

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 électrique

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

*Modélisation Des Défauts Dans Le  
Système Électromagnétique*

Présenté par :  
**SABAH Reyhab**  
Soutenu le : 23 Juin 2018

Devant le jury compose de :

Mr. MAIMOUN Soury Mohemmed

Mr. ALOUI Lotfi

Mr. KHAN Lotfi

Prof

Prof

Dr

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018

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 électrique

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

**MASTER**

*Thème*

*Modélisation Des Défauts Dans Le Système  
Électromagnétique*

**Présenté par :**

*SABAH Reyhab*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Pr. ALOUI Lotfi*

*Signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Pr. MAIMOUN Soury Mohemmed**

*Signature*

**Cachet et signature**



## Résumé

Les machines asynchrone ont dévasté le monde industriel pour sa solidité et faible coût, malgré ces avantages, elles ont été affecté par défauts très différents peut être ne sont pas claires, et si cette machines n'ont été traité peut être elles causer de grandes pertes.

Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance pour garantir le bon fonctionnement des les machines asynchrones pour connaître leurs défauts, pour sa il fit trouver une synthèse décrive le comportement de ces machines en précision.

Dès lors que nous proposons la machine par une méthode des éléments finis dans logiciel flux 2D, et nous posons les défauts fictives dans un modèle et nous leurs révélons par la méthode transformée en ondelettes

## ملخص

اجتاحت الآلات اللاتزامنية العالم الصناعي لصلابتها و ثمنها المنخفض لكن رغم ايجابياتها إلا أنها تتعرض إلى إعطاب مختلفة قد لا تكون واضحة و إن لم يتم معالجتها فإنها قد تؤدي إلى خسائر كبيرة وهذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لضمان السير الحسن للآلات ولمعرفة الإعطاب لهذا وجب إيجاد تمثيل يصف أداء الآلات بدقة.

نمثل في هذا العمل الماكينة بطريقة العناصر المنتهية في برنامج الحقل ذو بعدين ونمثل الإعطاب الافتراضية ونكشف عنها بطريقة التحليل الموجي.

---

## Liste de figures

### CHAPITRE 1 : Modélisation la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

<b>1.1</b>	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	<b>2</b>
<b>1.2</b>	Stator d'une machine asynchrone.....	<b>3</b>
<b>1.3</b>	Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.....	<b>4</b>
<b>1.4</b>	Constitution du rotor bobiné.....	<b>4</b>
<b>1.5</b>	Principe du fonctionnement d'un moteur.....	<b>6</b>
<b>1.6</b>	Fonction d'interpolation d'un élément.....	<b>10</b>

### CHPITRE 2 : Diagnostique des défauts de la machine asynchrone

<b>2.1</b>	Photo d'une barre cassée.....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.....	<b>13</b>
<b>2.3</b>	Défaut d'excentricité.....	<b>14</b>
<b>2.4</b>	Représentation des différents défauts statoriques.....	<b>17</b>
<b>2.5</b>	Dimension de roulement à bille.....	<b>18</b>
<b>2.6</b>	Principe de la Transformée de Fourier.....	<b>25</b>
<b>2.7</b>	Représentation temporelle vers ondelettes.....	<b>26</b>
<b>2.8</b>	Quelque fourme des ondelettes usuelle.....	<b>27</b>

### CHAPITRE 3 : Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

<b>3.1</b>	Les dimensions de la MAS.....	<b>29</b>
<b>3.2</b>	Bobinage statorique.....	<b>30</b>
<b>3.3</b>	Circuit électrique de la MAS dans logiciel flux 2D.....	<b>30</b>

---

**CHAPITRE 1 : Modélisation la machine asynchrone par la méthode des éléments finis**

**CHAPITRE 2 : Diagnostique des défauts de la machine asynchrone**

**2.1** Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage.....**17**

**2.3** Définition des termes.....**20**

**2.1** Familles d'ondelettes.....**26**

**CHAPITRE 3 : Simulation de la machine asynchrone à l'état sain**

**3.1** Les caractéristiques de la machine.....**32**

**CHAPITRE 4 : Simulation de la machine asynchrone avec le défaut**

## **Sommaire**

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux .....	V
Liste des symboles.....	VI
Introduction générale.....	1

### **CHAPITRE 1 : Modélisation la machine asynchrone par la méthode des éléments finis**

<b>1. Modélisation la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.</b>	<b>2</b>
<b>1.1.Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.Constitution de la machine asynchrone.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1. Le stator.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2. Le rotor.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2.1.Le rotor à cage.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2.2.Le rotor bobiné.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.3. Les paliers.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.Méthode des éléments finis.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.1. Modèle employé .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.1.1.Mode magnétostatique.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.1.2.Mode magnétodynamique.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.1.3.Mode magnétique transitoire.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.Le principe de la méthode des éléments finis.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.Le logiciel FLUX 2d.....</b>	<b>10</b>

### **CHAPITRE 2 : Diagnostic des défauts de la machine asynchrone**

<b>2.1.Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.Les défaillances des machines asynchrones.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1.1.Rupture de barres.....</b>	<b>12</b>

2.2.1.2.	Ruptures d'anneaux.....	13
2.2.1.3.	Défauts d'excentricité.....	14
2.2.2.	Défaillances des circuits électriques statorique.....	15
2.2.2.1.	Défauts d'isolant dans un enroulement.....	15
2.2.2.2.	Court-circuit entre spires.....	16
2.2.2.3.	Court-circuit entre phases.....	16
2.2.2.4.	Défauts de circuit magnétique.....	17
2.2.3.	Défaillances des roulements.....	17
2.3.	Origines et causes des défauts.....	19
2.4.	Définition et objectif du diagnostic.....	20
2.4.1.	Définition1.....	20
2.4.2.	Objectif du diagnostic .....	20
2.4.3.	Terminologies et concepts.....	21
2.5.	Méthode de diagnostique des défauts dans la machine asynchrone .....	22
2.5.1.	Les méthodes de connaissances.....	22
2.5.2.	Les méthodes de redondances analytiques.....	22
2.5.3.	Les méthodes par l'analyse de signaux.....	22
2.6.	Application de l'analyse spectrale pour la détection des défauts rotoriques.....	23
2.6.1.	Détection des défauts rotoriques par l'analyse des courants statorique...23	
2.6.2.	Détection des défauts rotoriques par l'analyse des flux magnétique.....	23
2.6.3.	Détection des défauts rotoriques par l'analyse du couple électromagnétique.....	24
2.6.4.	Détection des défauts rotoriques par l'analyse de la puissance instantanée.....	24
2.6.5.	Détection des défauts rotoriques par l'analyse de la tension du neutre....	24
2.7.	Les techniques de l'analyse de signal dans le diagnostique.....	24
2.7.1.	La transformée de Fourier.....	24
2.7.2.	La transformée en ondelettes.....	25
2.7.2.1.	Historique.....	25
2.7.2.2.	Type de la transformée en ondelette.....	26
2.7.2.2.1.	Transformée en ondelettes continue (TOC).....	26
2.7.2.2.2.	Transformée en ondelette discrète (TOD).....	27
2.7.2.3.	Avantages de la transformée en ondelettes.....	28

## CHAPITRE 3 : Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

<b>3.1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.</b>	<b>Dimensions géométriques et caractéristique de la MAS.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.</b>	<b>Circuit électrique.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.</b>	<b>Matériau utilisé.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.</b>	<b>Définition et maillage de la structure d'une MAS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.6.</b>	<b>Simulation de la machine asynchrone à l'état sain.....</b>	<b>33</b>
<b>3.6.1.</b>	<b>La machine asynchrone à vide.....</b>	<b>33</b>
<b>3.6.1.1.</b>	<b>Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD).....</b>	<b>36</b>
<b>3.6.1.2.</b>	<b>Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR).....</b>	<b>37</b>
<b>3.6.2.</b>	<b>La machine asynchrone en charge.....</b>	<b>39</b>
<b>3.6.2.1.</b>	<b>Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD).....</b>	<b>42</b>

## CHAPITRE 4 : Simulation de la machine asynchrone avec le défaut

<b>4.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.</b>	<b>Modélisation d'un défaut de la MASY dû à un Court-circuit .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.1.</b>	<b>Analyse le courant <math>i_1</math> par la transformée en ondelettes discrète (TOD)...</b>	<b>45</b>
<b>4.2.</b>	<b>Modélisation d'un défaut de la MASY dû à un Casser des trois barres .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR).....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Analyse le courant <math>i_1</math> par la transformée en ondelettes discrète (TOD)...</b>	<b>49</b>
<b>4.3.</b>	<b>Modélisation d'un défaut de Réduction de nombre de phases.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>Analyse le courant <math>i_1</math> par la transformée en ondelettes discrète (TOD)...</b>	<b>52</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>59</b>

## **Introduction générale**

Ce travail est dédié au diagnostic des défauts dans les machines électriques, en particulier les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Ce choix est dû principalement car la machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles, du fait de sa grande robustesse et son faible coût.

L'objectif principal du présent travail est d'exploiter une méthode de traitement de signal appliquées pour le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques, court circuit et réduction de nombre des files en régime stationnaire par la transformée en ondelettes discrète (TOD) et l'ajout exemple de traitement de signal par méthode transformée de Fourier.

Notre mémoire sera structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

Dans le première chapitre, est consacré à la modélisation de la machine asynchrone triphasée saine par la méthode des éléments finis en utilisant la technique pas à pas dans le temps, on utilise le logiciel flux 2D pour modalisation la machine par méthode éléments finis.

Dans le deuxième chapitre, présente des notions de bases reliées à l'action de diagnostic, suivi d'une présentation succincte de la constitution du dispositif à étudier. Les différents défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone triphasée seront détaillés, avec comme trame de fond les différentes approches destinées au diagnostic de la machine asynchrone triphasée.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons les résultats de la simulation de moteur asynchrone, et nous présenterons l'analyse spectral de courant statorique (à l'aide de la transformé en ondelettes discret), en absence de défauts, à vide et en charge.

Dans Le quatrième chapitre, est réservé à l'étude du défaut de la rupture de barres rotoriques, court circuit et réduction de nombre des files, le défaut sera simuler en utilisant la méthode des éléments finis pas à pas dans le temps.

## 1. Modélisation la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

### 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons quelques notions purement théoriques concernant les machines électriques, ces notions ont été extraites principalement de la littérature trouvée. Nous présentons aussi les modèles mathématiques qui peuvent être exploités dans le but de modéliser le comportement électromagnétique de la machine.

#### 1.1.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor, bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettons que la structure du rotor à cage est électriquement équivalente à celle du rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [3].

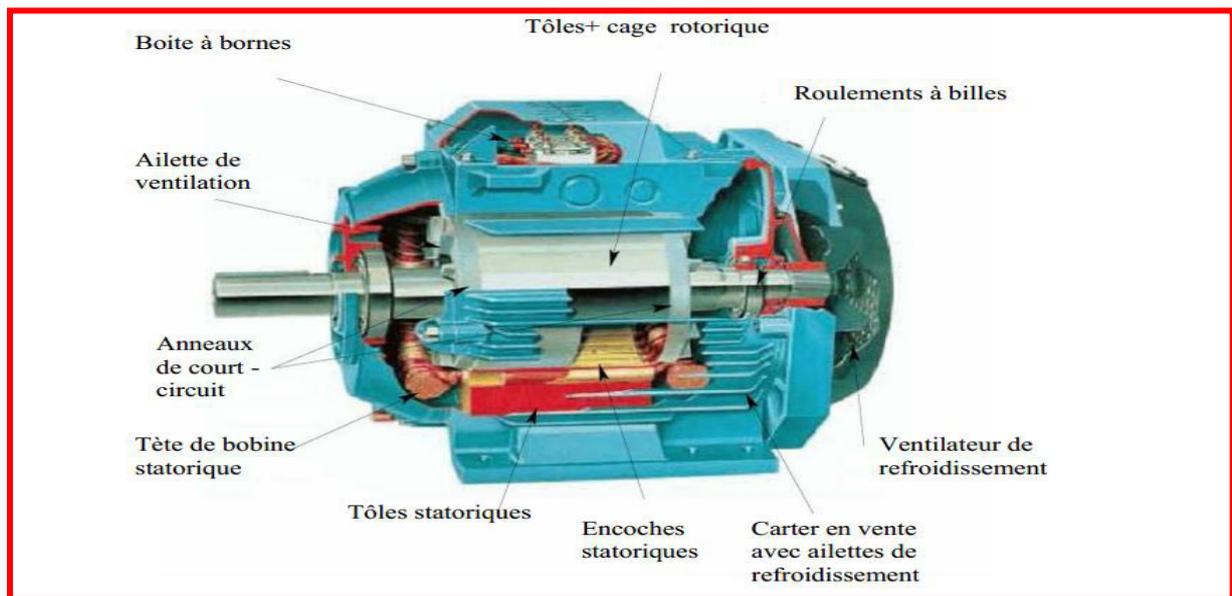


Figure 1.1 éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [4]

### 1.1.1.1. Le stator

Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste 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 [1].

