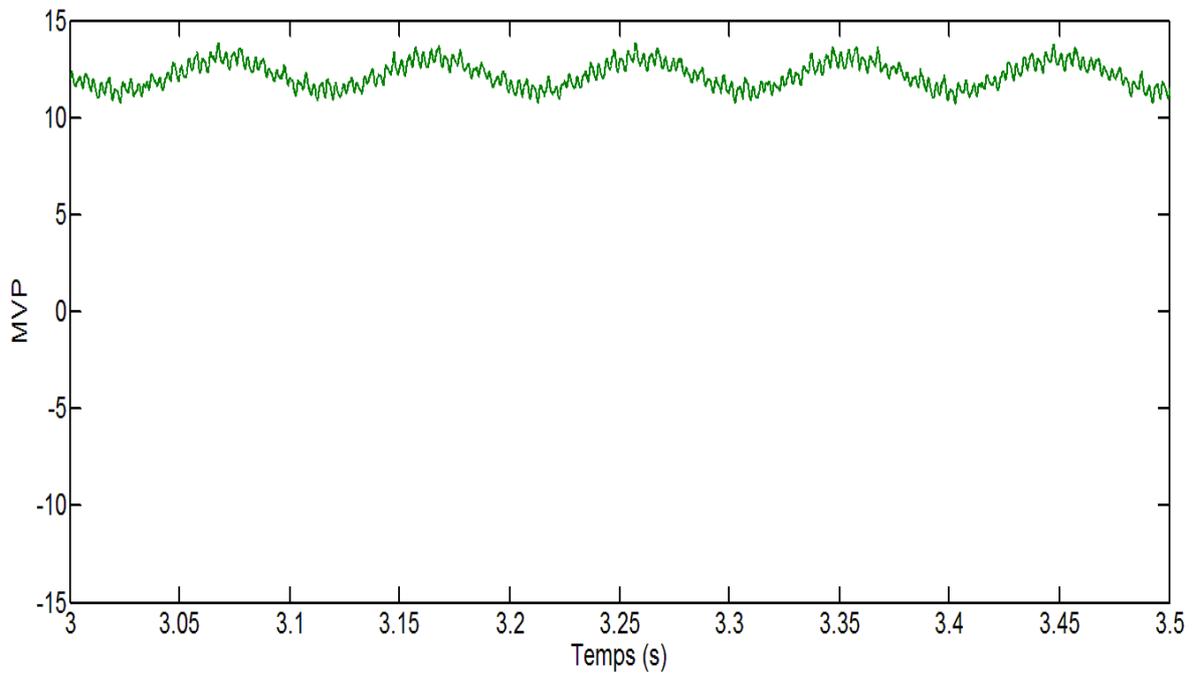
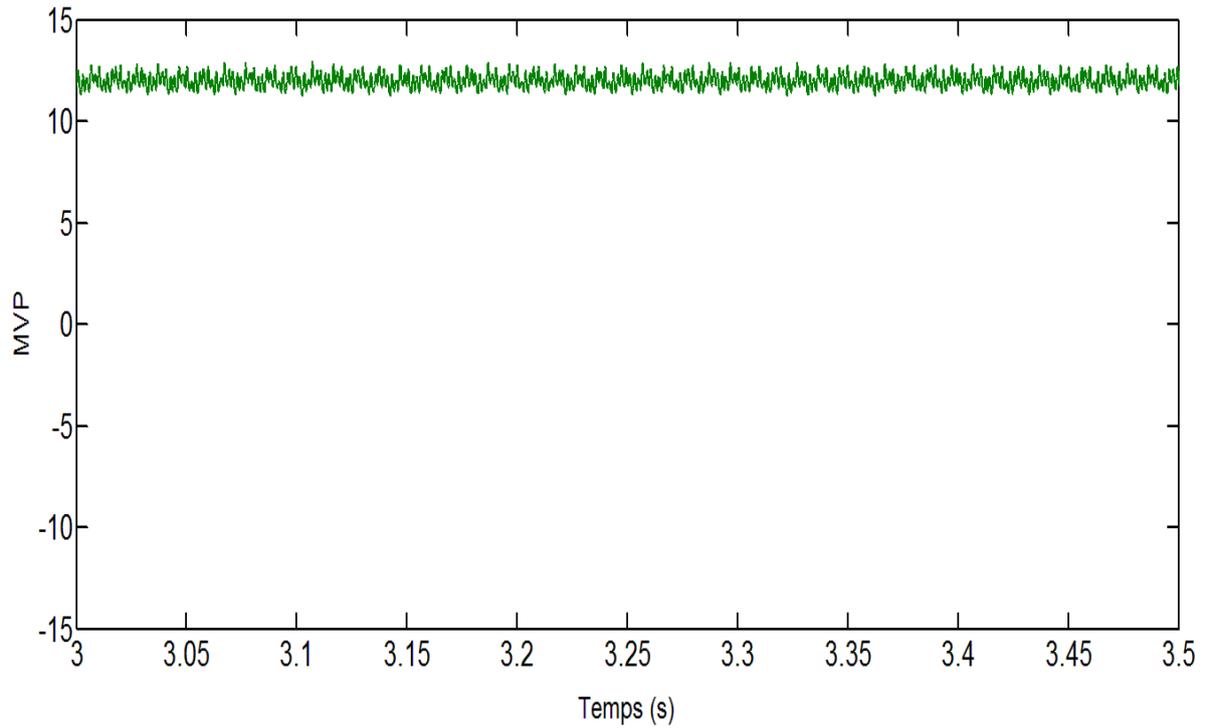
**Tab. III.1** : Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).

Signal	Bande fréquentielle (Hz)
a11	0-2.44
d11	2.44-4.88
d10	4.88-9.76
d9	9.76-19.53

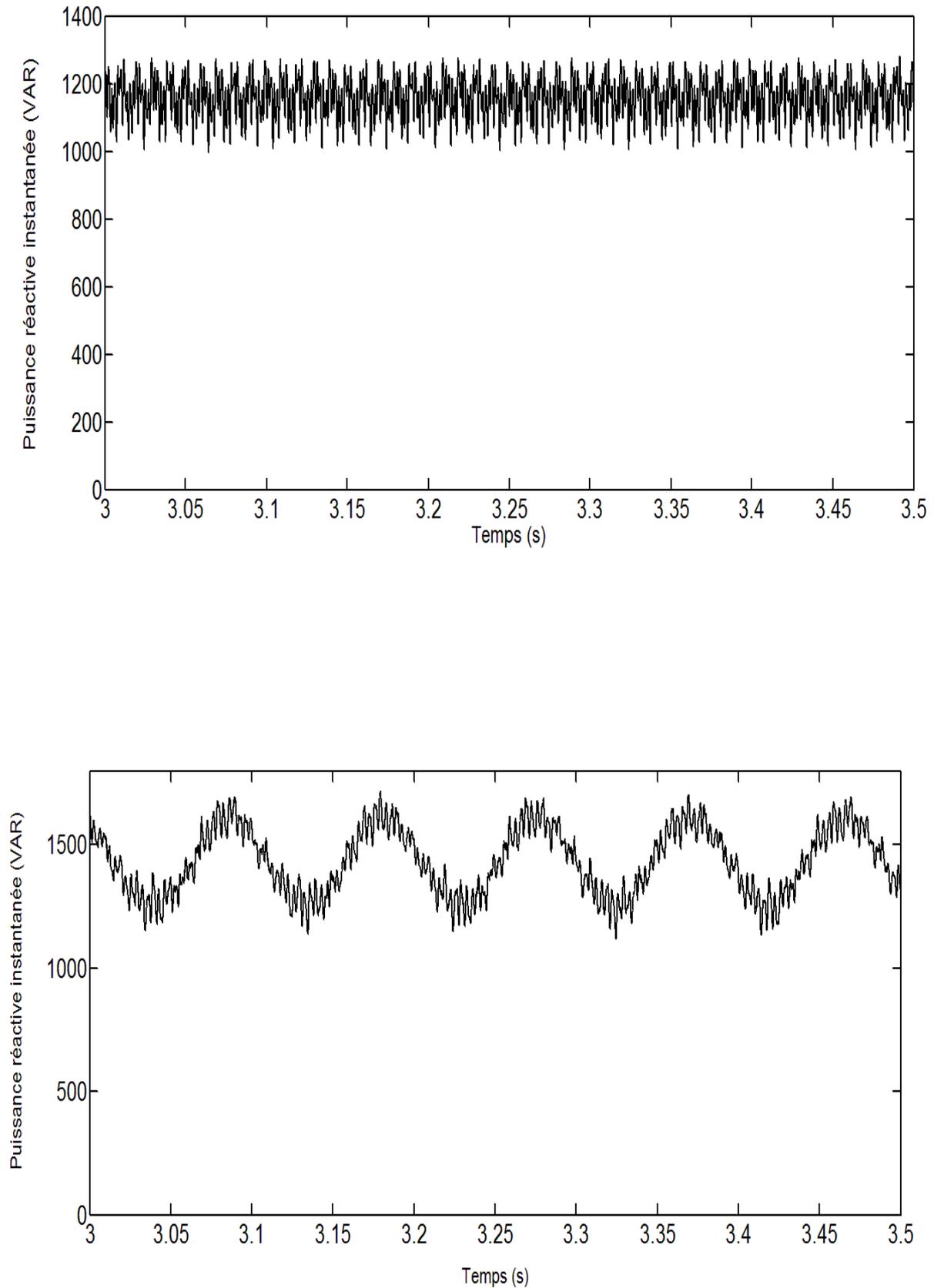
### III. 2. 1 Régime stationnaire

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

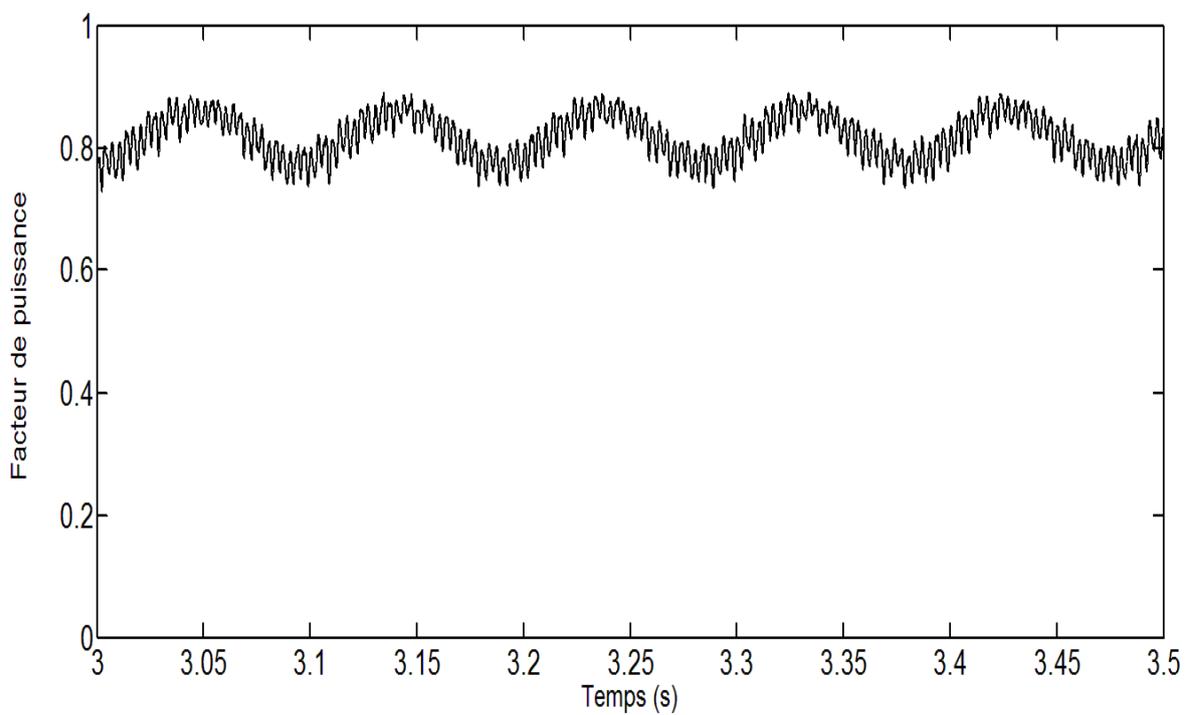
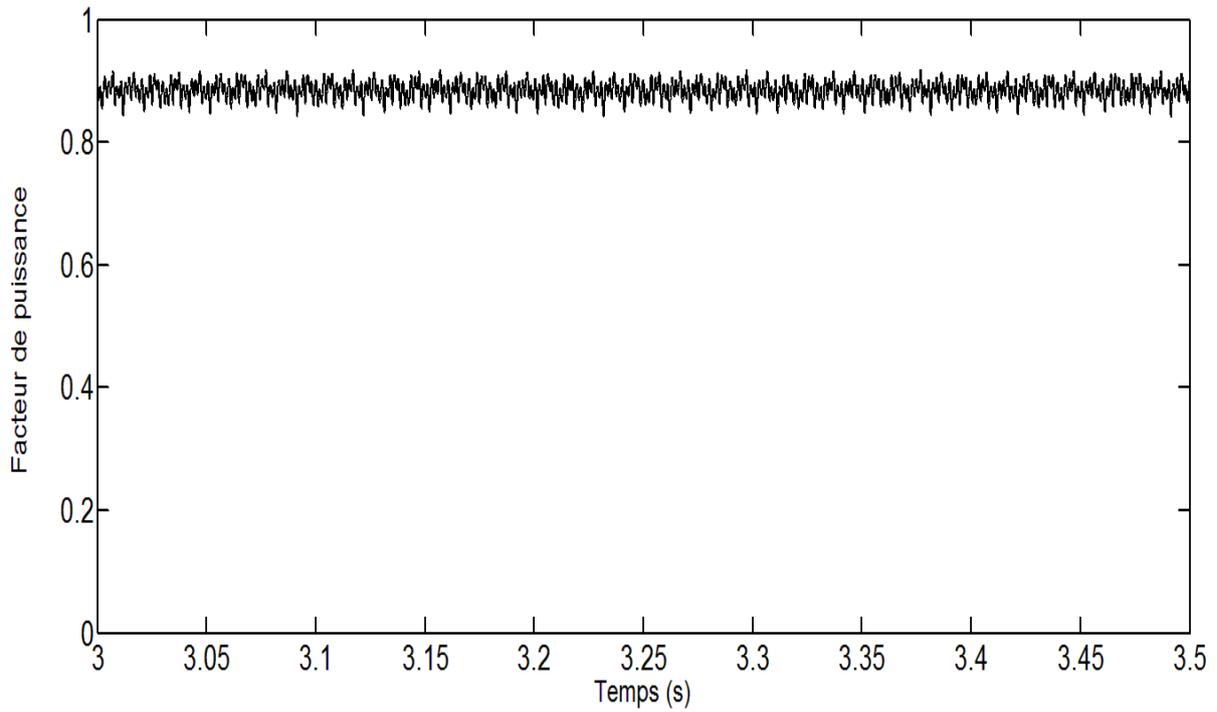
Les figures III.3- III.4- III.5 représentent, respectivement, les allures temporelles expérimentales du module du vecteur de Park ( $MVP$ ), la puissance réactive instantanée ( $PRI$ ) et du facteur de puissance ( $FP$ ) d'un moteur asynchrone triphasé fonctionnant sous une charge nominale avec deux barres rotoriques cassées. Notons que ces caractéristiques électriques sont affectées par la présence du défaut. Elles sont modulées par la fréquence caractéristique de défaut  $2gf$  et cette modulation augmente avec l'augmentation de la sévérité du défaut. Le diagnostic de ce défaut est très difficile en examinant seulement ces allures temporelles et le recours donc aux méthodes de traitement de signal est indispensable.