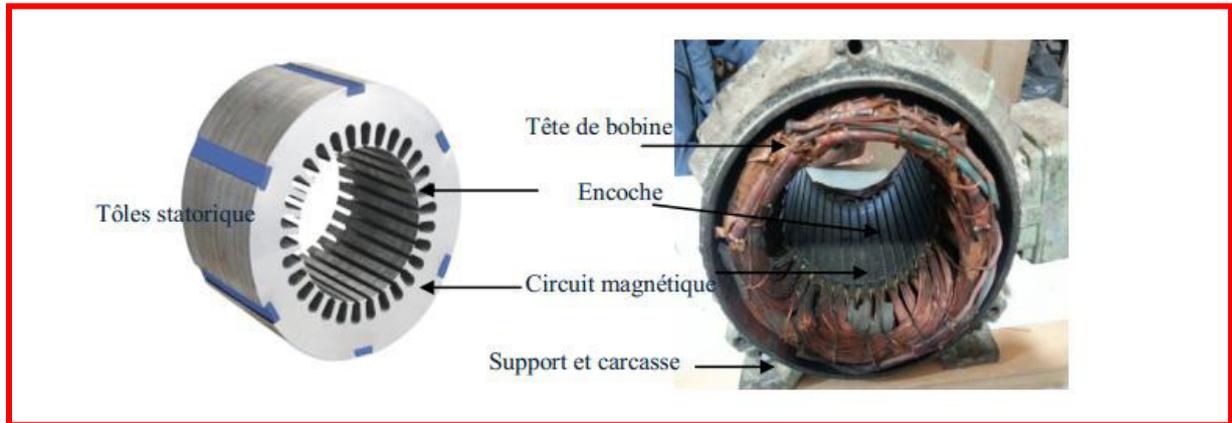


Figure 1.2 stator d'une machine asynchrone [2]

### 1.1.1.1. Le rotor [18]

C'est par le rotor, la partie mobile, que la machine asynchrone se distingue de l'autre machine triphasée, la machine synchrone. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables [3].

#### 1.1.1.1.1. Le rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**figure 1.3**). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [3].

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service [3].

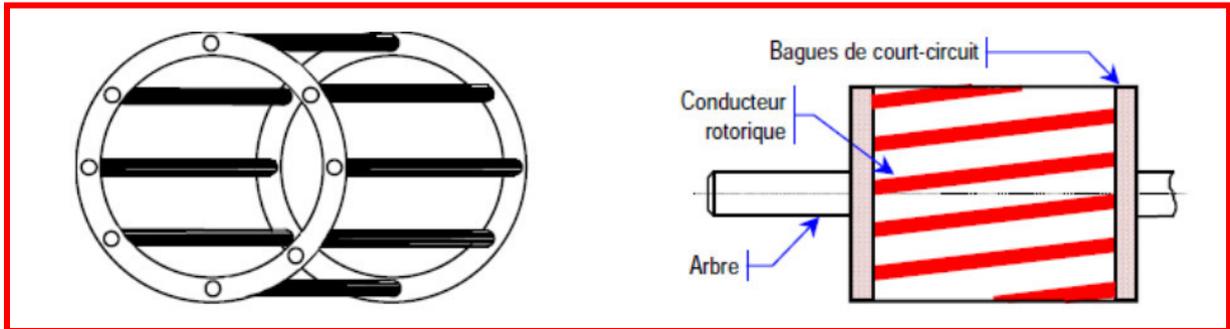


Figure 1.3 rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone

### 1.1.1.1.2. Le rotor bobiné

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor [3].

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite. Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine [3].

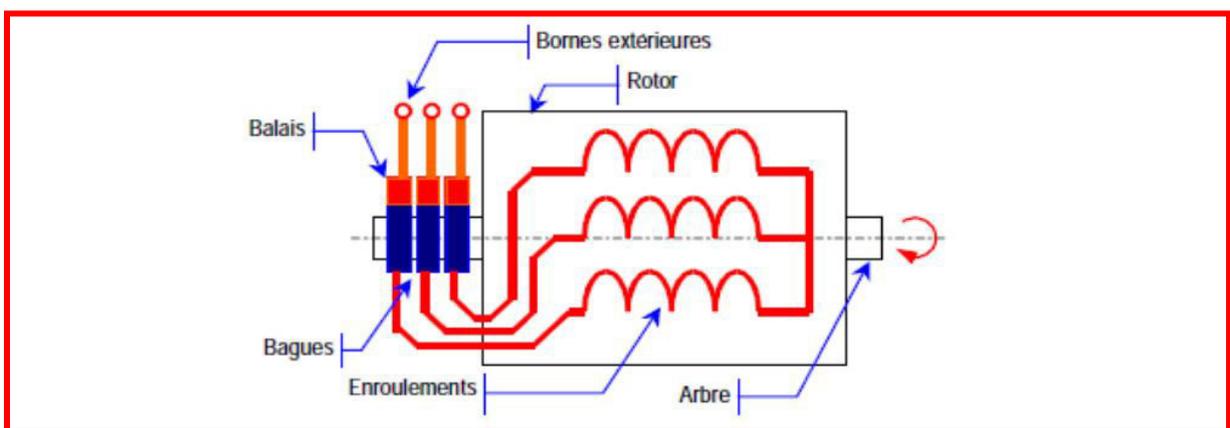


Figure 1.4 constitution du rotor bobiné

### 1.1.1.2. Les paliers

Sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants : les flasques et les roulements à billes [1].

### 1.1.2. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé 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. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant [5] :

$$n_1 = f/p \quad (1.1)$$

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

Le rapport :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1.2)$$

A l'arrêt :  $g=1$  car  $n_r=0$  ( $\Omega=0$ )

$g$  : Est appelé glissement d'une machine asynchrone

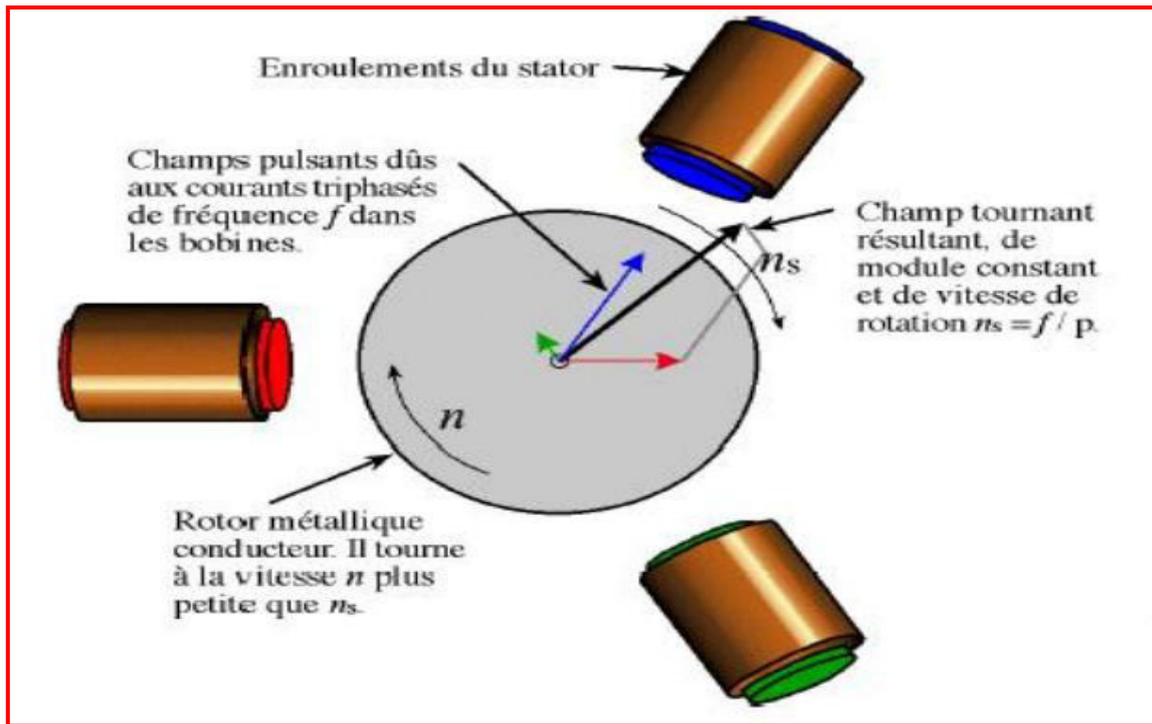


Figure 1.5 Principe du fonctionnement d'un moteur [6]

### 1.1.3. Méthode des éléments finis

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, l'effet de saturation des matériaux magnétiques, les effets d'harmoniques de l'espace ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [7].

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré [7].

On les définit comme suit [8] :

- Les relations de couplage électromagnétique.

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

➤ Les relations de la conservation des flux.

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (1.5)$$

$$\text{div} \vec{D} = \sigma \quad (1.6)$$

➤ La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.8)$$

➤ La relation de la loi d'Ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.9)$$

Où,

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m)

$\vec{E}$  : Champ électrique (V/m)

$\vec{B}$  : Induction magnétique (T)

$\vec{J}$  : Densité de courant totale (A/m<sup>2</sup>)

$\mu$  : Perméabilité magnétique (H/m)

$\sigma$  : Conductibilité électrique (Ω<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)

### 1.1.3.1. Modèle employé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé [8] :

**1.1.3.1.1. Mode magnétostatique**

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (1.10)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (1.11)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu \vec{B}_r \quad (1.12)$$

La condition (1.5) permet de définir une fonction en vecteur potentiel **A** telle que:

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (1.13)$$

Pour que **A** soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition  $\text{div}(\vec{A}) = 0$  appelée jauge de **Coulomb**. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de (1.13) et (1.12) dans (1.10) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}} (\nu \cdot \vec{B}_r) \quad (1.14)$$

Où

$\nu = 1/\mu$  : est la réflectivité magnétique.

**1.1.3.1.2. Mode magnétodynamique**

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps. Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t}$  n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables

du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J} \quad (1.15)$$

$\omega = 2\pi f$  : pulsation électrique (rad.s<sup>-1</sup>).

$j$  : unité imaginaire ( $j^2 = -1$ ).