**Fig. III.3 :** Caractéristiques module du vecteur de Park ( $MVP$ ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.



**Fig. III.4 :** Caractéristiques la puissance réactive ( $PRI$ ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.

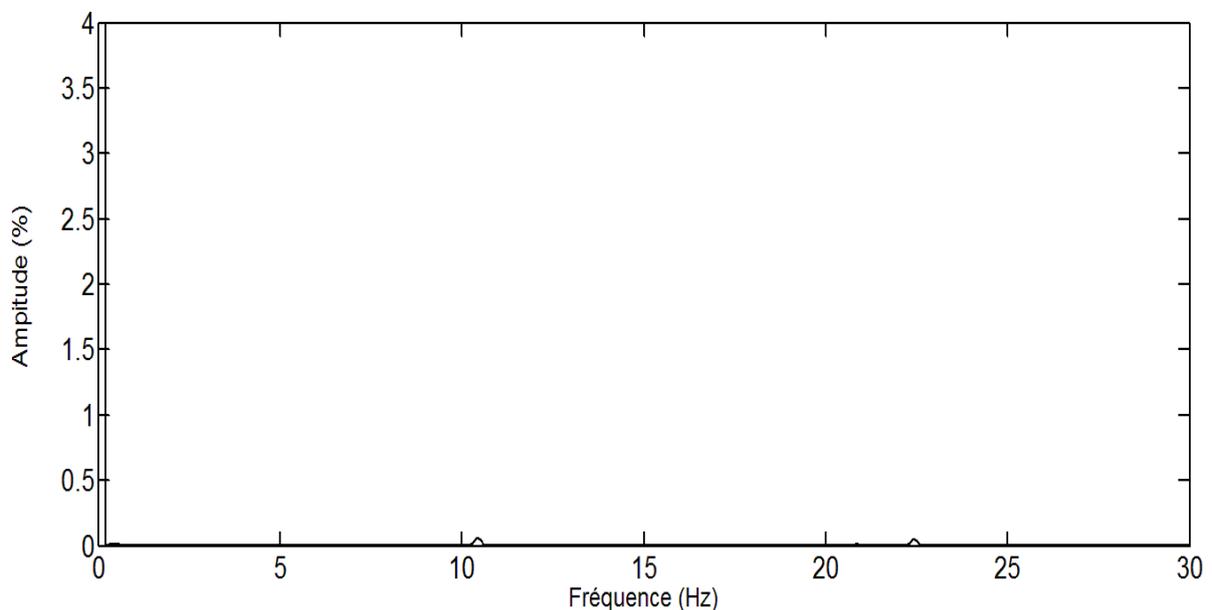


**Fig. III.5 :** Caractéristiques facteur de puissance ( $FP$ ) du moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, haut : sain, bas : 02 BC, expérimental.

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

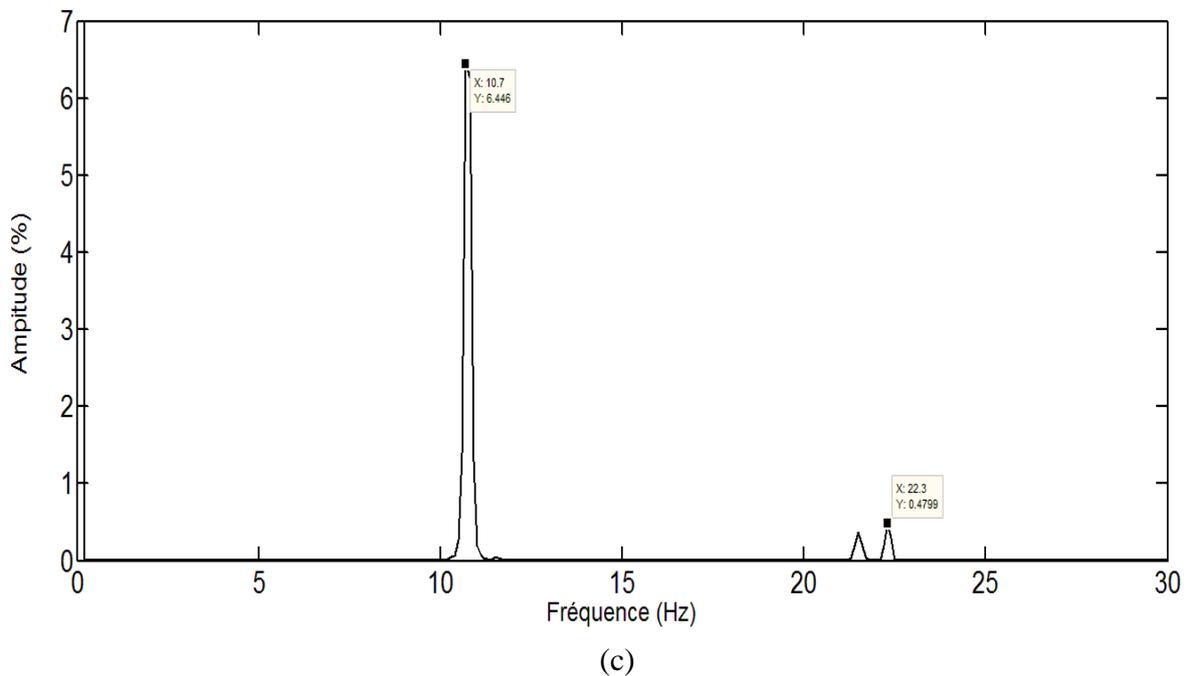
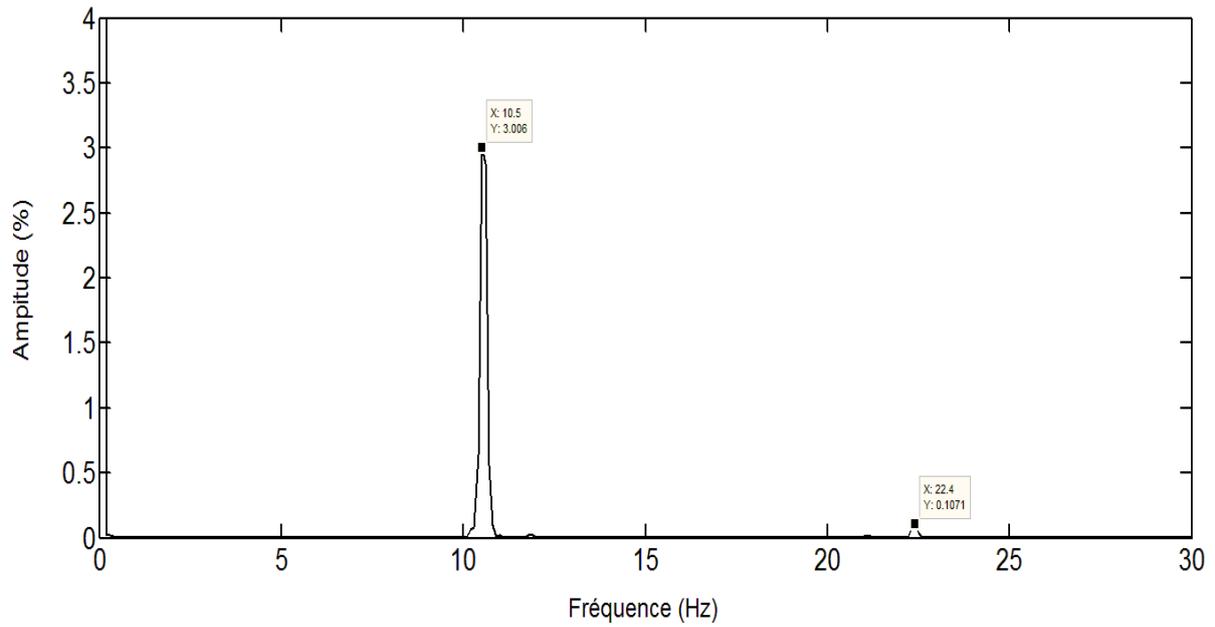
Les figures III.6- III.7- III.8 montrent les spectres des résultats expérimentaux du module du vecteur de Park (*MVP*), la puissance réactive instantanée (*PRI*) et le facteur de puissance (*FP*) pour un moteur asynchrone fonctionnant en pleine charge en régime stationnaire (couple de charge constant). L'analyse des spectres à l'état sain, montre l'absence de la composante caractéristique de défaut  $2gf$  près de la composante continue dans les spectres du MVP, PRI et du FP. Ce résultat confirme l'état sain des barres rotoriques du moteur. En examinant les spectres de l'état en défaut deux et quatre barres cassées, la situation devient différente de celle de l'état sain. Des composantes caractéristiques du défaut à  $2gf$  sont observées, dans les spectres de la PRI, MVP et FP pour le cas expérimental.

Les amplitudes des harmoniques, associées au défaut, augmentent avec le nombre de barres cassées. La méthode de la puissance réactive instantanée (*PRI*) est la plus sensible au défaut. Par contre, les méthodes du module du vecteur de Park (*MVP*) et du facteur de puissance (*FP*) sont les moins sensibles au défaut.

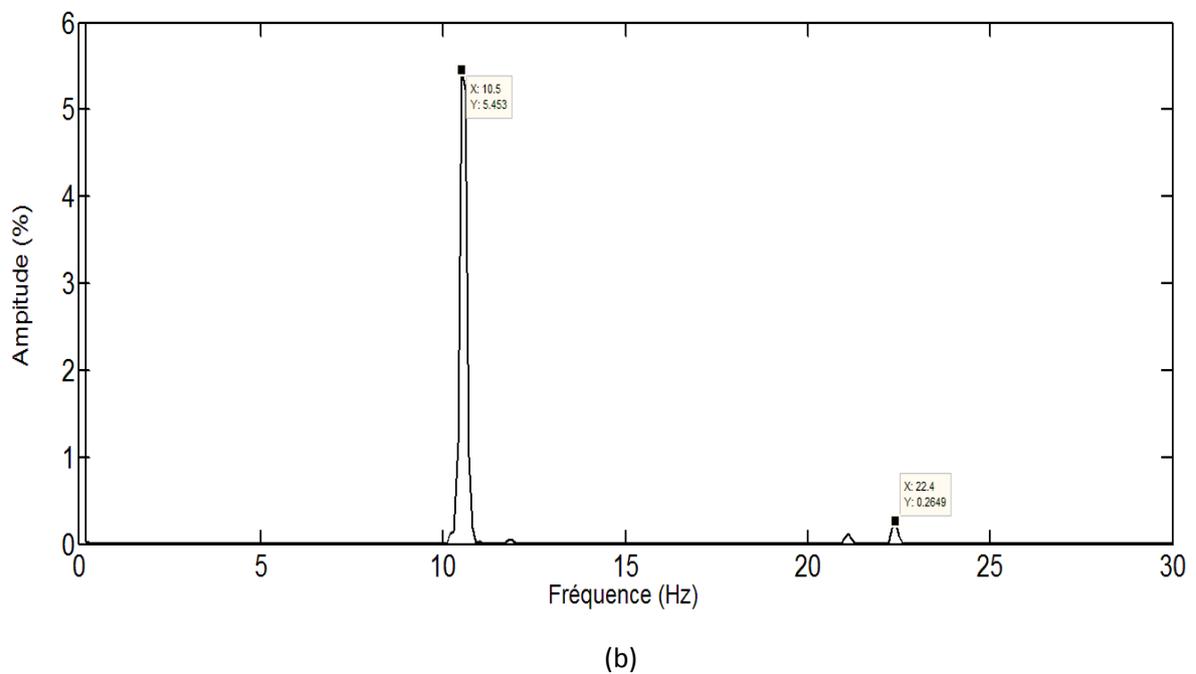
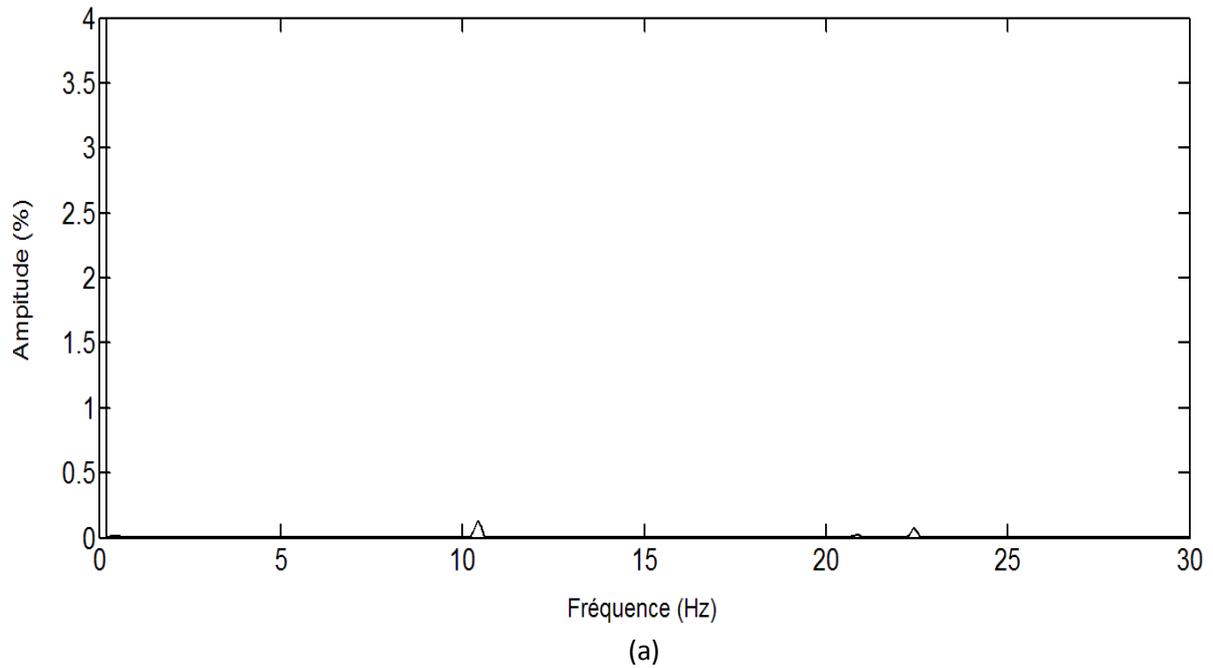