### 1.1.3.1.3. Mode magnétique transitoire

Il est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système des équations caractéristiques précédentes, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps. Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B}_r + \overrightarrow{\text{grad}} V = 0 \quad (1.16)$$

### 1.1.4. Le principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [7].

Pour élément triangulaire on a [7]:

$$A_e(x, y) = a + bx + cy \quad (1.17)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$A_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (1.18)$$

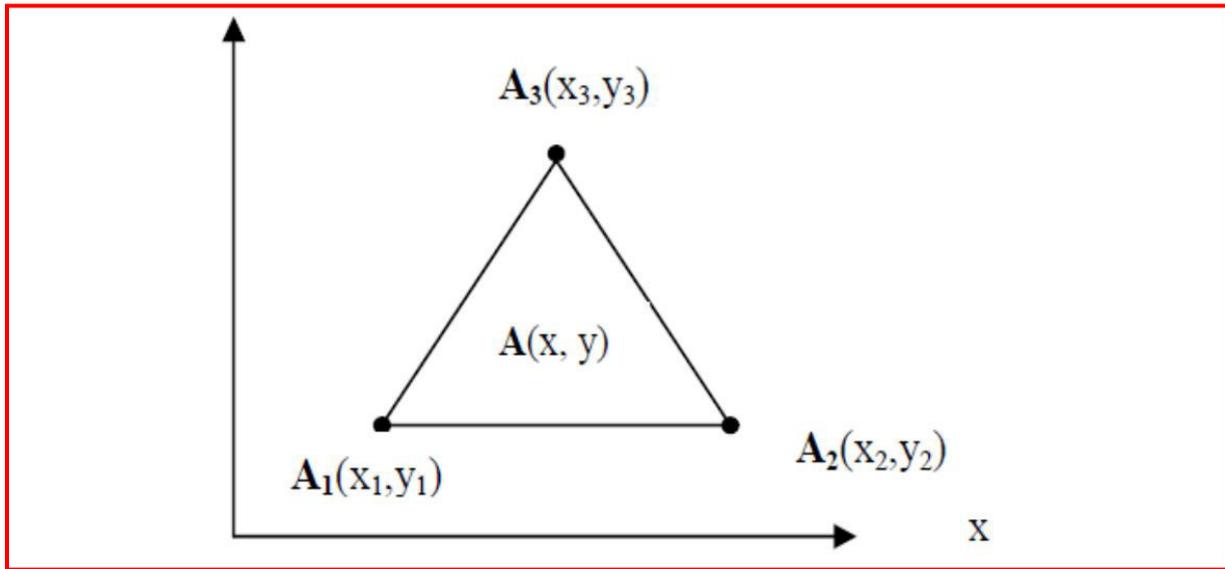
Les constantes a, b, c et d sont à déterminer. Le potentiel  $A_e$  est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine ( $\Omega$ )de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{n=1}^{ne} A_e(x, y) \quad (1.19)$$

$e$  : Numéro d'élément.

$ne$  : Le nombre totale des éléments du domaine ( $\Omega$ ).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (**Figure 1.6**).



**Figure 1.6** Fonction d'interpolation d'un élément

### 1.1.5. Le logiciel FLUX 2d

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage [9].

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [9]:

#### ➤ **Module pré-processeur**

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le

schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

➤ **Module processeur**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER\_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

➤ **Module post-processeur (PostPro\_2D)**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons quelques notions générales et théoriques sur les machines électriques. Ces notions présentent aussi les défaillances qui peuvent être causé dans une machine électrique, leurs causes ainsi que les moyens utilisés pour prévoir leurs présences.

## 2.2. Les défaillances des machines asynchrones

Malgré que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte conséquence de la production [5].

### 2.2.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques

Les défauts les plus récurrents qui sont localisés au niveau du rotor peuvent être définis comme suit [6] :

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- Excentricité (statique, dynamique, mixte)

#### 2.2.1.1. Rupture de barres

La rupture de barres d'une machine asynchrone est le défaut le plus couramment étudié aux laboratoires. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques dans les courants des enroulements statorique aux fréquences [3]

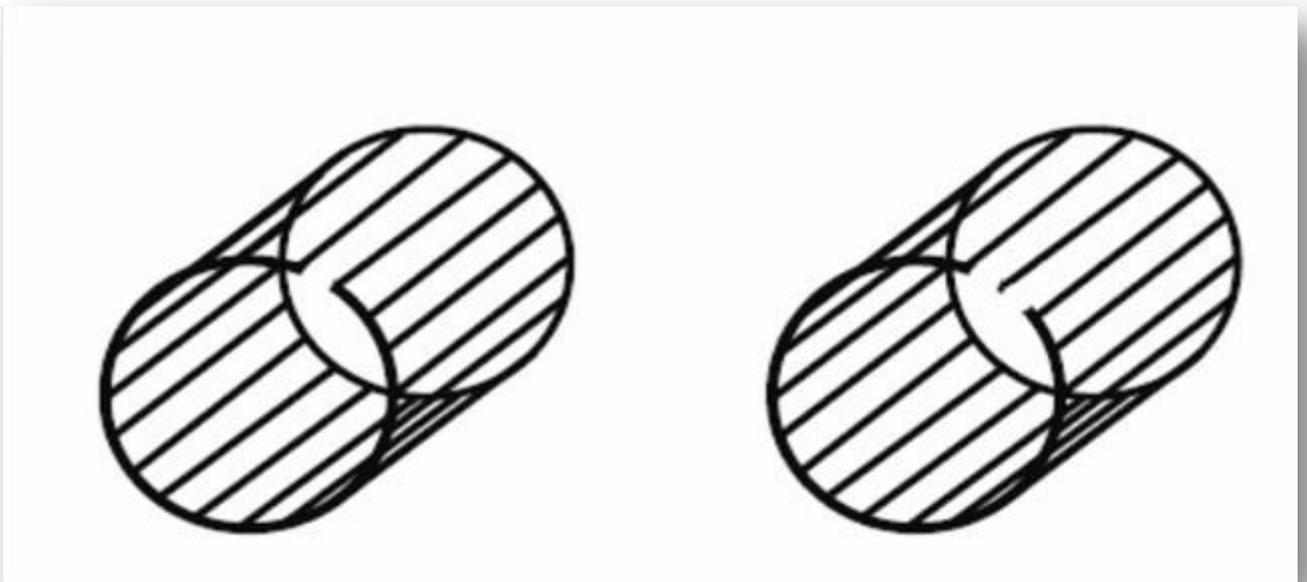


**Figure 2.1.** Photo d'une barre cassée

#### 2.2.1.2. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [3].

Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. 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 statorique similaire à celui provoqué par la cassure de barres [3]



**Figure 2.2.** Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

### 2.2.1.3. Défauts d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité [2].

L'excentricité, décentrement du rotor par rapport au stator, d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [2].

Les catégories d'excentricité sont généralement distinguées comme donnée par la

figure 2.1[2] :

- **L'excentricité statique** : l'axe de rotation du rotor est fixe mais ne coïncide pas avec celui du stator, dont la cause principale est un défaut de centrage des flasques.
- **L'excentricité dynamique** : le rotor possède un axe de rotation qui tourne autour de l'axe géométrique du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- **L'excentricité mixte** : la plus fréquente, est la combinaison des deux cas sus-présentés.

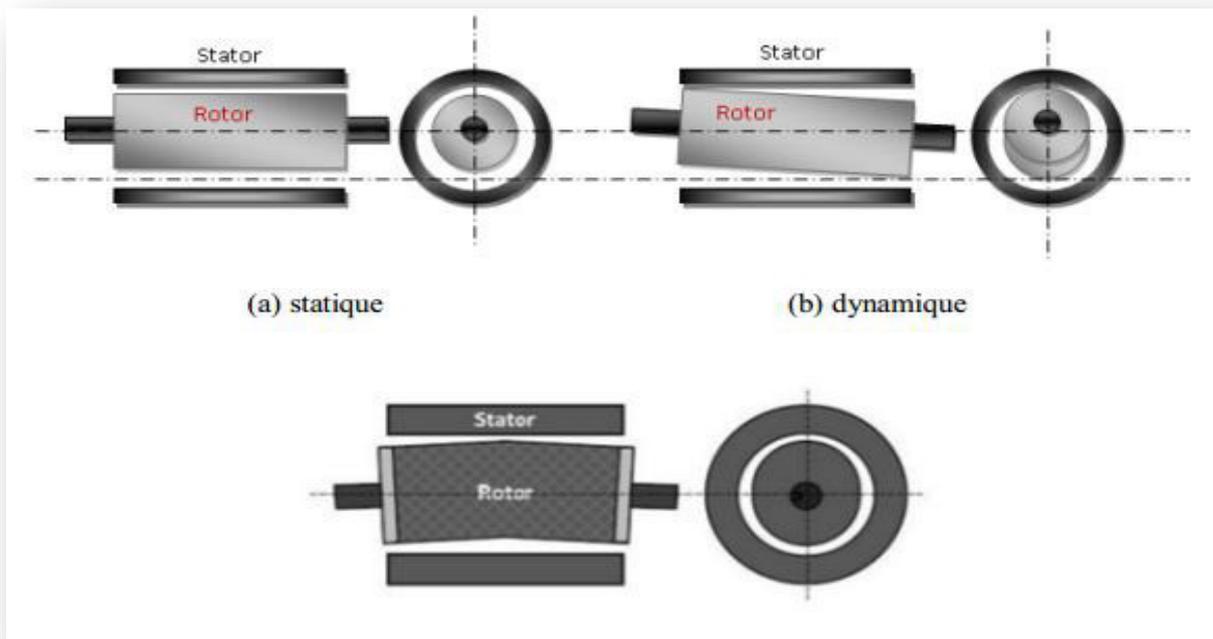


Figure 2.3. Défaut d'excentricité

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permettent de détecter ces types de défaillance. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes.

### **2.2.2. Défaillances des circuits électriques statorique**

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [6]:

- ✓ Défaut d'isolant
- ✓ court-circuit entre spires
- ✓ court-circuit entre phases
- ✓ Défaut de circuit magnétique

#### **2.2.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents organes du moteur. Cependant, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et de mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau va se dégrader de manière prématurée ou accélérée et finira par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [9].

Les différentes Causes pour ce type de défaut sont [9] :

- ✓ la dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ la tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation,
- ✓ le courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- ✓ les vibrations mécaniques.
- ✓ le vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée ; même pendant une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader
- ✓ fonctionnement dans un environnement sévère

### **2.2.2.2. Court-circuit entre spires**

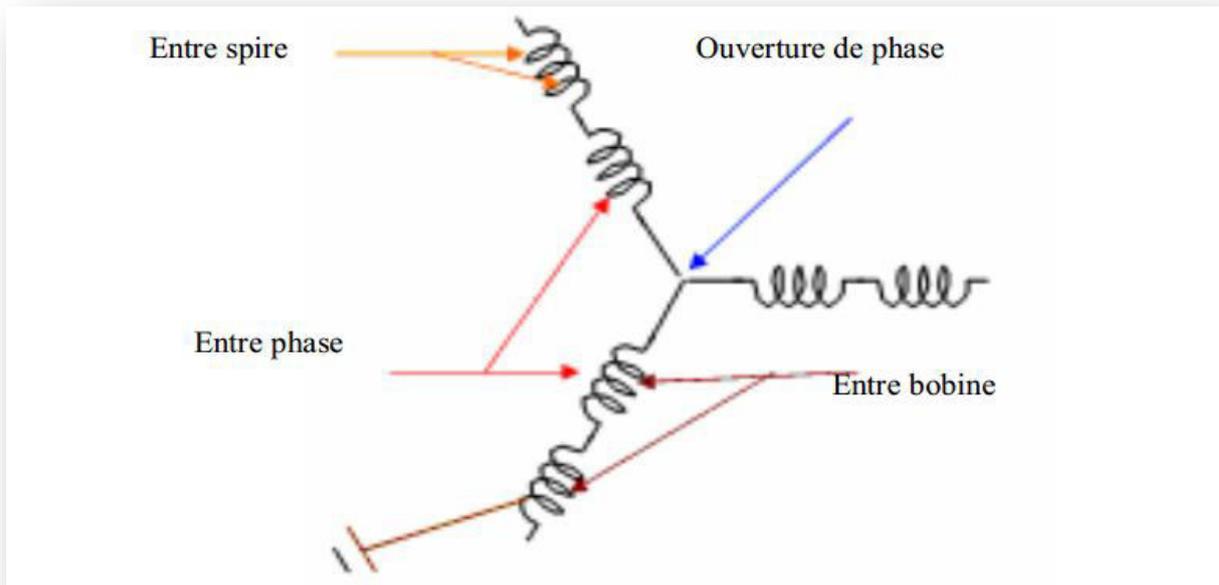
Un court-circuit entre spires d'une même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statorique dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique en dehors d'une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut [9].

### **2.2.2.3. Court-circuit entre phases**

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [6].

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs [6].

Les courants statorique sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [6].



**Figure 2.4** représentation des différents défauts statoriques [10]

#### 2.2.2.4. Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant [6], etc...

#### 2.2.3. Défaillances des roulements

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure 2.). En fonctionnement normale la défaillance est due à la fatigue commencer par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément de roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [10].

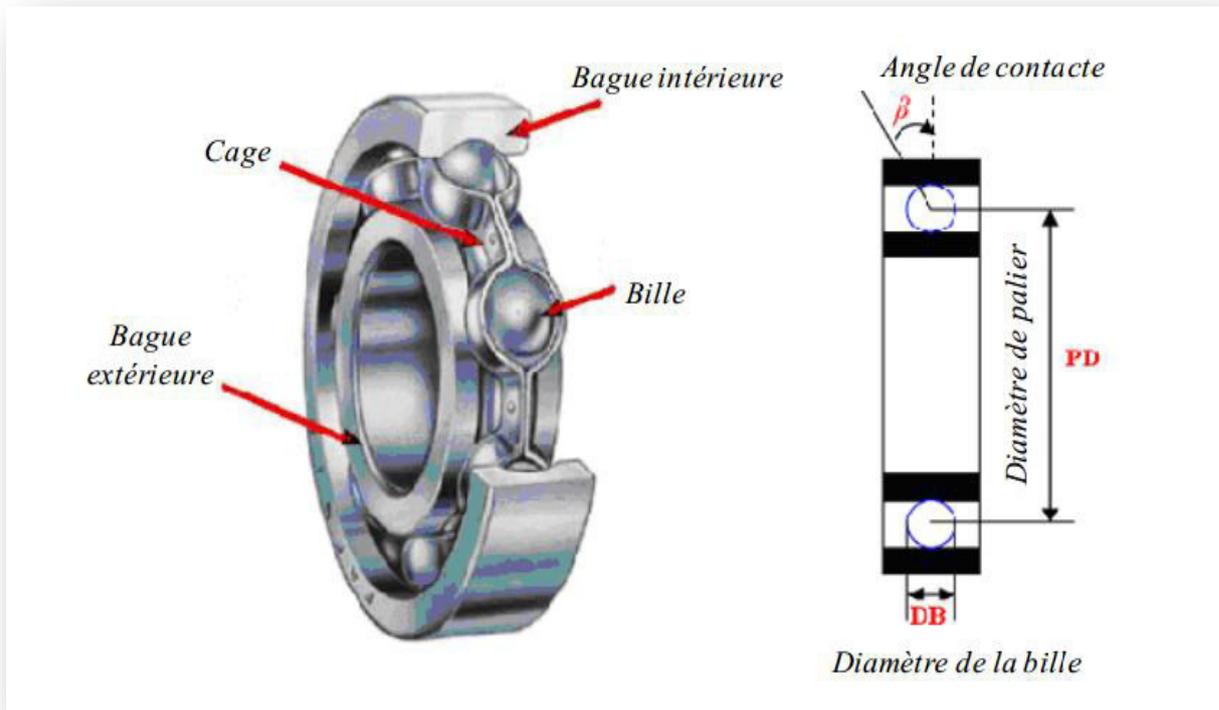


Figure 2.5 dimension de roulement à bille [16]

Le tableau 1.1 résume les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage.

Défauts	Signatures spectrales
Roulement	$f_{roul} =  f \pm kf_v , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos\beta \right)^2 \right]$ $f_{b.int} = \frac{nb}{2} f_r \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right]$ $f_{b.ext} = \frac{nb}{2} f_r \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right]$
Court-circuit statorique	$f_b = (1 \pm 2k s) f, k = 1, 2, 3, \dots$
Excentricités	$f_H =  (\lambda \pm (kR + n_d) \frac{(1-s)}{p}) f $ $f_{exc} =  f \pm kf_r , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barres rotoriques	$f_b = f \left[ \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right], n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots$

Tableau 2.1. Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage [nour].

Avec:

$P$  est le nombre de pair de pôles;  $f$  est la fréquence du réseau d'alimentation;  $g$  est le glissement.

$f_v$  est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit ( $fbille$ ,  $fb.int$  ou  $fb.ext$ ).

$nb$  est le nombre d'éléments roulants,  $BD$  le diamètre d'un élément roulant,  $PD$  la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, et  $\beta$  l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement et  $f_r$  est la fréquence de rotation du rotor.

### 2.3. Origines et causes des défauts

La majorité de ces défauts sont l'origine d'une combinaison de diverses contraintes agissant sur la machine, ce qui peut être classée en thermique, électrique, mécanique, environnemental et défauts de fabrication [2].

- **Thermique** : l'augmentation de la température au dessus de la température de fonctionnement normal de la machine entraîne la détérioration de l'isolant du bobinage au niveau du stator et également le rotor bobiné. Donc, par cet effet la durée de vie de l'isolant se raccourcit rapidement. Elle influe également sur le lubrifiant, dans les roulements, qui perd ses propriétés physiques et qui perturbe la rotation normale des billes dans la cage. Cette surcharge thermique peut se produire en raison des variations de tension appliquées, tension de phase déséquilibrée, ventilation obstruée, température ambiante plus élevée, démarrages répétitifs dans un court laps de temps, à des surcharges, etc... [2].
- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou des variations brutales et instantanées de cette tension, va conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut). Pour les roulements, il y a la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs qui cause les arcs électriques et cause le vieillissement rapide de ces derniers [2].
- **Mécanique** : les démarrages répétitifs ont pour conséquence d'augmenter la température dans les bobinages du stator et du rotor. Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne.

Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. L'entraînement des surcharges, les vibrations dues aux excentricités de l'arbre ou au mauvais ajustement des roulements, manque de ventilation, manque de lubrifiant ces effets influent négativement sur le fonctionnement normal de la machine [2].

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Les milieux poussiéreux influent également sur la lubrification des roulements ce qui provoquent leurs usures et corrosions et conduisent à leurs détériorations [2].
- **Défauts de fabrication** : les défauts de fabrication ont un effet néfaste sur le fonctionnement normal des machines. Ils peuvent être la conséquence de : Mauvaise soudure entre les barres et les anneaux, mauvais serrage, insuffisance baignade pour l'isolant, montage anormal des roulements ou des enroulements, moulage défectueux dans le cas de rotors injectés sous pression d'aluminium [2].

## 2.4. Définition et objectif du diagnostic

### 2.4.1. Définition

La définition du diagnostic selon la norme AFNOR et CEI stipule que : «Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test». Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic [12]:

- Observer les symptômes de la défaillance
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations

### 2.4.2. Objectif du diagnostic

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous allons tout d'abord définir ce que nous entendons par défaut, puis nous rappellerons les fonctions du diagnostic telles que la détection, la localisation, et l'identification des défauts [12].

### 2.4.3. Terminologies et concepts

Le **tableau .2.2** donne la définition de quelques termes utilisés dans le domaine de diagnostic.

Terme	Définitions
Une anomalie	Est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique
La panne	Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
Un défaut	Est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.
Une défaillance	Est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.
Une perturbation	Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.
Un résidu	Est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
Un symptôme	Est caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
La surveillance	Est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.
La sensibilité	Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.
La supervision	Est la surveillance d'un système physique et la prise de décision appropriée en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défauts.

**Tableau 2.2** Définition des termes

## **2.5. Méthode de diagnostic des défauts dans la machine**

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux [11].

### **2.4.1. Les méthodes de connaissances**

Dans la littérature spécialisée plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes sont présentées. Ces méthodes ne font pas appel au modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. En définitif, la seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones, et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Cependant, les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens [11].

### **2.4.2. Les méthodes de redondances analytiques**

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes: les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [11].

### **2.4.3. Les méthodes par l'analyse de signaux**

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques. La première étape dans cette approche concerne naturellement la modélisation des signaux. Il s'agira par la suite de les caractériser dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc. L'analyse de ces grandeurs quantifiables fidèlement attribuée aux signaux des défauts

reste la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts dans les machines électriques [11].

## **2.6. Application de l'analyse spectrale pour la détection des défauts rotoriques**

L'analyse du contenu spectral des signaux électriques (plus particulièrement les courants de ligne) et mécaniques (vibration) permet de dresser un diagnostic de l'état du fonctionnement de la machine asynchrone et de détecter des défauts à un stade précoce [13].

La surveillance par analyse spectrale consiste à représenter le signal mesuré dans l'espace des fréquences; cette opération se réalise mathématiquement en effectuant une transformée de Fourier. Le résultat est appelé Spectre fréquentiel. Chaque composant du spectre correspond à une fréquence caractéristique bien définie [13].

Les signaux accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être [13] :

- Les courants absorbés.
- Le flux magnétique.
- La tension du neutre.
- Le couple électromagnétique.
- La vitesse rotorique.

### **2.6.1. Détection des défauts rotoriques par l'analyse des courants statorique :**

L'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est l'une des techniques les plus utilisées pour le diagnostic des défauts. En effet, exigeant uniquement un seul capteur et permettant une détection en ligne des défauts, c'est-à-dire pendant le fonctionnement de la machine, la (MCSA) est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide. Cependant avec la multiplication des défauts, la (MCSA) peut devenir onéreuse par le fait que certains types de défauts peuvent produire des harmoniques similaires aux harmoniques du fonctionnement sain.

### **2.6.2. Détection des défauts rotoriques par l'analyse des flux magnétique :**

L'analyse des moteurs électriques par le suivi du flux magnétique permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux électriques, pouvant se produire dans la machine. En effet, tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator est reflété dans le spectre du flux d'entrefer. La mesure du flux peut être réalisée à partir des bobines exploratrices, placés soit à l'extérieur soit à l'intérieur de la

machine perpendiculairement à l'axe du rotor. Les bobines externes sont utilisées lorsque la machine est déjà en service.

### **2.6.3. Détection des défauts rotoriques par l'analyse du couple électromagnétique :**

La surveillance du couple électromagnétique des machines électriques peut également donner des informations sur l'état de la machine asynchrone. Malheureusement le couple électromagnétique n'est pas une quantité directement mesurable, de ce fait certains systèmes reconstruisent une image du couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesurés sur la machine. Reconstitue le couple électromagnétique à partir de deux des trois courants statoriques et par ajout de spires de flux dans ces deux phases (cela permet d'obtenir les forces électromotrices qui y sont induites) et en se basant sur ces signaux il analyse le couple électromagnétique d'une machine asynchrone présentant des portions d'anneaux cassés.

### **2.6.4. Détection des défauts rotoriques par l'analyse de la puissance instantanée**

Sachant que la quantité d'information donnée par la puissance instantanée d'une phase, qui n'est autre que le produit de la tension d'alimentation et du courant absorbé par le moteur, est plus importante que l'analyse du courant seul, plusieurs auteurs basent leurs méthodes de diagnostic sur l'identification de certains harmoniques dans le spectre de la puissance instantanée.

### **2.6.5. Détection des défauts rotoriques par l'analyse de la tension du neutre**

Comme pour le courant statorique, la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone peut être utilisée pour la détection des défauts de la machine. Cette technique a tout d'abord été appliquée dans le diagnostic des défauts d'enroulements statorique.