(a)

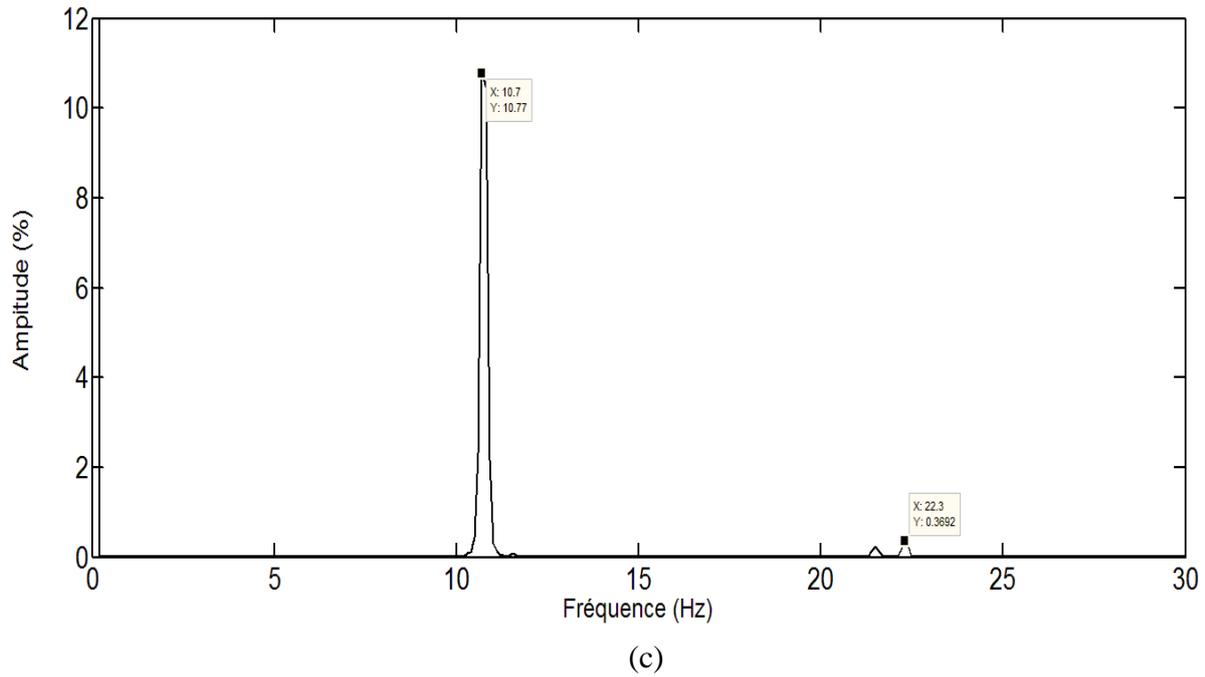
**Fig. III.6 :** Signature de module du vecteur de Park (*MVP*), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, expérimental.



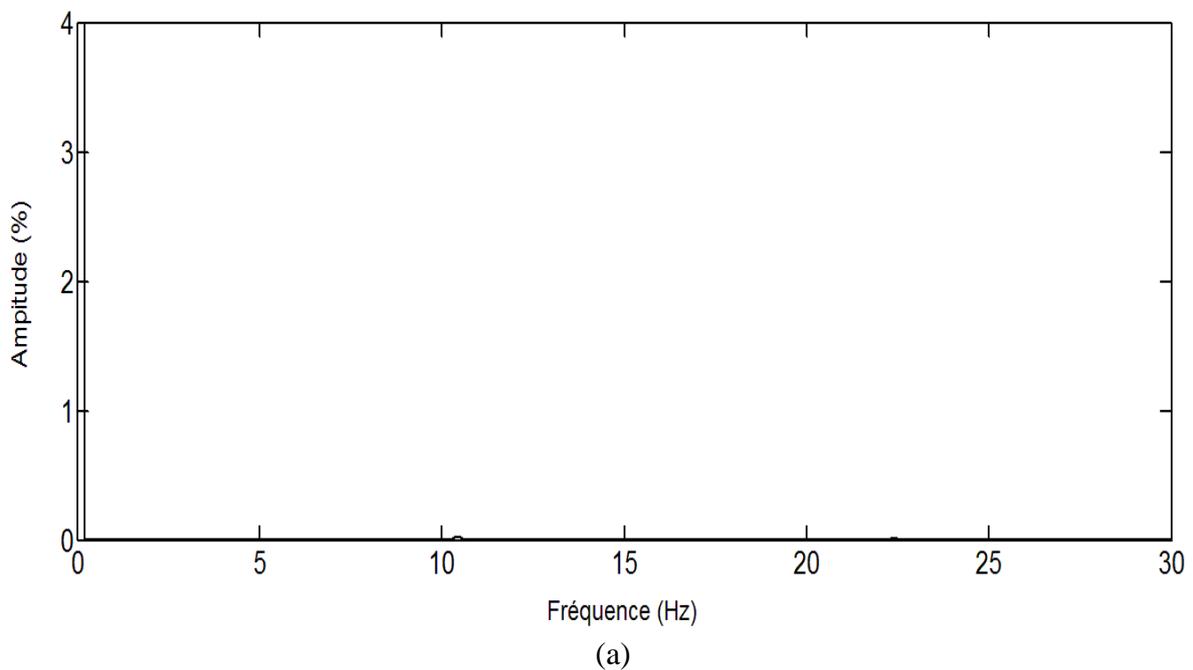
**Fig. III.6 :** Signature de module du vecteur de Park (*MVP*), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite), (b) 02 BC, (c) 04 BC, expérimental.



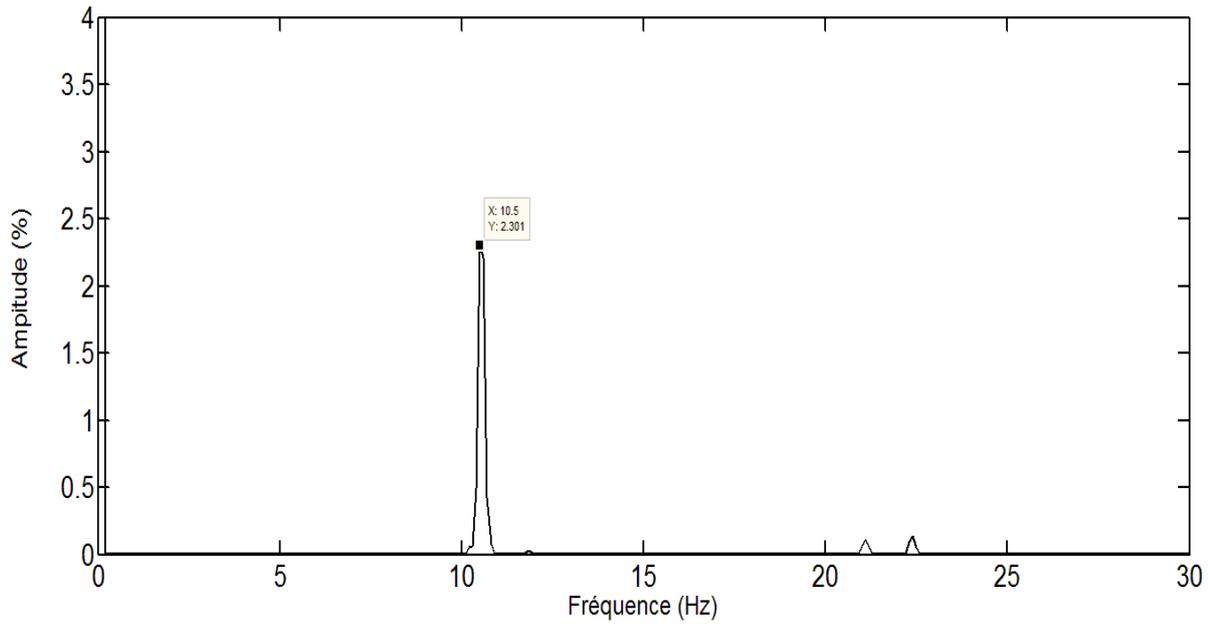
**Fig. III.7 :** Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, (b) 02 BC, expérimental.



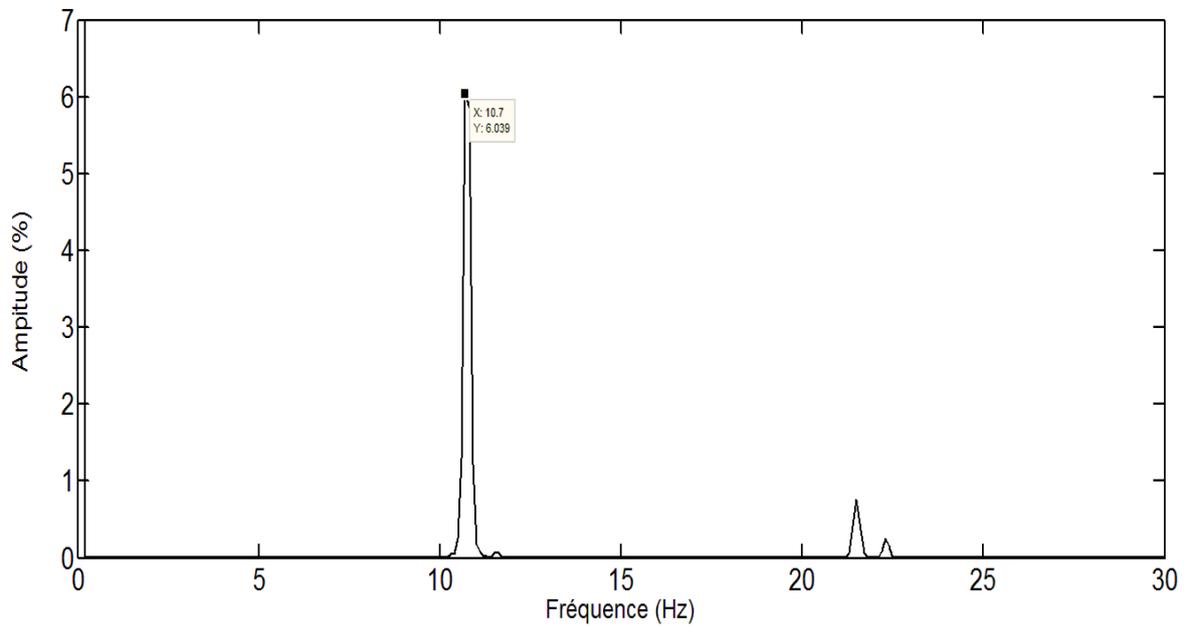
**Fig. III.7 :** Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*), obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite), (c) 04 BC, expérimental.



**Fig. III.8 :** Signature de facteur de puissance (*FP*) obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (a) sain, expérimental



(b)

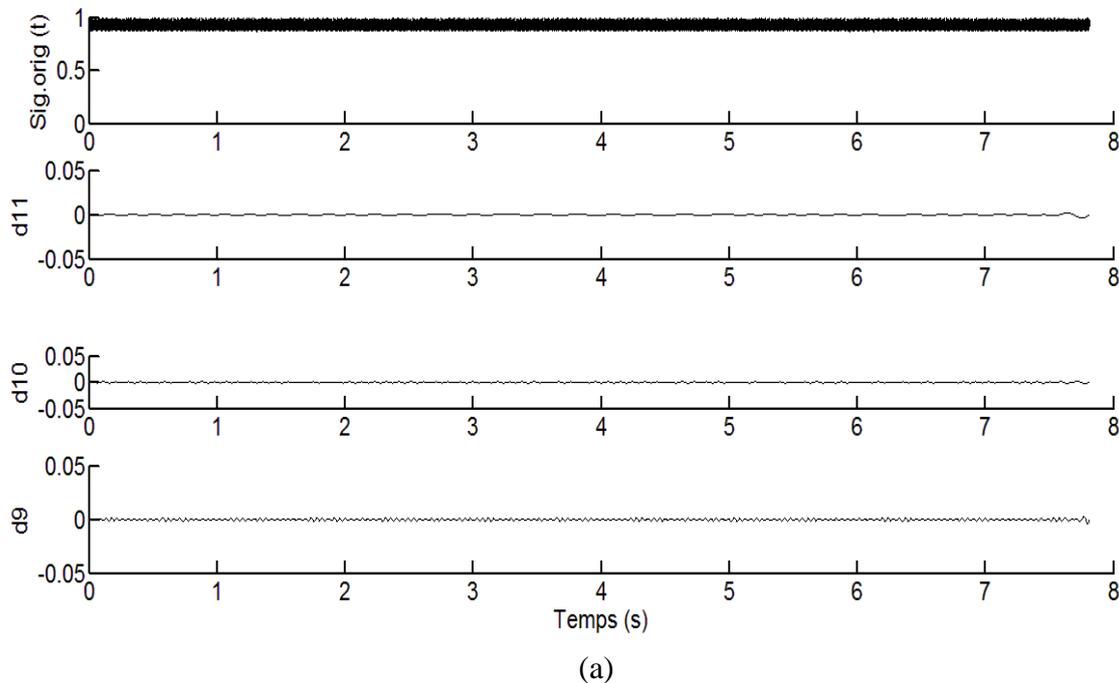


(c)