## **2.7. Les techniques de l'analyse de signal dans le diagnostic**

### **2.7.1. La transformée de Fourier**

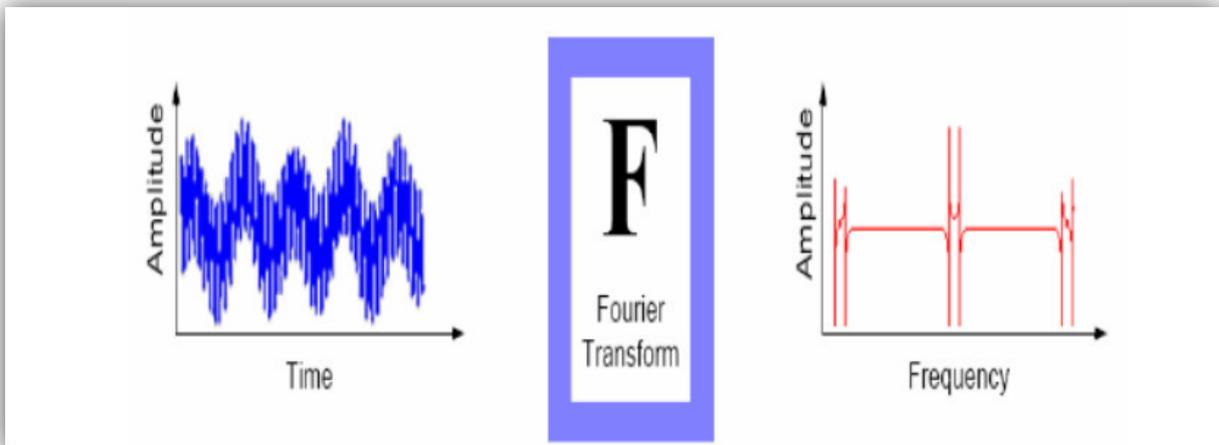
L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple [6].

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent [6].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad 3.1$$

Cependant, l'analyse de Fourier, de par sa nature, montre assez vite ses limitations: Son calcul nécessite la connaissance de toute l'histoire temporelle du signal ( équ 3.1, transformation de Fourier, équ (3.2) transformation de Fourier inverse), de plus, dans une transformée de Fourier l'information sur le temps est présente (la transformée inverse est donc possible), mais elle est cachée dans les phases: elle est en pratique impossible à extraire. On en est donc réduit à étudier un signal soit en fonction du temps soit en fonction des fréquences qu'il contient sans possibilité de conjuguer les deux analyses [6].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad 3.2$$



**Figure 2.6.** Principe de la Transformée de Fourier

Malgré l'introduction et les succès de la transformée de Fourier rapide (FFT), est donc par définition peu adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires. Hors, ces signaux se rencontrent beaucoup plus souvent que les signaux stationnaires [6].

## 2.7.2. La transformée en ondelettes

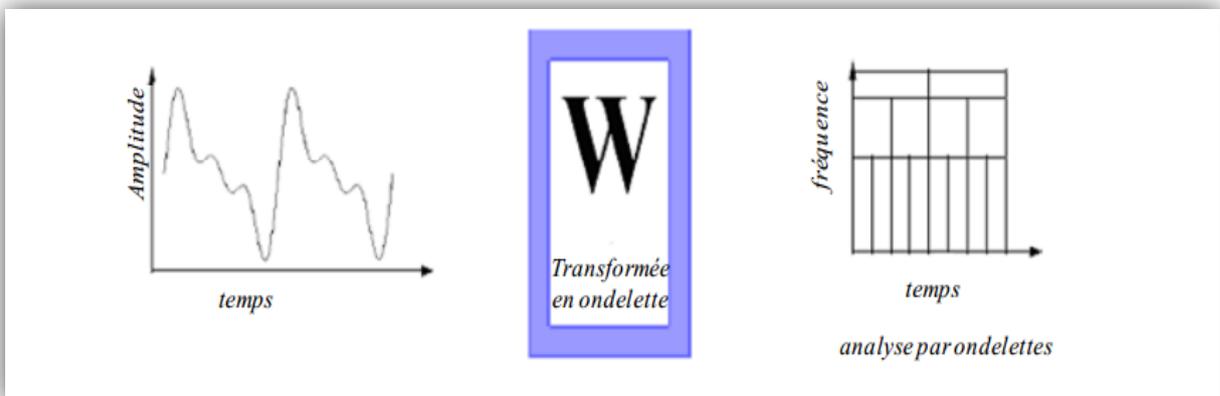
### 2.7.2.1. Historique

La transformée en ondelettes (WT) est apparue en géophysique au début des années 1980 pour l'analyse des signaux sismique, et a été formalisée plus tard par Grossmann et Morlet

(1984) et Goupillaud. C'est au sein de ces dernières communautés que des développements théoriques et appliqués majeurs ont eu lieu ces quinze dernières années. Des avancées significatives ont notamment été faites par Meyer, Mallat, Daubechies, Chui, Wornell et Holschneider. Ces avancées ont alors influencé d'autres domaines de recherche, dont en particulier, des applications pour la compréhension des processus géophysiques. Ces interactions entre développement et application favorisent encore aujourd'hui l'évolution rapide de l'outil « ondelettes » [14].

### 2.7.2.2. Type de la transformée en ondelette

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulière. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. 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 [10].



**Figure 2.7.** Représentation temporelle vers ondelettes

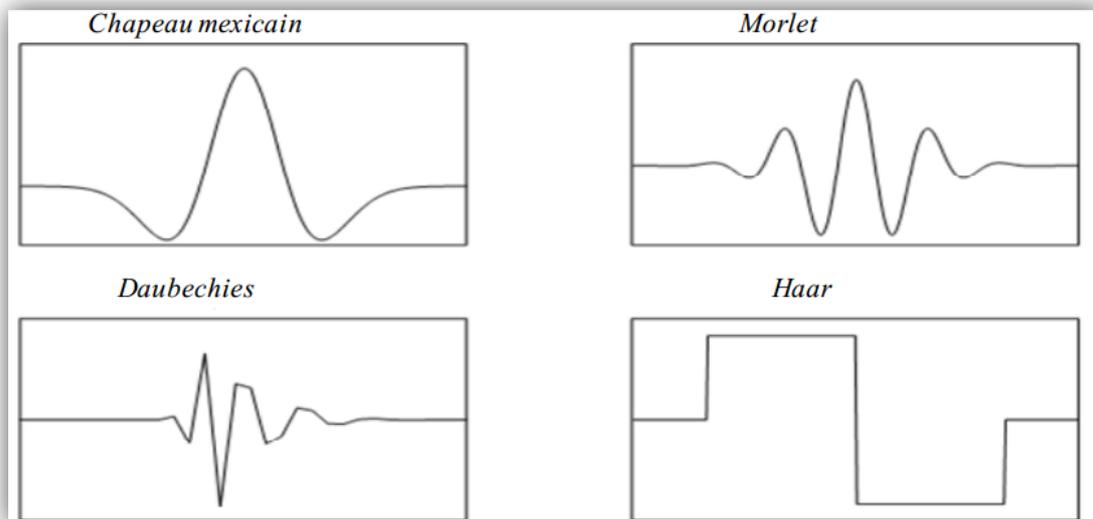
#### 2.7.2.2.1. Transformée en ondelettes continue (TOC)

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' à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle.

des signaux analysés. Le tableau (2.3) contient les familles les plus usuelles:

Nom des familles d'ondelettes	Abréviation 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

**Tableau 2.3:** Familles d'ondelettes



**Figure 2.8.** Quelques formes d'ondelettes usuelles

#### 2.7.2.2.2.. 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  $a = 2^i$ . 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 [15].

### **2.7.3. 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 [15] :

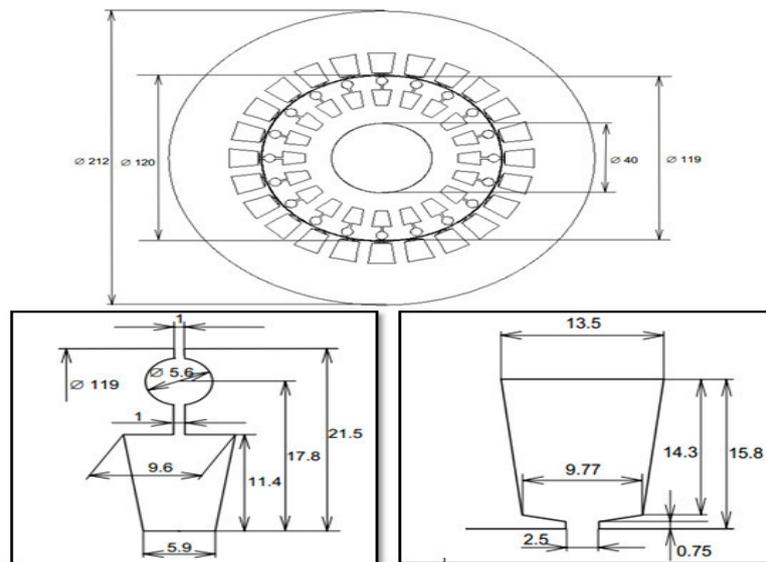
- ✓ La résolution en fréquence de la transformée dépend du facteur de dilatation par le principe de Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.
- ✓ Pour des signaux physiques présentant des variations très rapides et des discontinuités, l'analyse en ondelettes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

### 3. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une application transformée en ondelettes discrète sur le courant statorique (à vide et en charge), nous donnons un exemple pour l'application transformée de fourier sur le courant statorique dans de défaut casser de barre.

#### 3.1. Dimensions géométriques et caractéristique de la MAS

Les principales dimensions de la machine asynchrone étudiée sont données à la figure III.I



**Figure 3.1** Les dimensions de la MAS

Les caractéristiques de la machine asynchrone à cage étudiée sont donnée au **tableau 3.1**

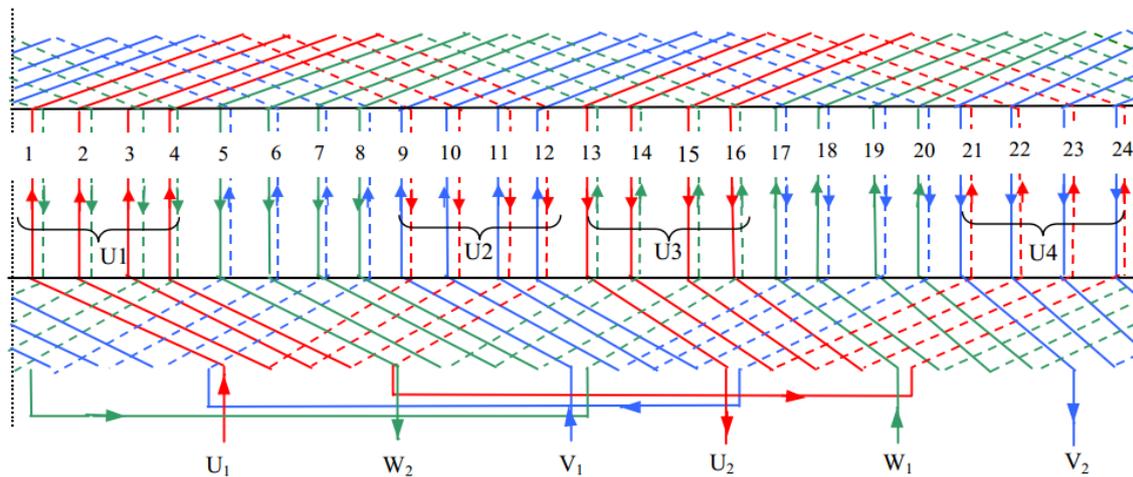
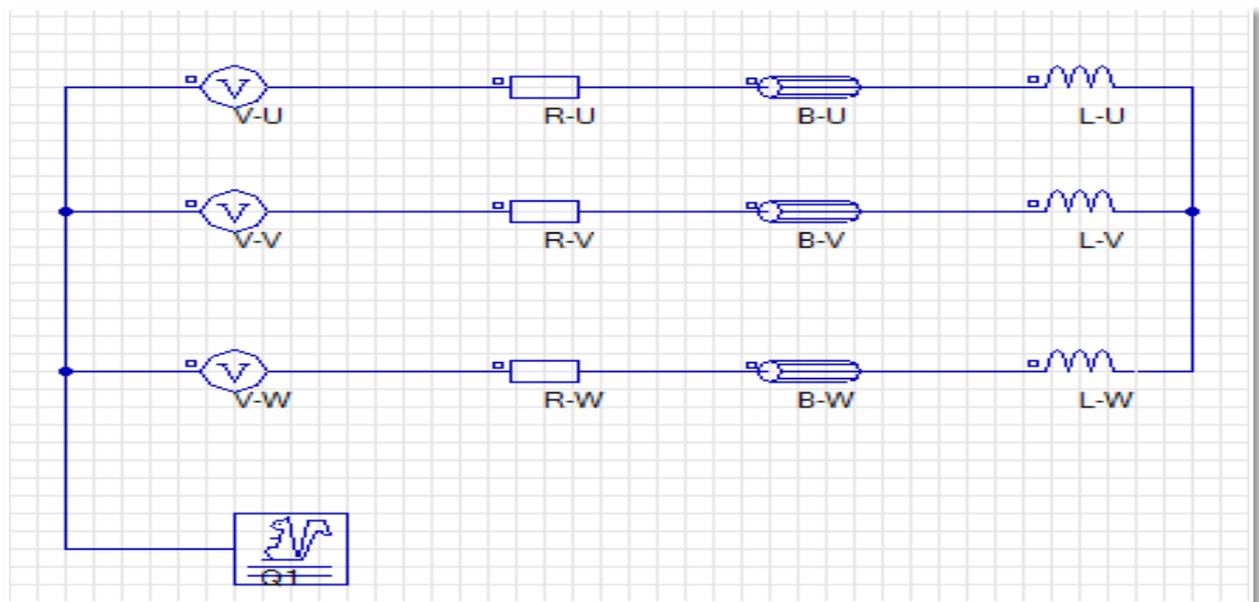
Parameter	Valeurs
Puissance	7.5 KW
Tension	380V
Fréquence	50 Hz
Vitesse nominale	2918 tr/min
Nombre de poles	2 pole
Longueur du paquet de toles	125 mm
Nombre d'encoche statorique	24
Nombre de spires par phase	208
Connexion	Y
Diamètre extérieur statorique	212 mm
Diamètre intérieur statorique	120 mm
Résistance par phase	0.9 $\Omega$
Nombre de barre	20
Diamètre extérieur rotorique	119 mm

Diamètre intérieur rotorique	40 mm
Epaisseur de l'entrefer	1mm

**Tableau 3.1** les caracteristiques de la machine

### 3.2. Circuit électrique

La bobinage dans les encoches statoriques est donnée à la figure 3.2

**Figure 3.2** Bobinage statorique**Figure 3.3** Circuit électrique de la MAS dans logiciel flux 2D

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écuriel de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotoriques, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes) [8].

V-U, V-V et V-W : les sources de tension d'alimentation

B-U, B-V et B-W : les bobinages statoriques.

R-U, R-V et R-W : les résistances de chute de tension dans le réseau.

L-U, L-V et L-W : les inductances de fuite des têtes de bobines, les valeurs sont calculées analytiquement

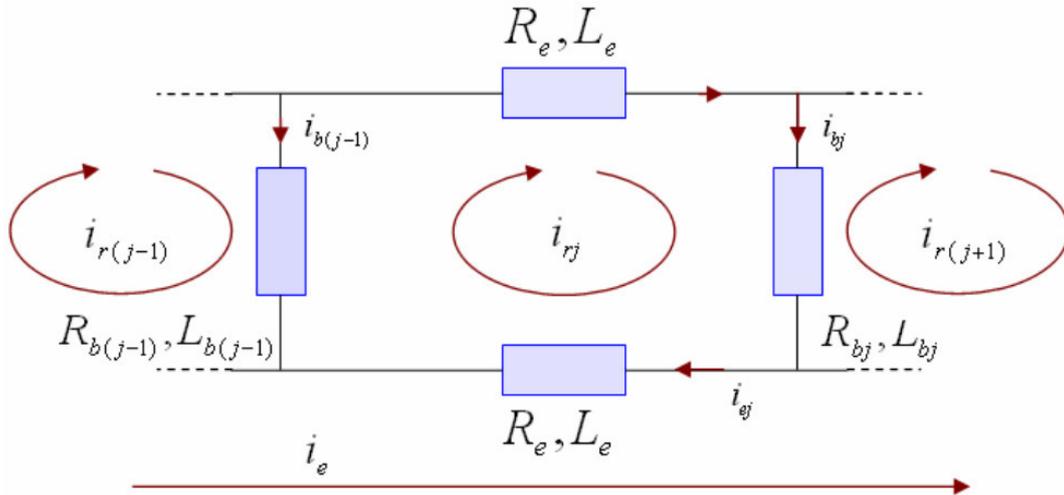


Figure 3.4 Circuit électrique équivalent de la cage rotorique

### 3.3. Matériau utilisé

- **Stator** : contient une culasse qui est définie par un matériau magnétique caractérisé par une courbe d'aimantation  $B(H)$  (voir figure II.2), et 24 encoches statoriques qui sont définies par un matériau non magnétique d'une perméabilité magnétique égale à 1
- **Entrefer** : d'épaisseur égale à 0.5 mm, sa perméabilité magnétique est égale à 1.
- **Rotor** : contient un noyau ferromagnétique caractérisé par une courbe d'aimantation  $B(H)$ , et 20 barres d'aluminium, donc la résistivité de ce dernier sera utilisée.

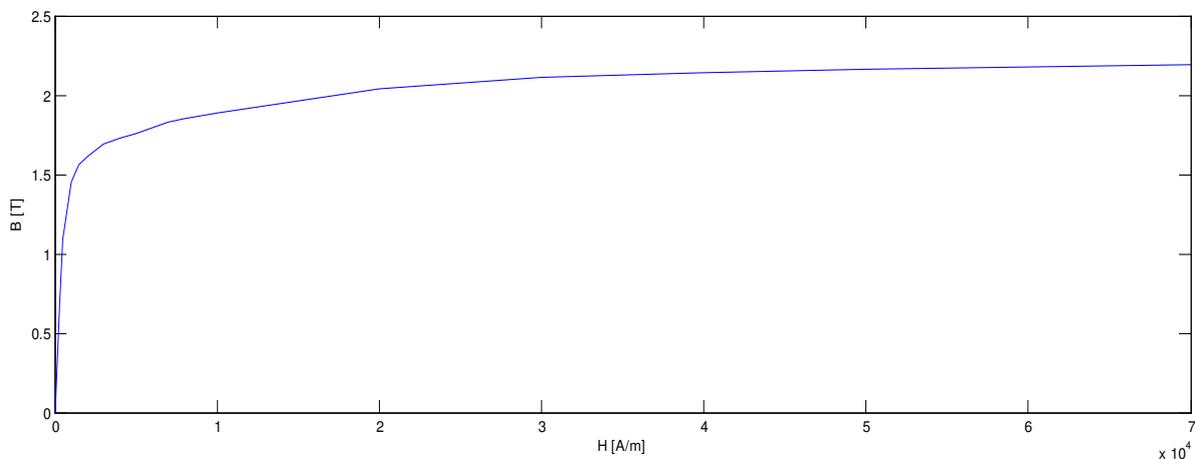
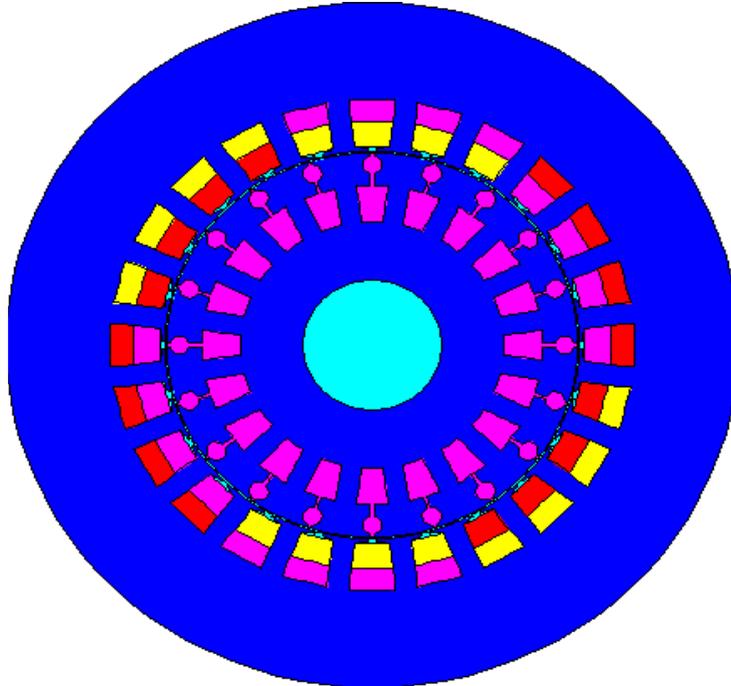


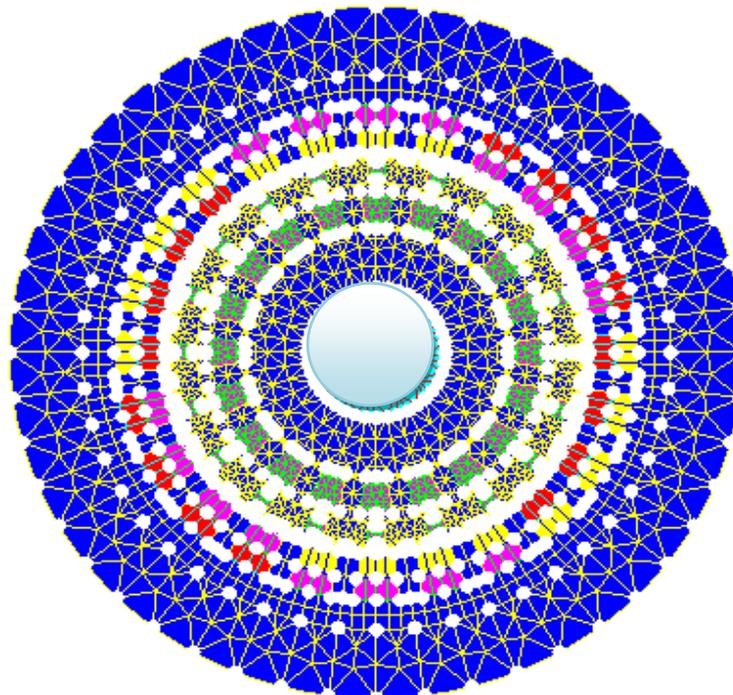
Figure 3.5 Courbe de magnétisation de fer

### 3.4. Définition et maillage de la structure d'une MAS

Avant de modéliser la machine sans défauts en 2D, nous mènerons une étude préliminaire sur le fonctionnement de la machine (sain).



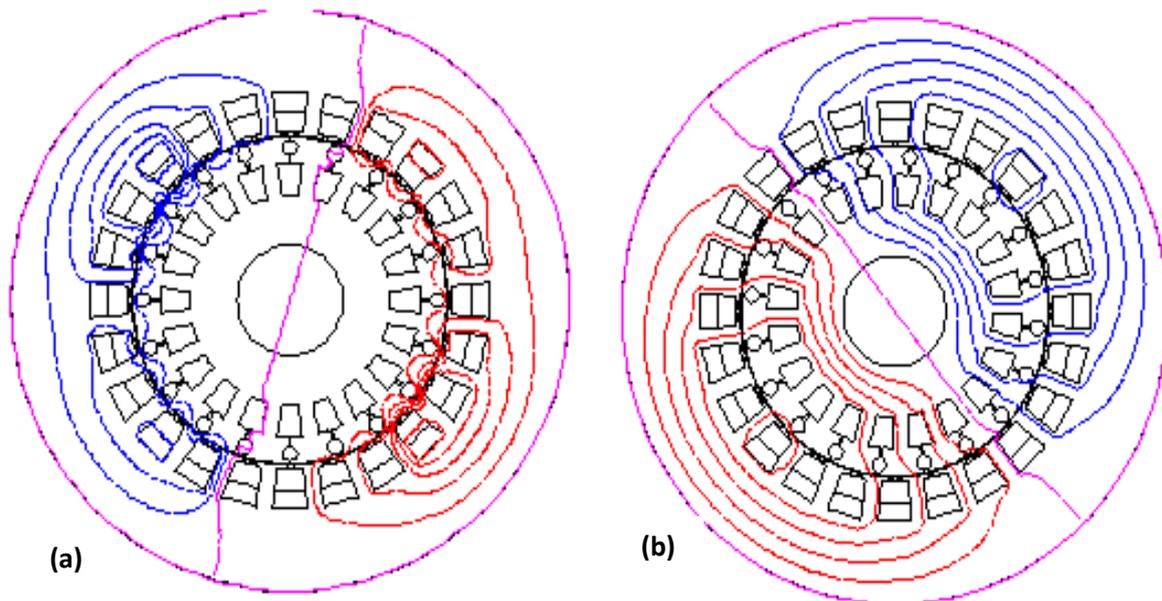
**Figure 3.6** Circuit magnétique de la MAS