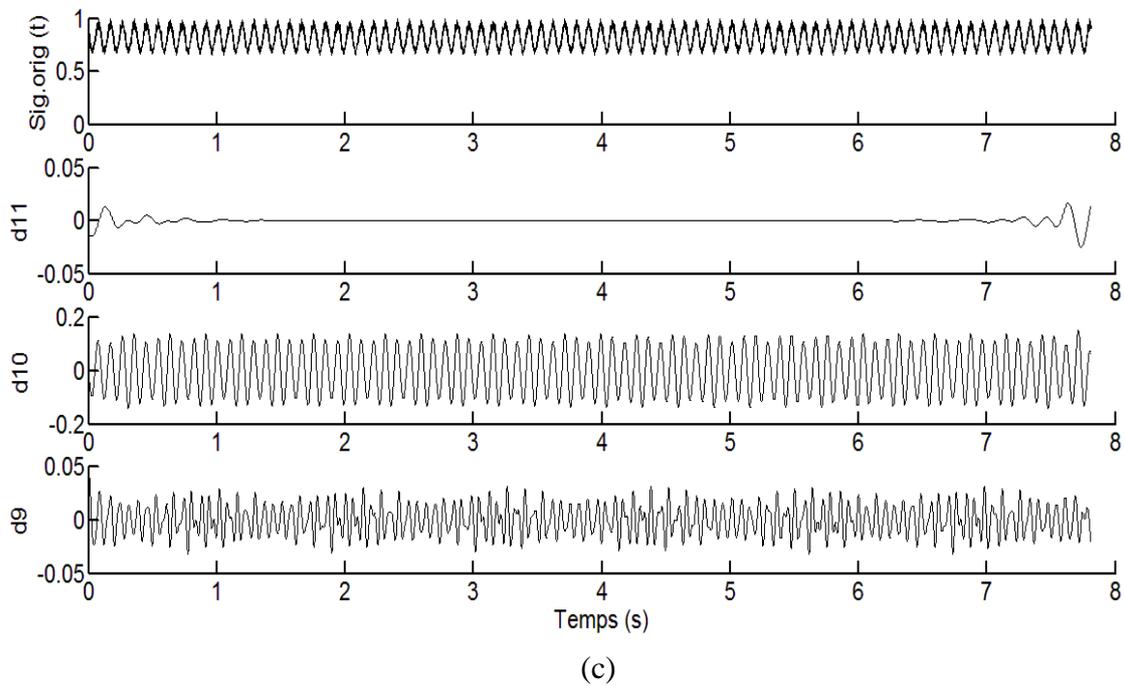
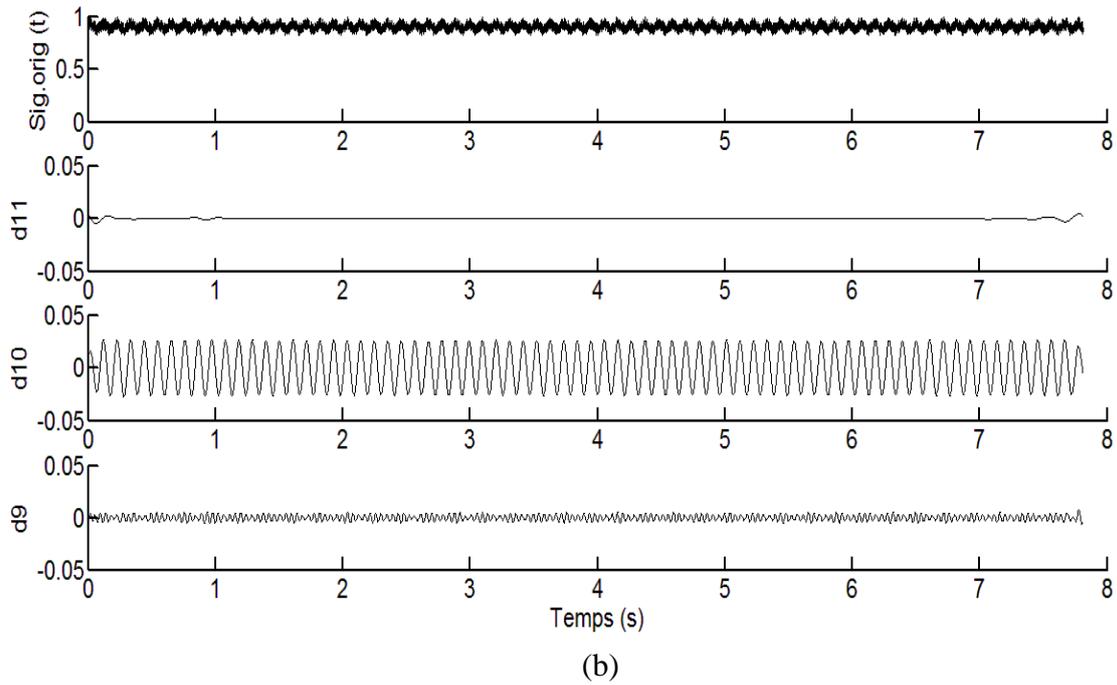
**Fig. III.8 :** Signature de facteur de puissance ( $FP$ ) obtenue par la TFR, du moteur en régime stationnaire en pleine charge, (suite), (b) 02 BC, (c) 04 BC, expérimental

**c). Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)**

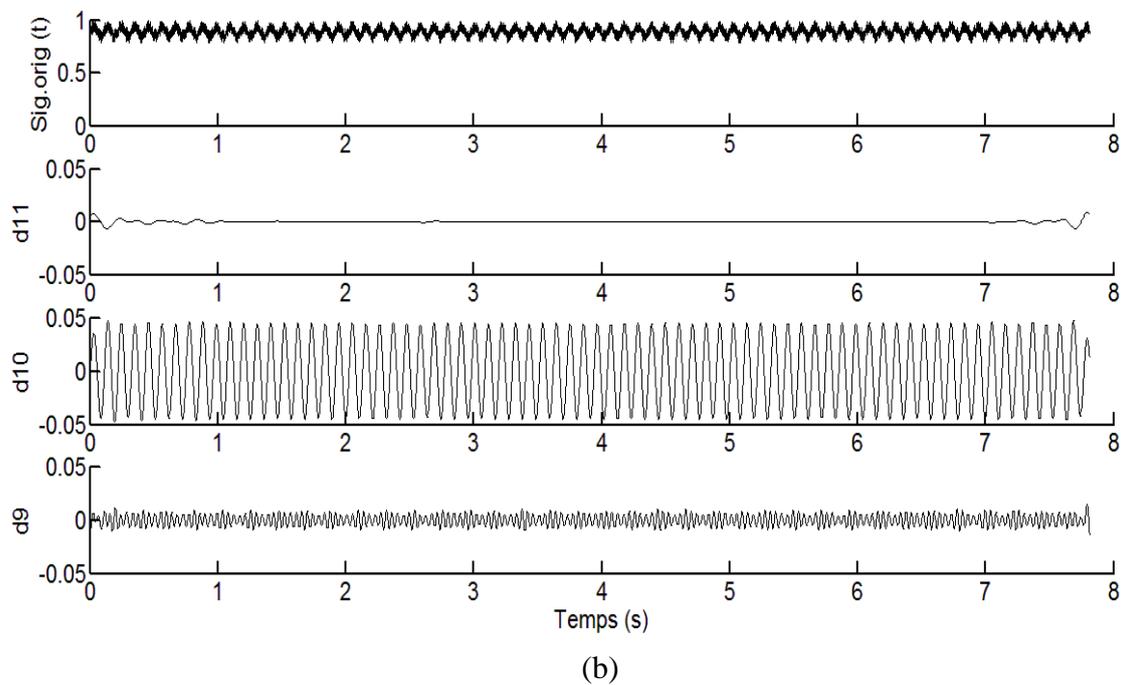
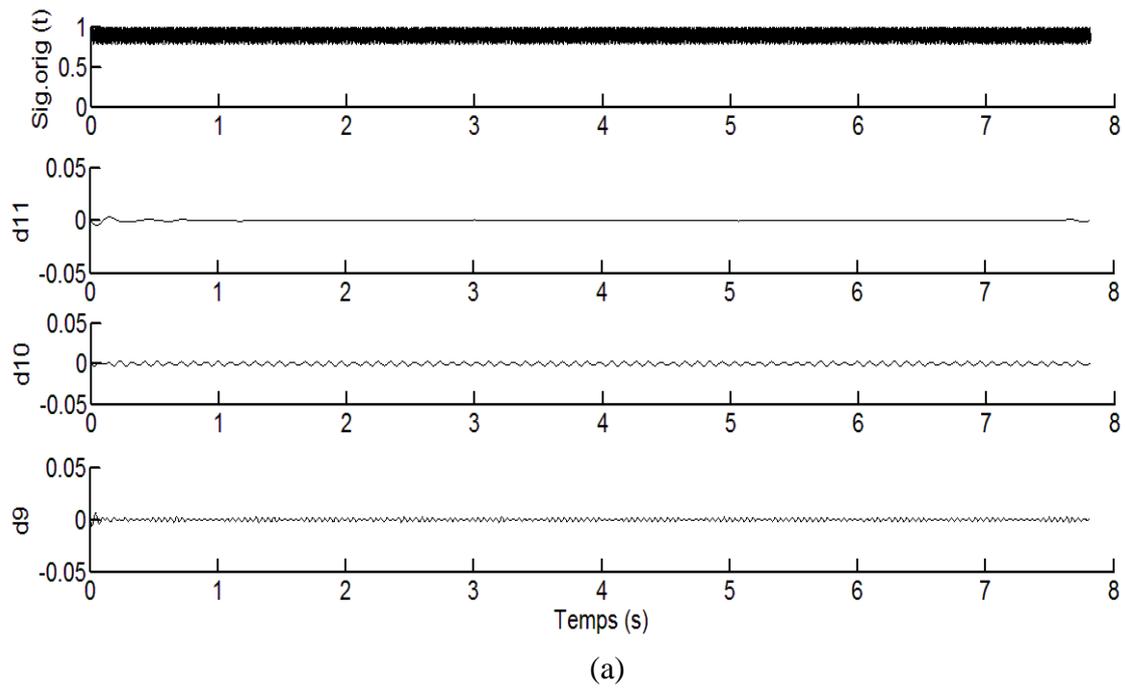
Les résultats expérimentaux de la décomposition en ondelettes en utilisant db45 au niveau 11 des signaux du module du vecteur de Park (*MVP*), la puissance réactive instantanée (*PRI*) et de facteur de puissance sont représentés dans les figures III.9, III.10 et III.11. L'objectif de cette analyse qualitative est d'étudier la présence des composantes fréquentielles caractéristique de défaut  $2gf$  dans les signaux de détail correspondants. Les figures III.9 (a), III.10 (a) et III.11 (a) montrent clairement l'absence de toutes oscillations fréquentielles dans les signaux de détail qui doivent contenir les composantes fréquentielles caractéristique de défaut  $2gf$  en pleine charge (Tab. III.1). Cette observation indique l'état sain du moteur. L'analyse par la TOD de MVP, FP et la de PRI pour le cas d'une et quatre barres cassées est représentée dans les figures III.9 (b,c), III.10 (b,c), III.11 (b,c). Dans ce cas, des oscillations fréquentielles caractéristiques de défaut de cassure de barres sont observées particulièrement dans  $d_9$  et  $d_{10}$ . Ces oscillations augmentent avec l'augmentation du nombre de barres cassées et permettent de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut de cassure de barres rotoriques.



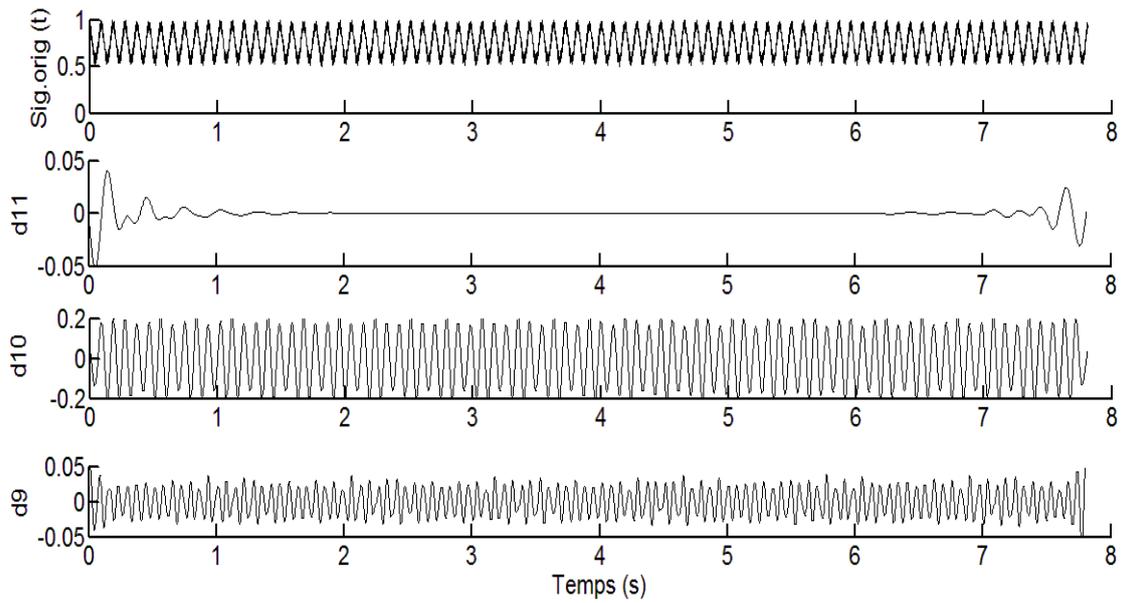
**Fig. III.9 :** Signature du module de vecteur de Park (*MVP*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain.



**Fig. III.9 :** Signature du module de vecteur de Park (*MVP*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite), (b) 01BC, (c) 04BC.

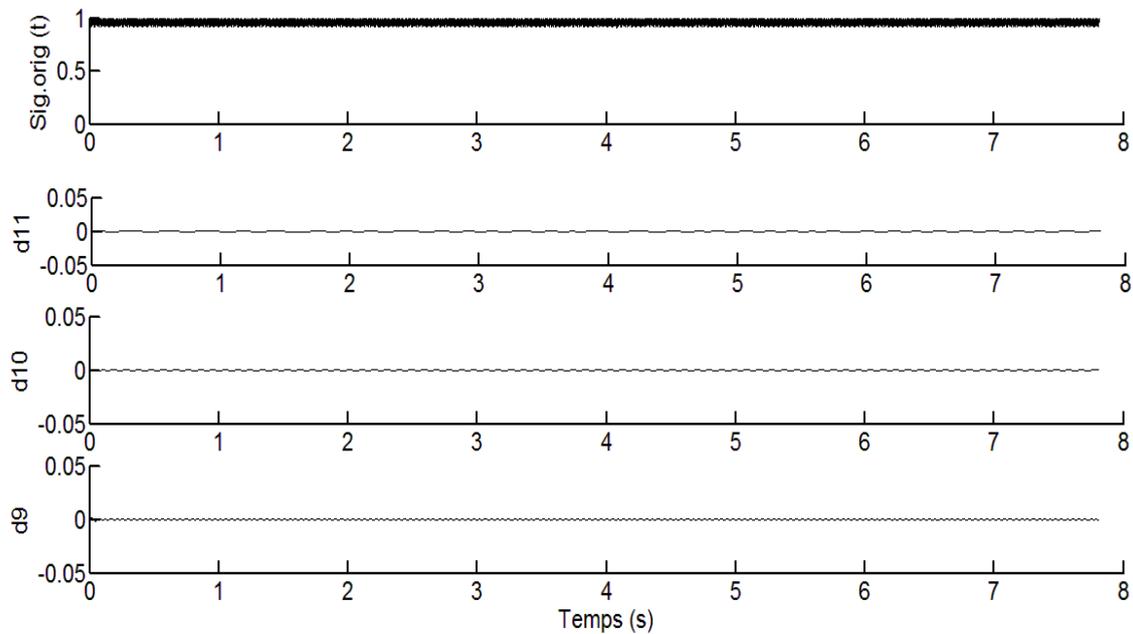


**Fig. III.10:** Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain, (b) 01 BC.



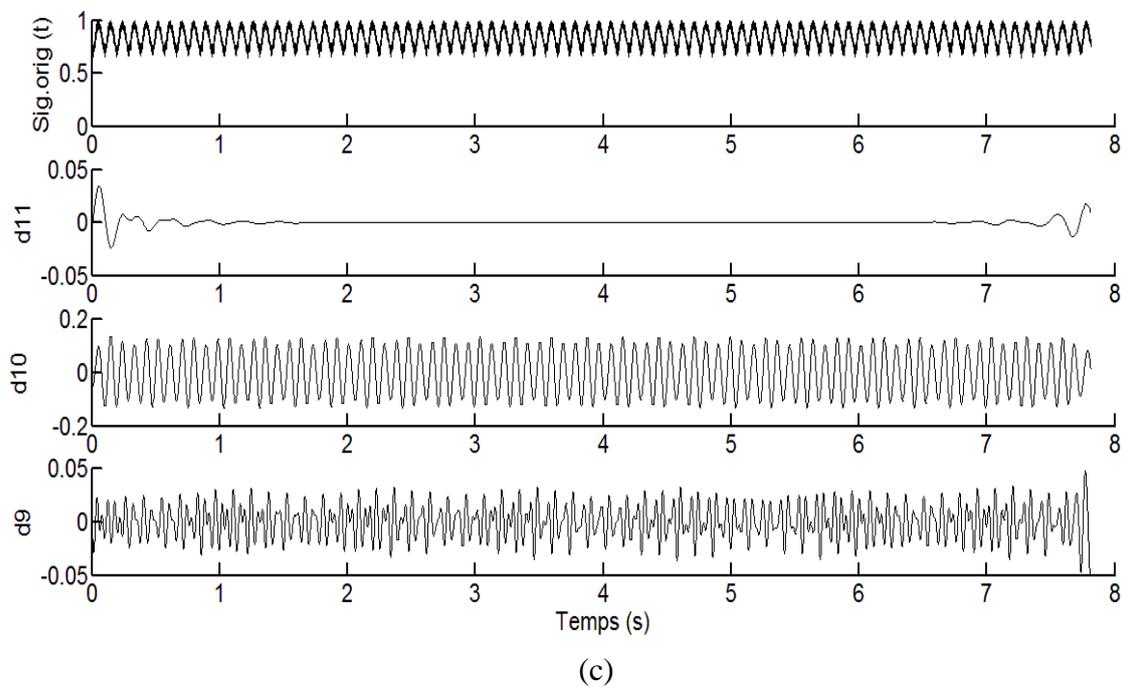
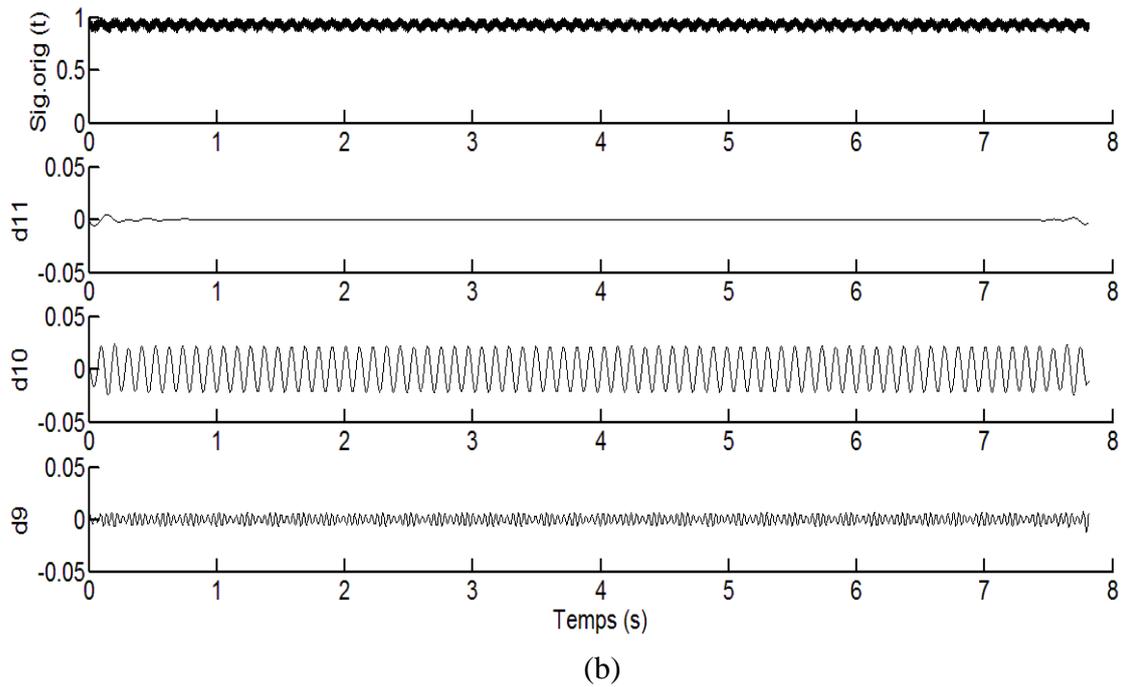
(c)

**Fig. III.10 :** Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite), (c) 04 BC.



(a)

**Fig. III.11 :** Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (a) sain.



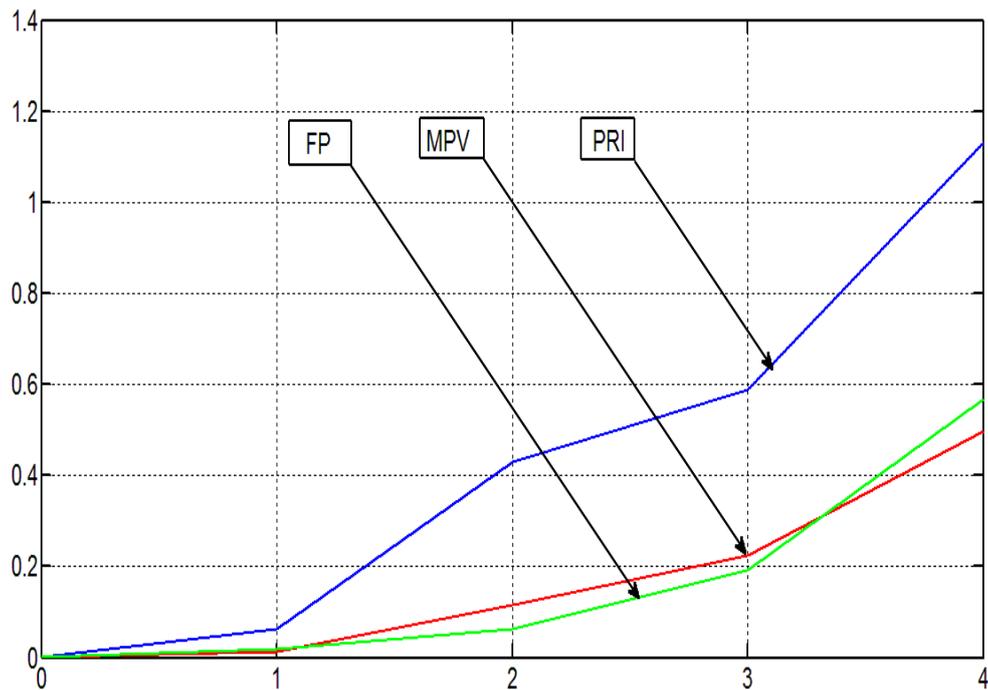
**Fig. III.11** : Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge, expérimental, (suite), (b) 01BC, (c) 04BC.

Les performances de l'analyse par la TOD est bien illustré aux Tab. III.2 par le facteur de sévérité du défaut (*FSD*), est défini par la somme des énergies des signaux de détail d9, d10 et d11 pour le expérimental et est donné en pourcentage (%). Tab. III.2 montrent le FSD des méthodes utilisées dans notre travail pour les cas sain, une, deux, trois et quatre barres rotoriques cassées. La figure III.12 représente les valeurs du FSD obtenu par db45 en fonction du nombre de barres cassées. La valeur du FSD augmente avec l'augmentation de nombre des barres cassées pour toutes les méthodes utilisées. Le diagnostic des défauts par la TOD peut être effectué sans nécessité de connaître les 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. Le diagnostic des défauts sans connaître les valeurs instantanées du glissement est un avantage important de l'analyse par la TOD par rapport à celle de la TFR.

Pour justifier le choix d'utiliser la famille d'ondelette de Daubechies comme ondelette mère dans ce travail, Tab. III.3 illustré, 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 deux barres cassées. D'après ces résultats, 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.

**Tab. III.2** : FSD des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en pleine charge, expérimental.

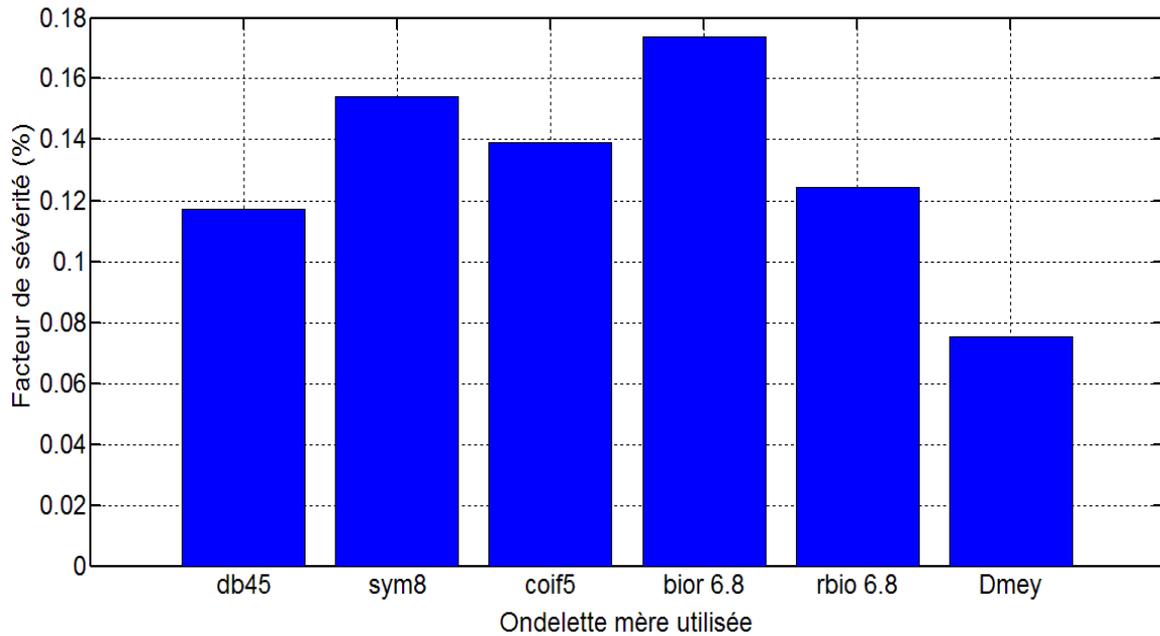
<b>Nombre de barres cassées</b>	<b>MVP (%)</b>	<b>PRI (%)</b>	<b>FP (%)</b>
<b>0</b>	6.5029e-05	1.8459e-04	1.4051e-05
<b>1</b>	0.0126	0.0626	0.0196
<b>2</b>	0.1170	0.4311	0.0644
<b>3</b>	0.2255	0.5897	0.1923
<b>4</b>	0.4970	1.1327	0.5666



**Fig. III.12** : FSD, obtenu par db45 en fonction du nombre de barres cassées.

**Tab. III.3** : FSD des méthodes utilisées en fonction du type de l'ondelette mère avec deux barres cassées du moteur en régime stationnaire, expérimental.

Ondelette mère utilisée	MVP (%)	PRI (%)	FP (%)
<b>db45</b>	0.1170	0.4311	0.0644
<b>sym8</b>	0.1543	0.5025	0.0917
<b>coif5</b>	0.1392	0.4497	0.0802
<b>bior 6.8</b>	0.1739	0.5637	0.1023
<b>rbio 6.8</b>	0.1242	0.4047	0.0731
<b>Dmey</b>	0.0752	0.2590	0.0441

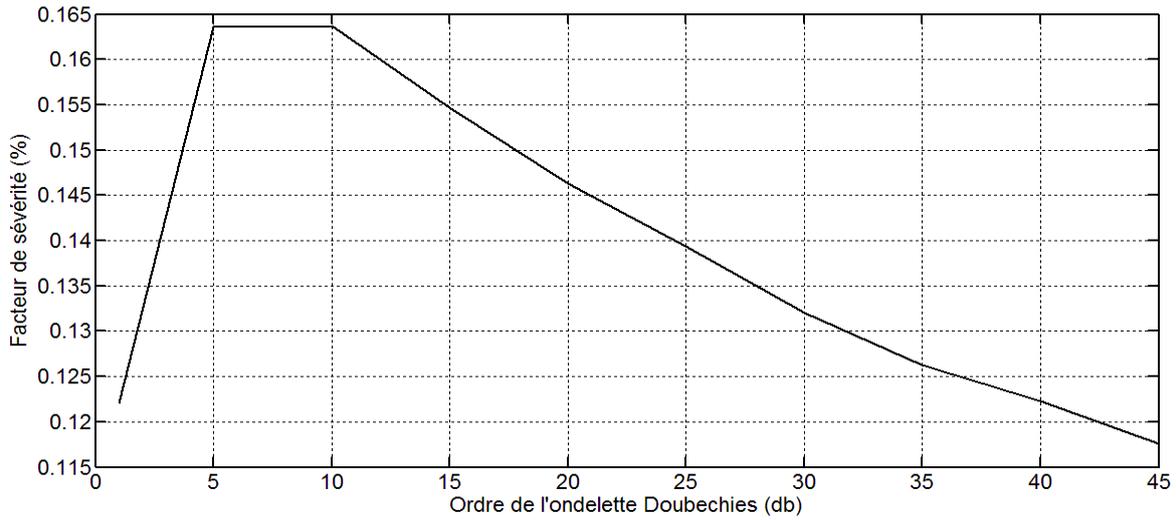


**Fig. III.13 :** FSD du MVP en fonction de l'ondelette mère utilisée.

Le FSD du module de vecteur de Park (MVP), la puissance réactive instantanée ( $PRI$ ) et le facteur de puissance (FP) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db) est donné dans les figures III.14, III.15 et III.16.