**Figure 3.7** Le maillage de la MAS

### 3.5. Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

#### 3.5.1. La machine asynchrone à vide



Isovalues Results	
Quantity : Equi flux Weber	
Time (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Line / Value	
1 /	-164,95003E-6
2 /	-131,96003E-6
3 /	-98,97002E-6
4 /	-65,98001E-6
5 /	-32,99001E-6
6 /	0
7 /	32,99001E-6
8 /	65,98001E-6
9 /	98,97002E-6
10 /	131,96003E-6
11 /	164,95003E-6

Isovalues Results	
Quantity : Equi flux Weber	
Time (s.) : 4,8075 Pos (deg): 84,396E3	
Line / Value	
1 /	-4,75345E-3
2 /	-3,80276E-3
3 /	-2,85207E-3
4 /	-1,90138E-3
5 /	-950,68949E-6
6 /	0
7 /	950,68995E-6
8 /	1,90138E-3
9 /	2,85207E-3
10 /	3,80276E-3
11 /	4,75345E-3

**Figure 3.8** La distribution des lignes du champ magnétique à vide en transitoire(a) et permanent(b)

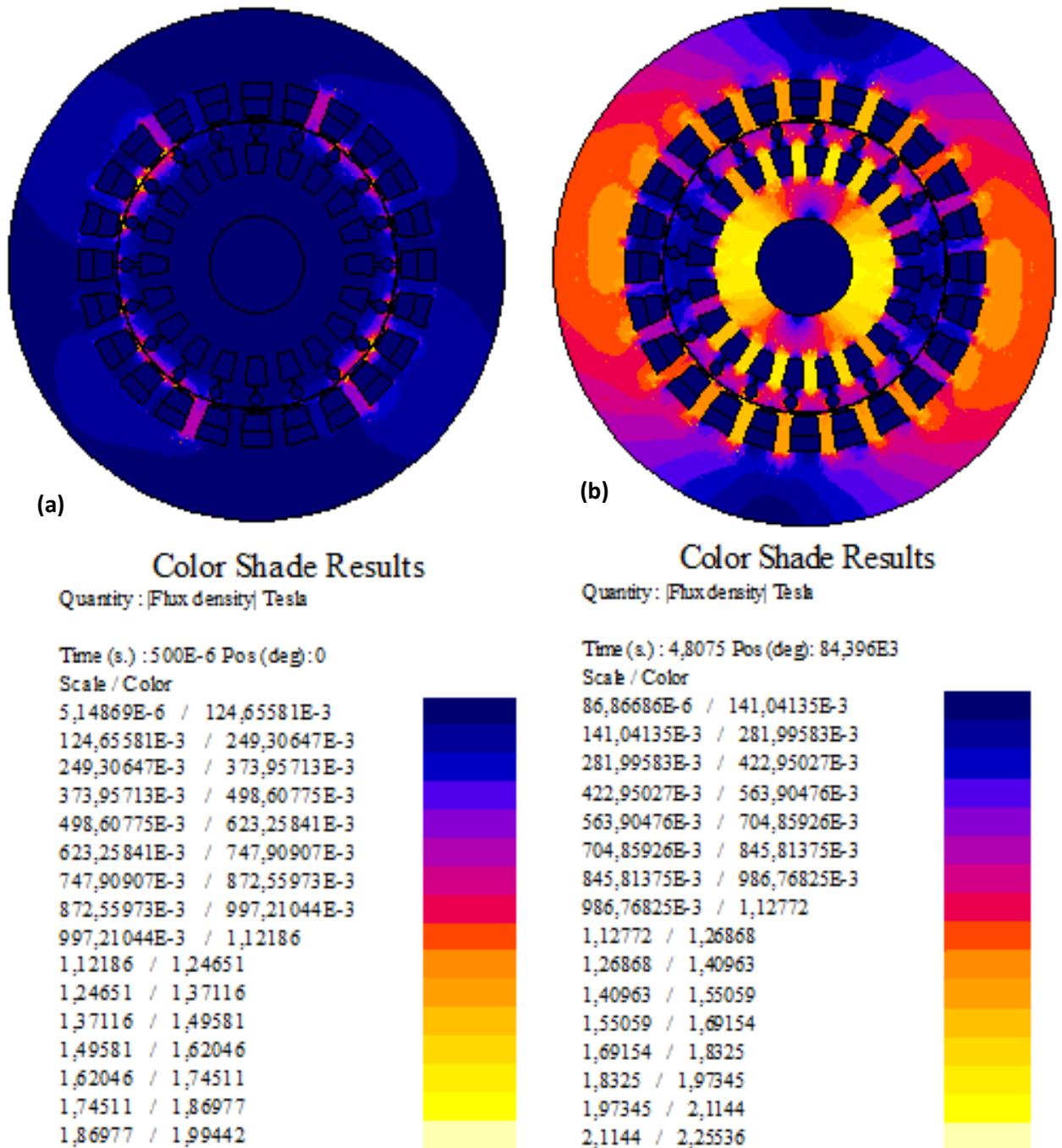
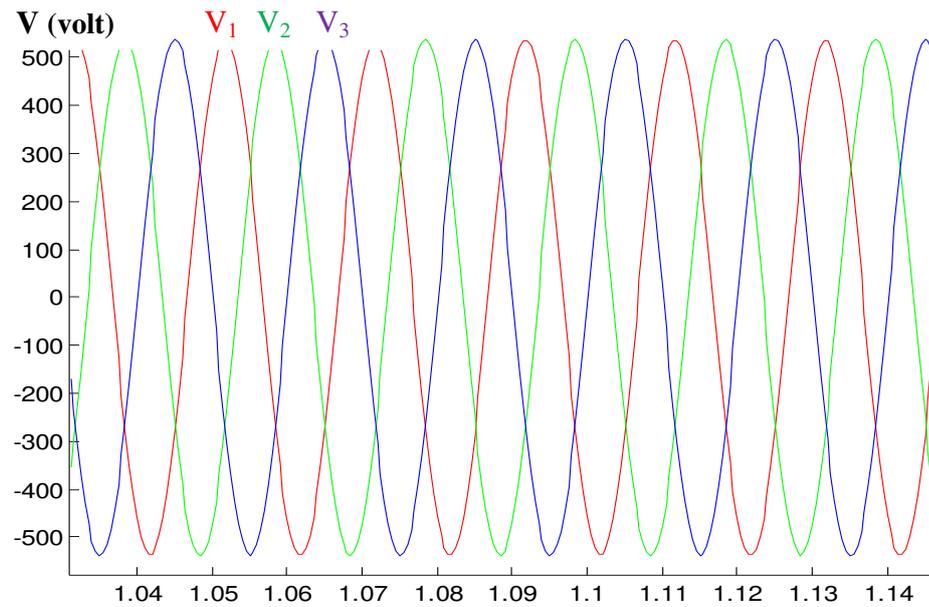
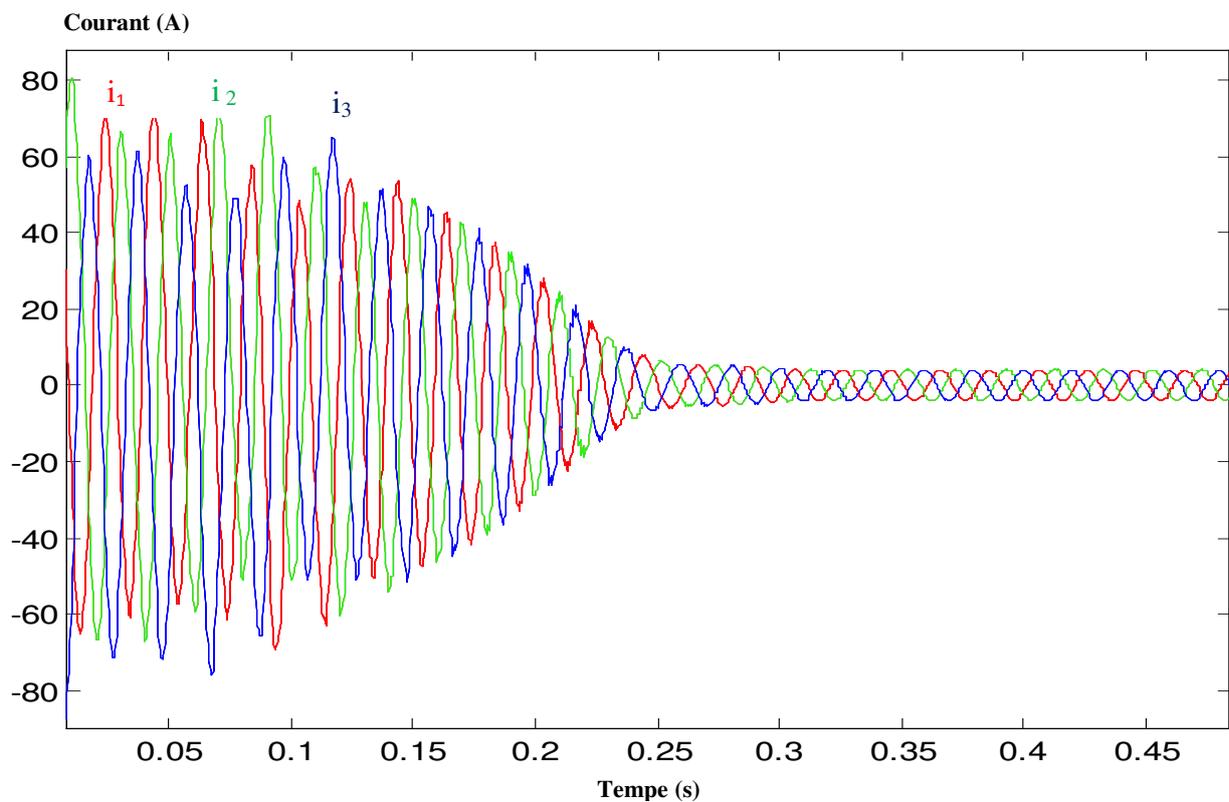