**Tab. III.4 :** FSD du module de vecteur de Park (MVP) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.14.

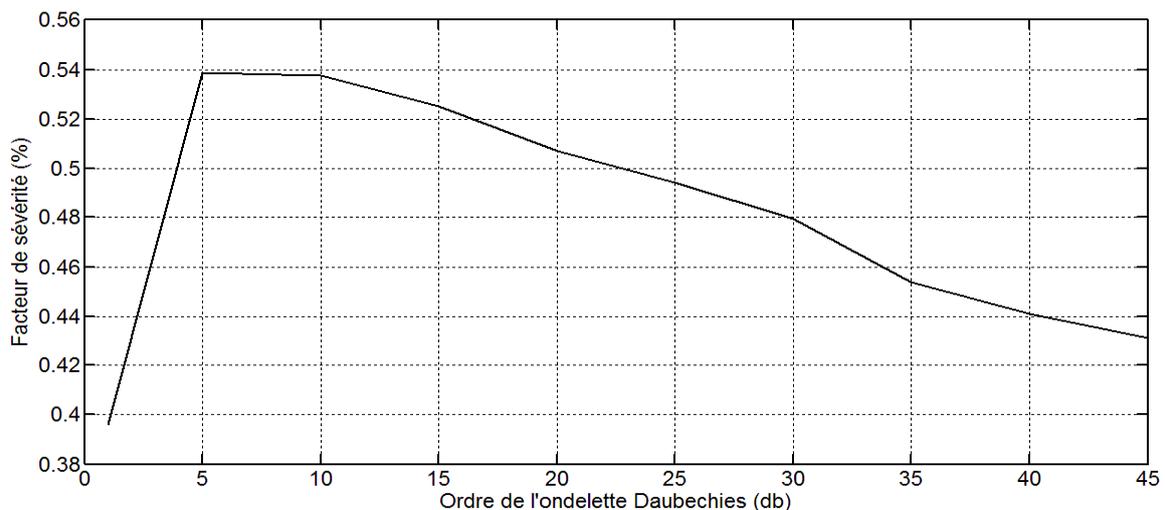
Ordre (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
<b>FSD</b>	0.122	0.163	0.163	0.154	0.146	0.139	0.1320	0.126	0.122	0.117



**Fig. III.14 :** FSD du MVP en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées.

**Tab. III.5 :** FSD de la puissance réactive instantanée (PRI) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.15.

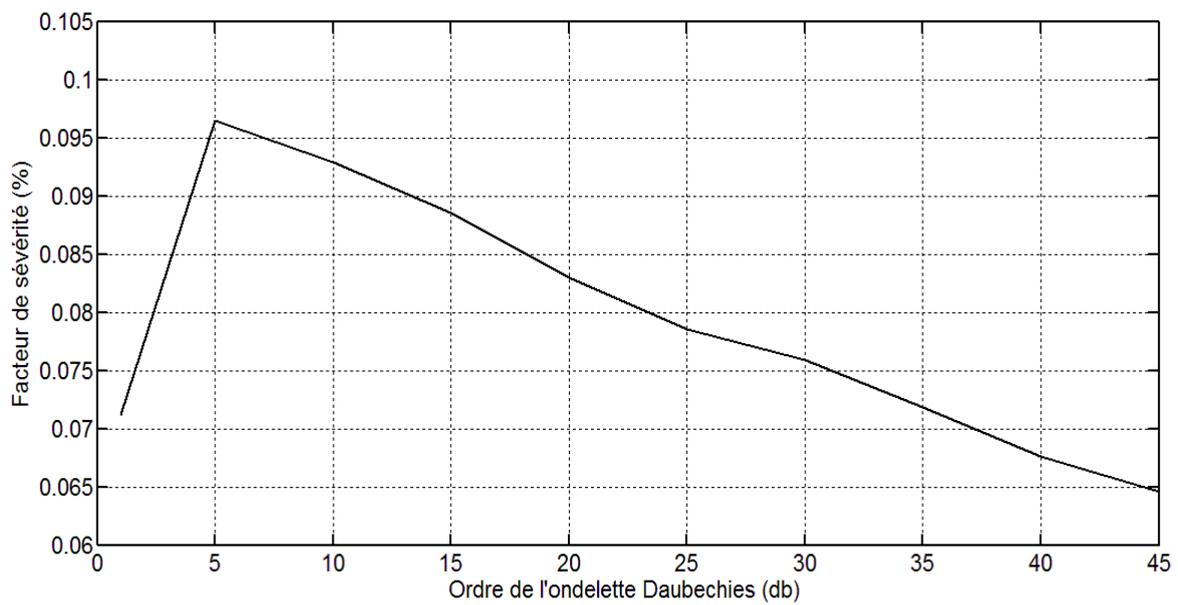
Ordre (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
<b>FSD</b>	0.3960	0.5388	0.5375	0.5250	0.5068	0.4941	0.4794	0.4539	0.4409	0.4311



**Fig. III.15 :** FSD de la PRI en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées.

**Tab. III.6 :** FSD du facteur de puissance (FP) calculé pour différents ordres de l'ondelette mère de Daubechies (db), en régime Stationnaire avec deux barres cassées est donné dans la figure III.16.

Ordre (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db35	Db40	Db45
FSD	0.0713	0.0966	0.0930	0.0886	0.0831	0.0786	0.0760	0.0719	0.0677	0.0647

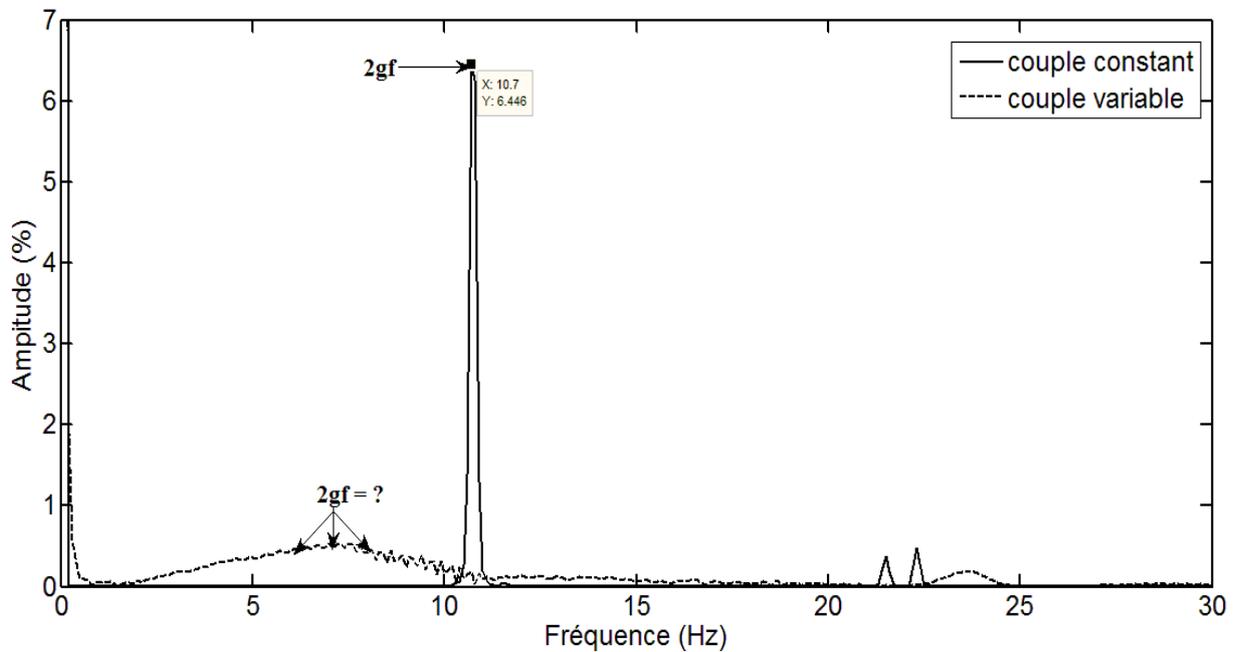


**Fig. III.16 :** FSD du FP en fonction de l'ordre de l'ondelette de Daubechies (db) en régime Stationnaire avec deux barres cassées

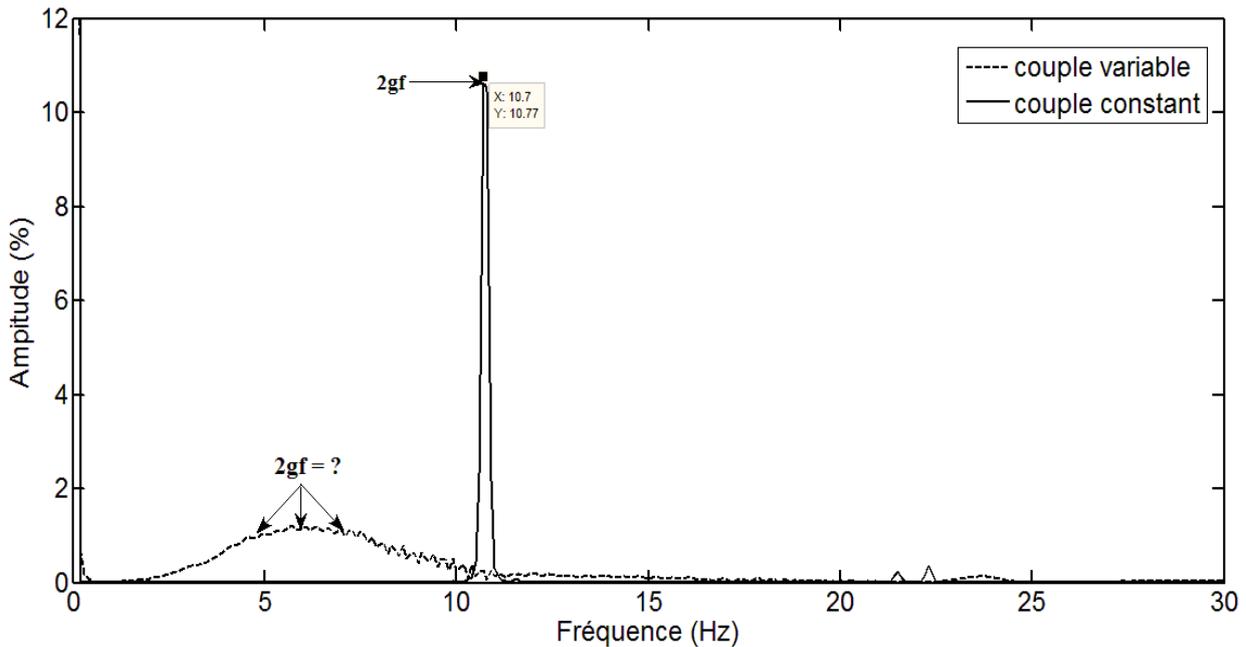
### III. 2. 2 Régime non stationnaire

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

Les spectres du module de vecteur de Park (MVP) et de la puissance réactive instantanée (*PRI*) pour un moteur asynchrone avec quatre barres rotoriques cassées dans les deux cas de couples de charge (constant et variable) sont représentés dans les figures III.17 et III.18, respectivement, obtenus des tests expérimentaux. Il est évident que les spectres du MVP et de la PRI dans le cas de couple constant confirment facilement l'état défectueux du moteur par l'apparition des composantes spectrales  $2gf$ , MVP à 10.7 Hz avec une amplitude de 6.44 % et PRI à 10,7 Hz avec une amplitude de 10,7 %.



**Fig. III.17 :** Signature du module de vecteur de Park (MVP) du moteur asynchrone avec quatre barres cassées en régime stationnaire et non stationnaire, expérimental.

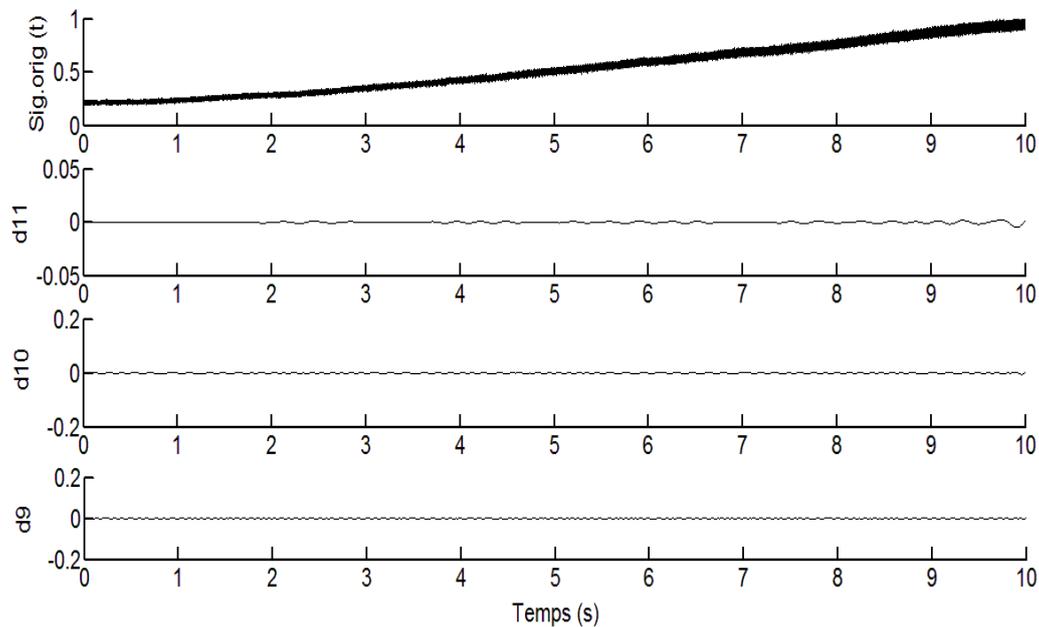


**Fig. III.18** : Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*) du moteur asynchrone avec quatre barres cassées en régime stationnaire et non stationnaire, expérimental.

La détection de défaut devient plus compliquée dans le cas du couple de charge variable en cas de résultats expérimentaux. En effet, les composantes caractéristiques de défaut  $2gf$  ont été fortement propagées dans des bandes fréquentielles larges. Ces bandes fréquentielles sont proportionnelles à la variation de la charge. Par conséquent, comme les valeurs instantanées du glissement ne peuvent pas être exactement définies, l'identification exacte de l'amplitude et la position des composantes caractéristiques de défaut  $2gf$  dans les spectres devient plus difficile et peut conduire à un diagnostic erroné de défaut. Les limitations de la TFR dans ce cas sont bien remarquées et l'utilisation de la TOD peut surmonter ces limitations.

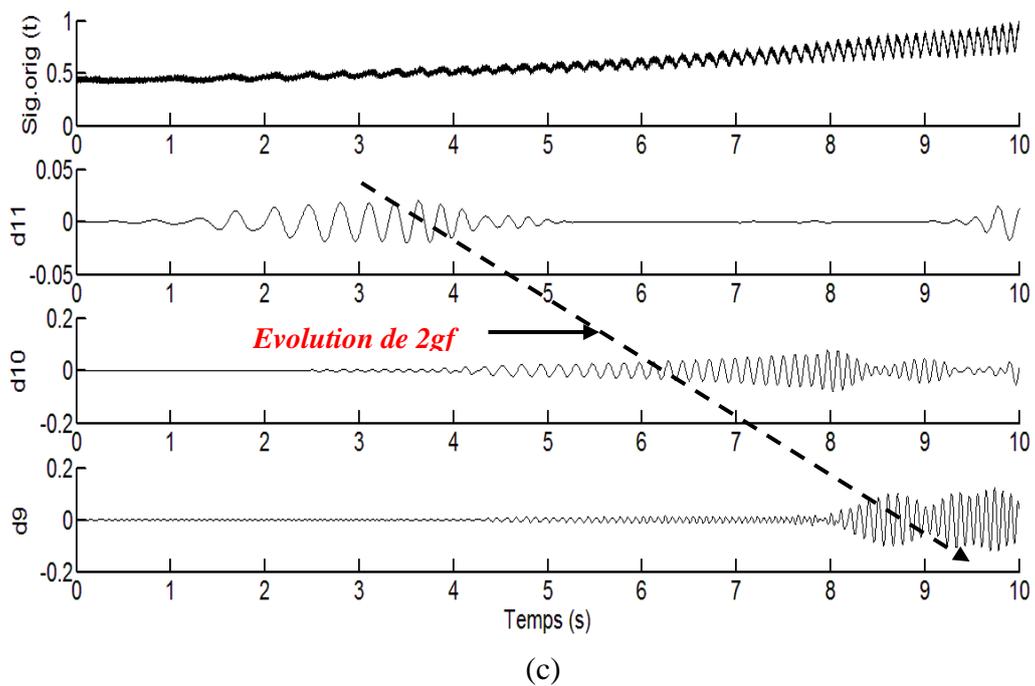
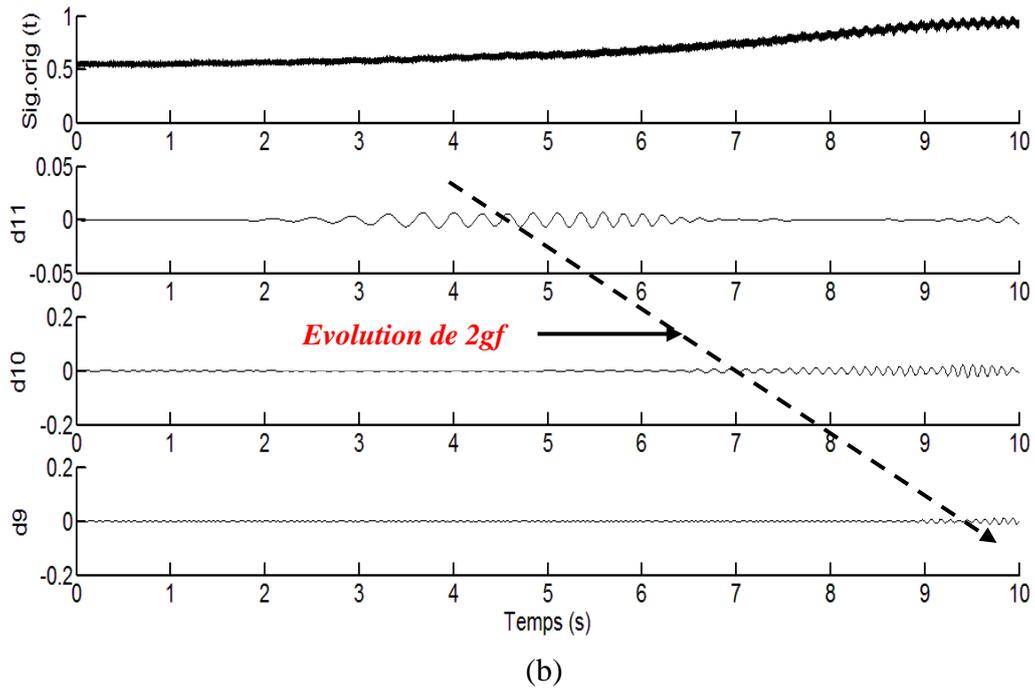
### a). Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

Les figures III.19- III.20- III.21 montrent, respectivement, les résultats expérimentaux des signaux du module du vecteur de Park (*MVP*), la puissance réactive instantanée (*PRI*) et le facteur de puissance (FP) comme signaux originaux et les signaux de détail d9, d10 et d11 obtenus par la décomposition en ondelettes en utilisant db45 au niveau 11 des signaux. La bande de fréquence qui peut être affectée par le défaut pour le cas expérimental est [2.8 :20] Hz. D'après Tab IV.1, cette bande fréquentielle sera localisée dans les signaux d9, d10 et d11. La figure III.18 (a) montre clairement l'absence de toutes oscillations fréquentielles dans les signaux de détail qui doivent contenir les composantes fréquentielles caractéristique de défaut  $2gf$  en régime non stationnaire. Cette observation indique l'état sain de la cage rotoriques du moteur. Cependant, la figure III.19 (b) montre clairement une évolution en temps et en fréquence de la composante de fréquence caractéristique de défaut de cassure de barres rotoriques  $2gf$ .

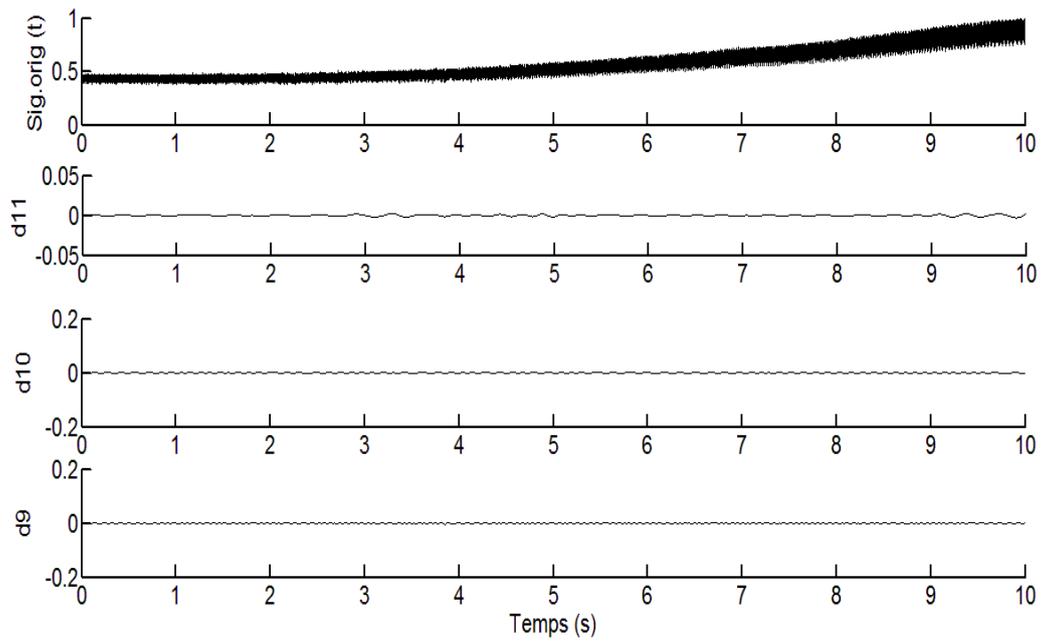


(a)

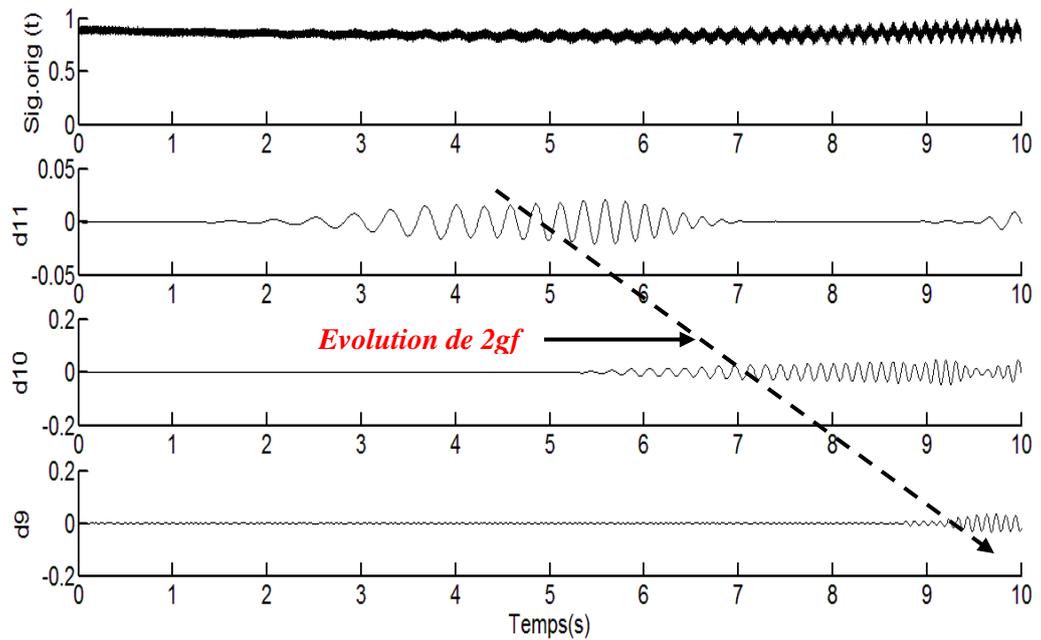
**Fig. III.19 :** Signature du module de vecteur de Park (*MVP*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain.



**Fig. III. 19 :** Signature du module de vecteur de Park ( $MVP$ ), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 01 BC, (c) 04BC.

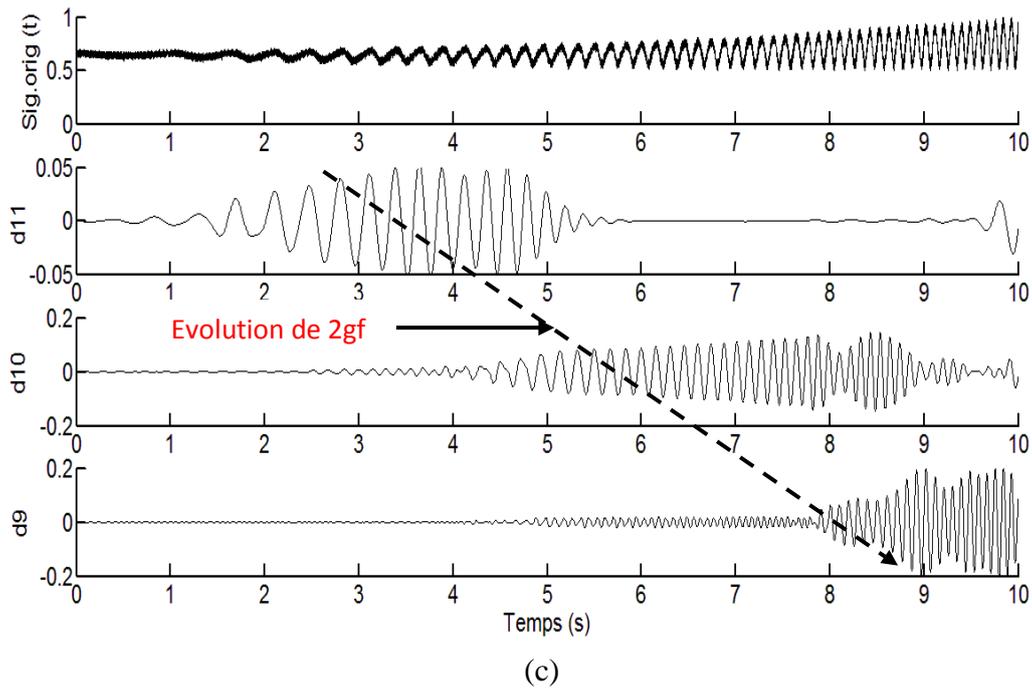


(a)

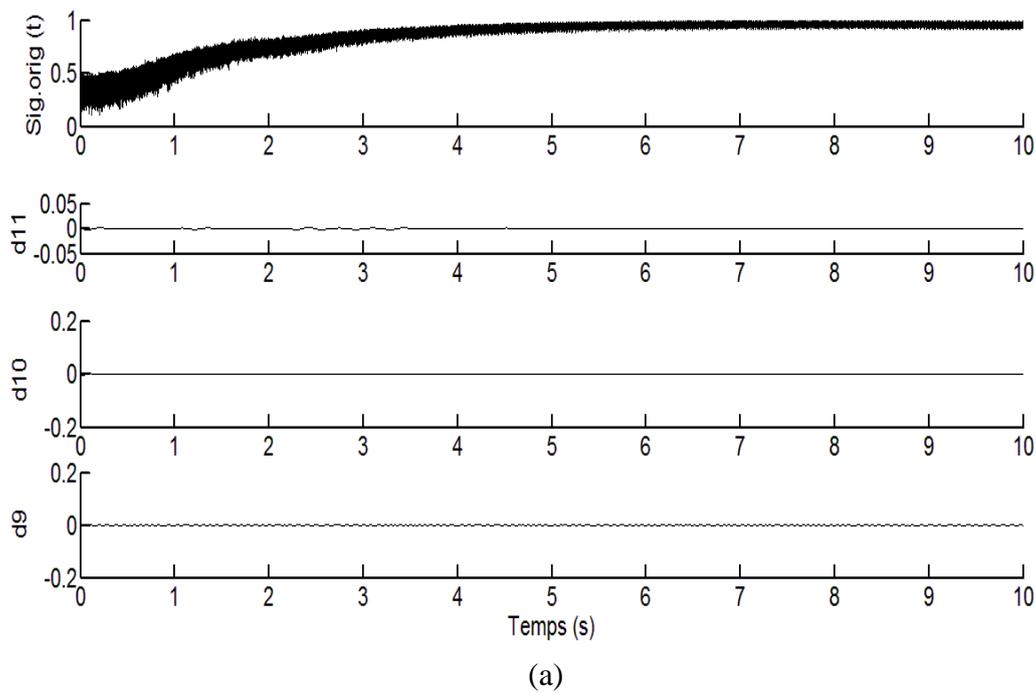


(b)

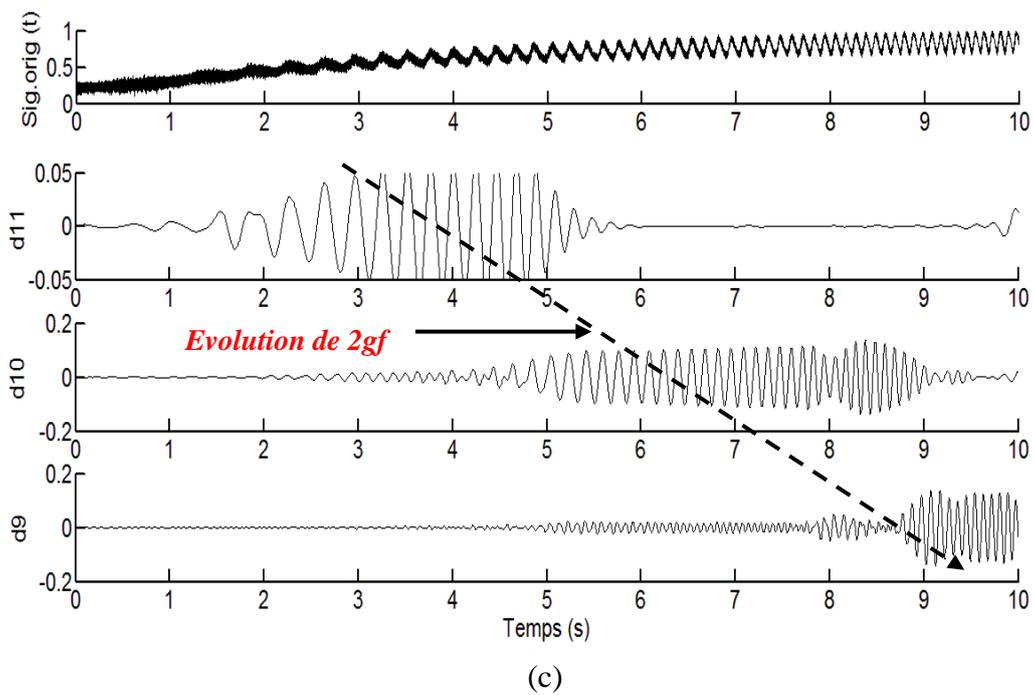
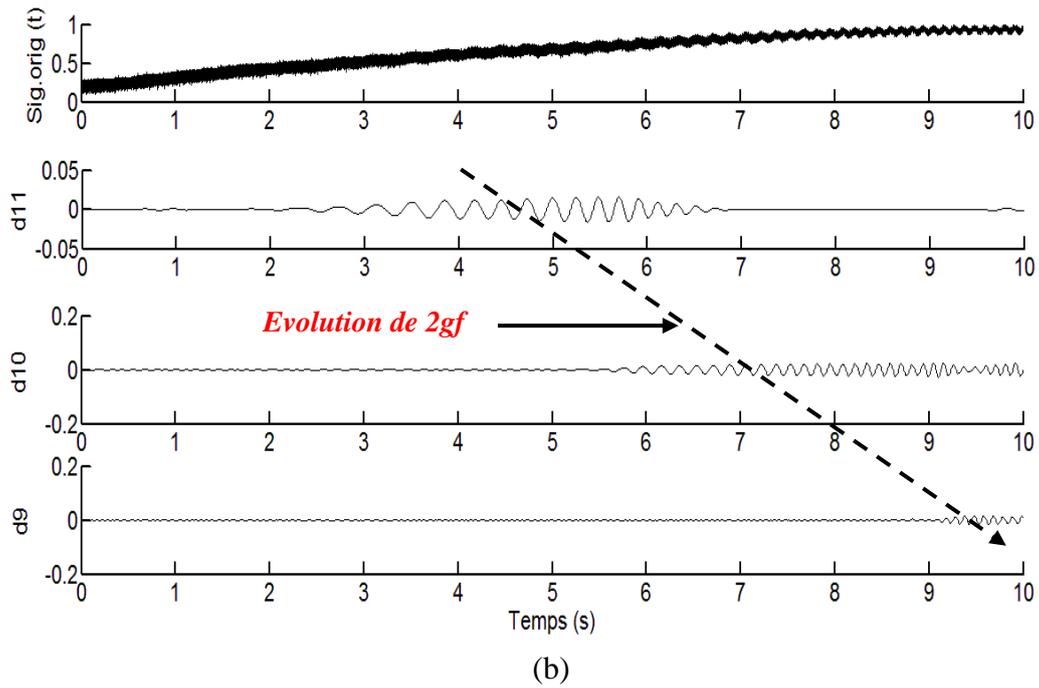
**Fig. III.20 :** Signature de la puissance réactive instantanée (PAI), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain, (b) 01BC.



**Fig. III.20 :** Signature de la puissance réactive instantanée (*PRI*), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (c) 04BC.



**Fig. III.21 :** Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (a) sain.



**Fig. III.21 :** Signature du facteur de puissance (FP), obtenue par db45, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, expérimental, (suite), (b) 01BC, (c) 04 BC.

L'augmentation des oscillations est clairement observée dans le cas de quatre barres cassées figures III.21 (c). En effet, selon les valeurs du glissement (valeurs du couple de charge), ces oscillations se déplacent de  $d_{11}$  (pour des faibles valeurs de glissement) à  $d_9$  (pour des valeurs proches de glissement nominal) pour le cas expérimental. La présence et la façon d'évolution particulière de ces oscillations permettent de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut de cassure de barres rotoriques. Une fois cette décision préliminaire de l'état du moteur a été prise, il est conseillé de définir un facteur de sévérité de défaut (*FSD*) afin d'évaluer le degré de défaillance dans le moteur. Tabs. IV. 7 montrent les valeurs de ce FSF pour les cinq cas (sain, une et quatre barres cassées). Ce FSD permet de détecter la présence des barres cassées avec une grande fiabilité. Il est évident que la valeur du FSD est augmentée avec l'augmentation de nombre de barres cassées pour toutes les méthodes utilisées. Ce qui en fait un bon indicateur de l'état de santé de la cage rotorique.

**Tab. III.7 :** FSD, obtenu par db45, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire, expérimental.

<i>Nombre de barres cassées</i>	<i>MVP (%)</i>	<i>PRI (%)</i>	<i>FP (%)</i>
<b>0</b>	0.0014	6.8667e-04	4.9801e-04
<b>1</b>	0.0091	0.0264	0.0325
<b>4</b>	0.2797	0.6973	1.0662

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude comparative détaillée sur l'application de la TFR et la TOD pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone à cage en utilisant divers signaux électriques issus de ce dernier. Il s'agit du module du vecteur de Park (*MVP*), la puissance réactive instantanée (*PRI*) et du facteur de puissance (*FP*). Cette étude est effectuée pour deux régimes de fonctionnement du moteur, stationnaire (couple de charge constant) et non stationnaire (couple de charge variable). Les tests expérimentaux montrent que, les deux méthodes d'analyse, la TFR et la TOD appliqués aux grandeurs électriques du moteur elle nous a donné de bon résultat pour la détection du défaut de cassures de barres dans le régime stationnaire avec une supériorité remarquable de la TFR. En régime non stationnaire, le diagnostic de défaut de cassure de barres utilisant la TFR devient très difficile et même erroné. Par contre la deuxième technique d'ondelette discrète qui nous donné bon résultat et peut accomplir la tâche du diagnostic de défaut.

# Conclusions générales

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée aux régimes stationnaire et non stationnaire en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR) et la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Au début de ce travail, nous avons établi un état de l'art des défauts dans la machine Asynchrone. Où nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts de cette machine avec leurs causes et conséquences.

La première partie du second chapitre a été consacrée au développement des méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone. Il s'agit des méthodes du courant statorique  $i_a$ , du module du vecteur de Park (*MVP*), du facteur de puissance (*FP*) et de la puissance réactive instantanée (*PRI*). Les signatures des défauts de cassure de barres rotoriques dans ces méthodes sont aussi bien illustrées. le second nous a permis de mettre en évidence les limitations de deux méthodes d'analyse du signal en vue du diagnostic et la détection des défauts dans la machine, l'une à base de la transformation de Fourier rapide (FFT) et l'autre est la transformation d'ondelette (TOD).

Nous avons présenté dans le troisième chapitre une étude comparative détaillée sur l'application de la transformée de Fourier rapide (*TFR*) et de la transformée en ondelettes discrète (*TOD*) pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone en utilisant les divers grandeurs électriques du moteur développés dans le deuxième chapitre. Afin de tirer les avantages et les inconvénients des méthodes de traitement de signal utilisées (*TFR* et *TOD*), l'étude a été effectuée pour deux régimes de fonctionnement du moteur, stationnaire (couple de charge constant) et non stationnaire (variation linéaire du couple de charge). Les tests et expérimentaux montrent que, les deux méthodes d'analyse, la *TFR* et la *TOD* appliqués aux grandeurs électriques du moteur précédemment cité permettent un diagnostic fiable de défaut dans le régime stationnaire avec une supériorité remarquable de la *TFR*. En régime non stationnaire, le diagnostic de défaut de cassure de barres utilisant la *TFR* devient très difficile et même erroné. En effet, les composantes caractéristiques de défaut ont fortement propagée dans des bandes fréquentielles larges et proportionnelles à la variation de la charge. Dans ces cas, l'analyse par la *TOD* peut accomplir la tâche du diagnostic de

défaut. Il peut être réalisé en utilisant une analyse qualitative en suivant l'évolution particulière de la composante caractéristique de défaut  $2gf$  en fonction de la variation du couple de charge. En outre, un facteur de sévérité de défaut ( $FSD$ ) a été défini et il s'est avéré être un bon indicateur de l'état du rotor du moteur asynchrone.

# *Bibliographie*

- [1] K. Yahia, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone triphasée par une approche modèle," Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2005.
- [2] N. Bessous, "Contribution au diagnostic des machines asynchrones," Thèse de magister, Université de Mentouri de Constantine, 2005.
- [3] N. Halem, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis," Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2015.
- [4] H. Cherif, "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes," Thèse de magister, Université de Biskra, 2014.
- [5] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, N°2, PP. 241-247, 1995.
- [6] R. Merad, "Outils de diagnostic appliques a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil," Thèse de magister, Université de Constantine, 2005.
- [7] M. Ammar, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones," Thèse de doctorat, Université de Skikda, 2012.
- [8] M. Sahraoui, "Etude comparative des méthodes de diagnostics des machines asynchrones," Thèse de doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.
- [9] 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.
- [10] J. R. Cameron and al, "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors," IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [11] H. Henao, C. Demian, G. A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 39, No. 5, pp. 1272–1279, Sep./Oct. 2003.
- [12] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, W. T. Fink, "Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, pp. 652-658, Dec. 1994.

- 
- [13] J. Milimonfared and al, "A Novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, September/October 1999, pp. 1000-1006.
- [14] J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [15] A. Jaco, A. Makki, H. Yahoui, G. Grellet, "Modelling of Three Phase Asynchronous Motors Application to Magnetic Faults Diagnostic," *ICEM 98, Istanbul, Turkey*, Vol 1, 1998, pp. 443-447.
- [16] S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, "Rotor cage fault diagnosis in three phase induction motors by extended Park's vector approach," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 28, No. 4, pp. 289- 299, 2000.
- [17] A. J. L. Cardoso and al, "Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by park's vector approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29(5):897\_901, Sept. /Oct. 1993.
- [18] Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, W. Chen, "Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No.3, pp. 483-490, Sep. 2004.
- [19] A. M. Trzynadlowski, E. Ritchie, "Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors : A Case of Rotor Cage Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, October 2000, pp. 1092-1099.
- [20] R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [21] S. E. Legowski, A. H. M. Sadrul Ula, A. M. Trzynadlowski, "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [22] S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 37, No. 5, pp. 1227-1233, Sept./Oct. 2001.
- [23] M. Drif, A. J. M. Cardoso, "Airgap-eccentricity fault diagnosis, in three-phase induction motors, by the complex apparent power signature analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,
- [24] A. M. Trzynadlowski, M. Ghassemzadeh, S. F. Legowski, "Diagnostics of mechanical abnormalities in induction motors using instantaneous electric power," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 439-446, Dec. 99.

- [25] 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.
- [26] G. Didier, "Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillances," Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I., 2004.
- [27] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and applications," Prentice Hall, 1988.
- [28] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
- [29] S. H. Kia, H. Henao, 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.
- [30] E. Hitti, "Sélection d'un Banc Optimal de Filtres à Partir d'une Décomposition en Paquets d'Ondelettes. Application à la Détection de Sauts de Fréquences dans des Signaux Multicomposants," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [31] S.Bourdim, "Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones," Mémoire de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2011.
- [32] S.G. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," second ed., Academic Press, 1998.
- [33] S. G. Malat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 2, No. 7, Jul. 1989.
- [34] R. Benzid, "Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels," Thèse Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2005.
- [35] A.Bouzida , "diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes," Thèse de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008.