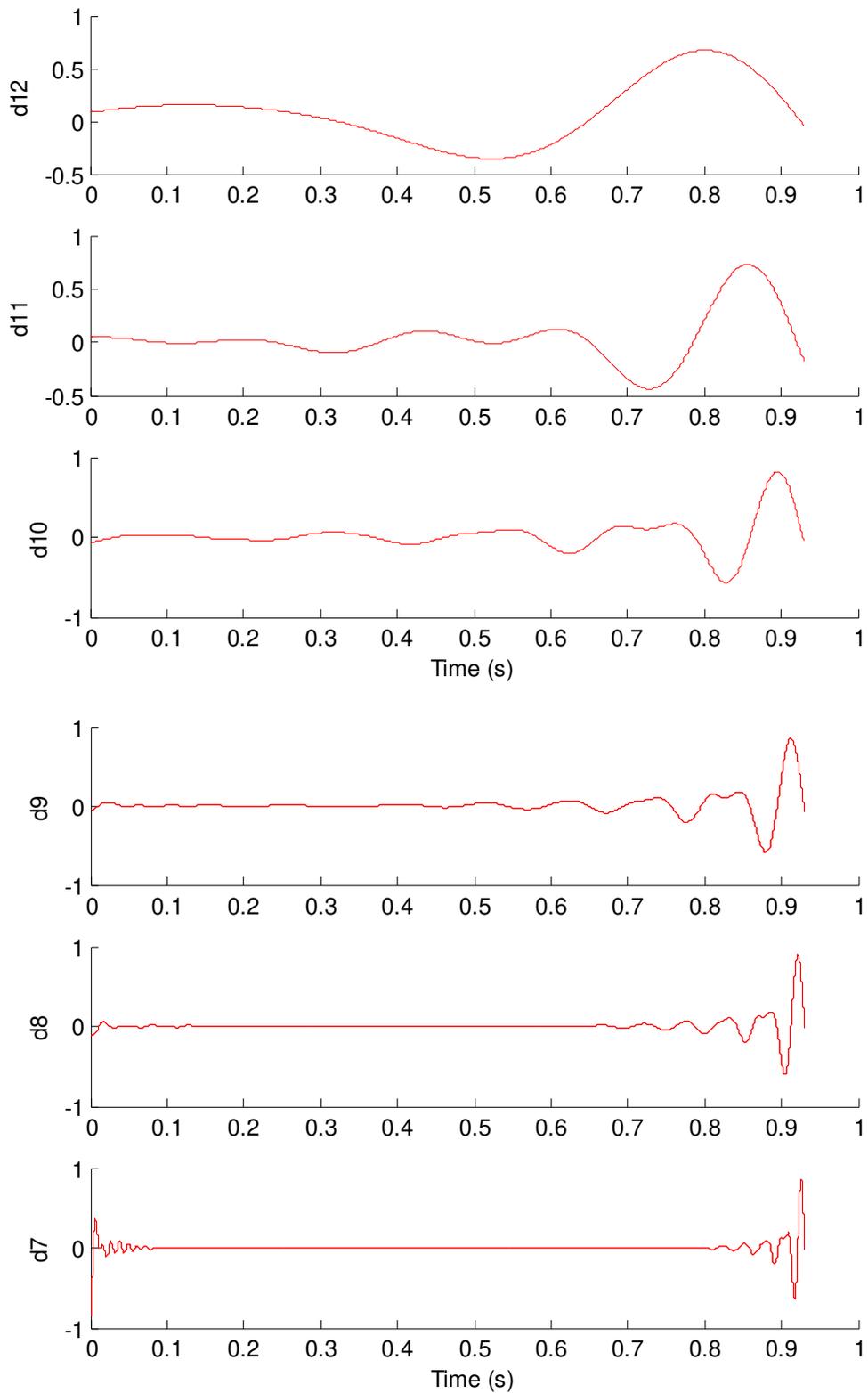
Figure 3.9 Induction magnétique à vide en régime transitoire(a) et permanent(b)



**Figure 3.10** Les tensions statoriques



**Figure 3.11** Les courants statoriques à vide  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$

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

**Figure 3.12** Signature de la courant  $i_1$  obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire à vide pour l'état sain

3.5.1.2. Analyse par la transformée de Fourier rapide (TFR)

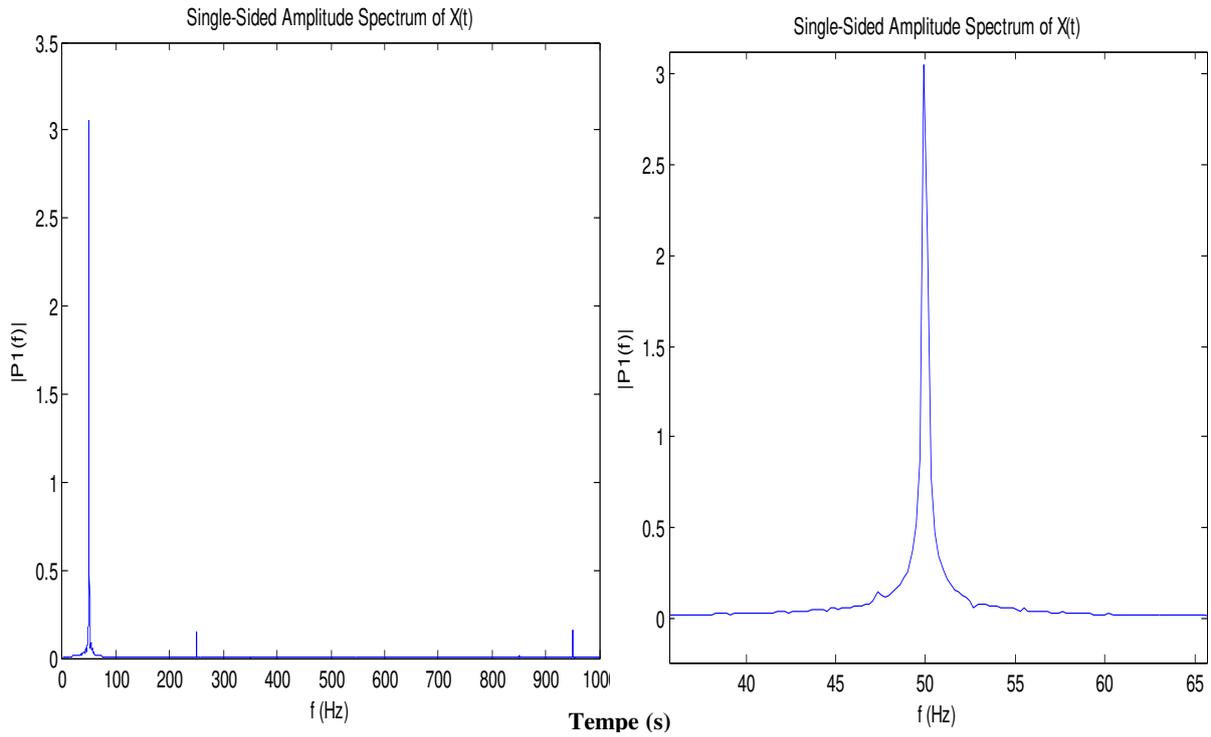


figure 3.13 Spectre (avec zoom) du courant statorique à l'état sain

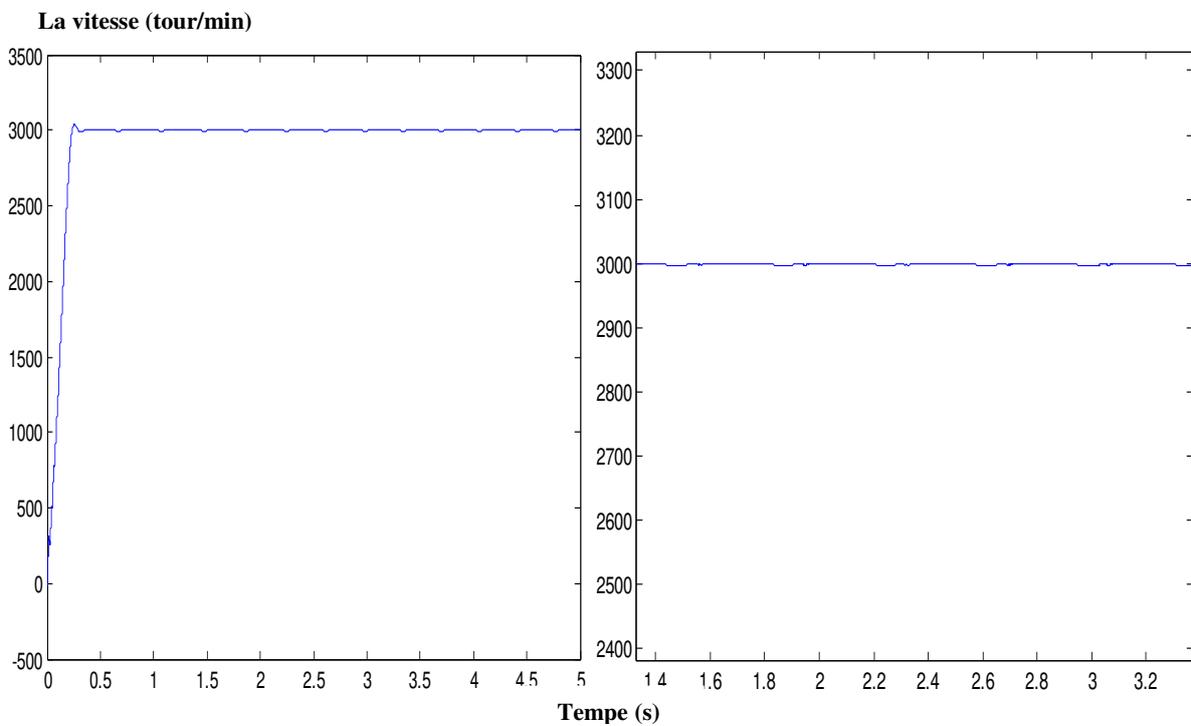
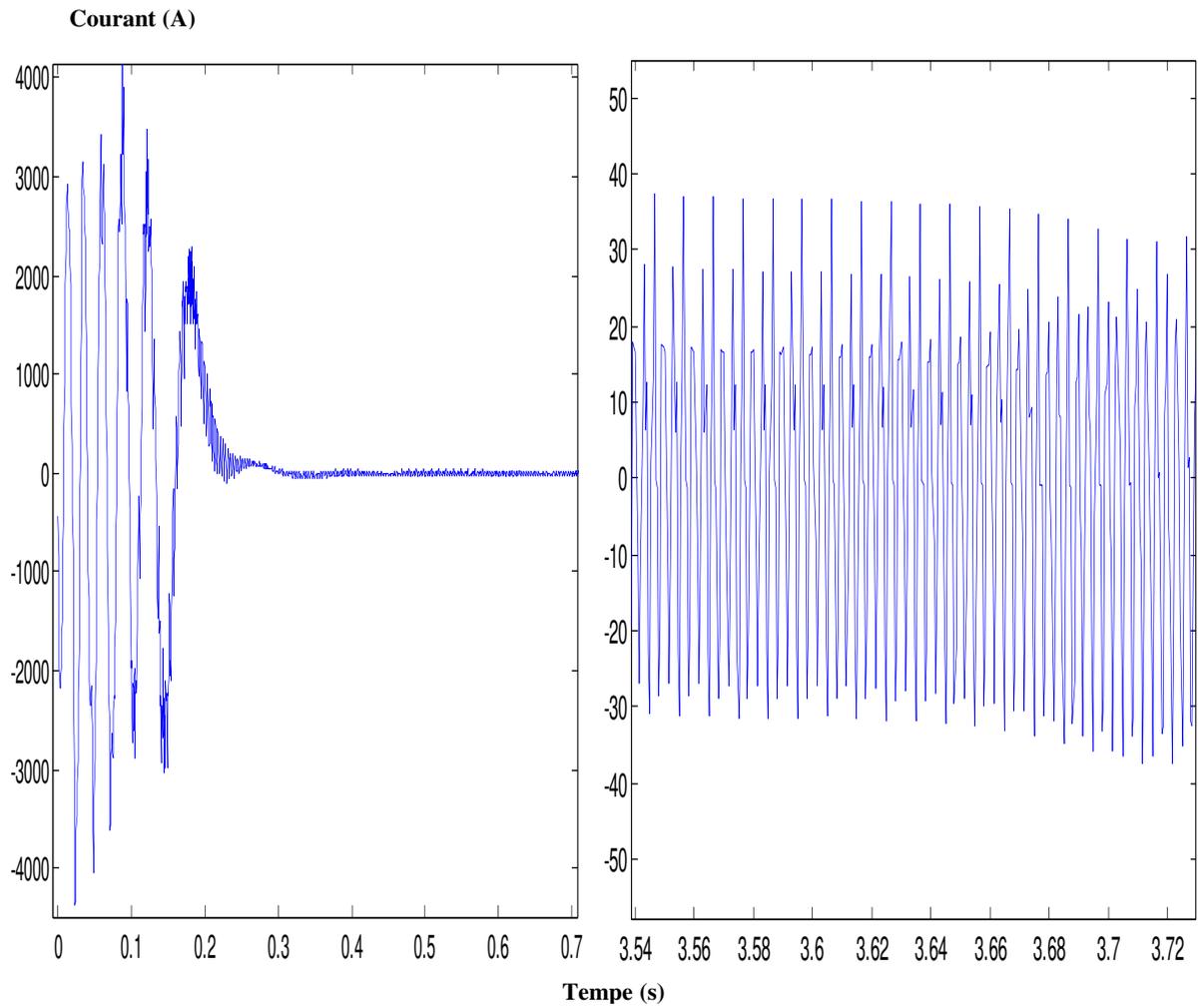
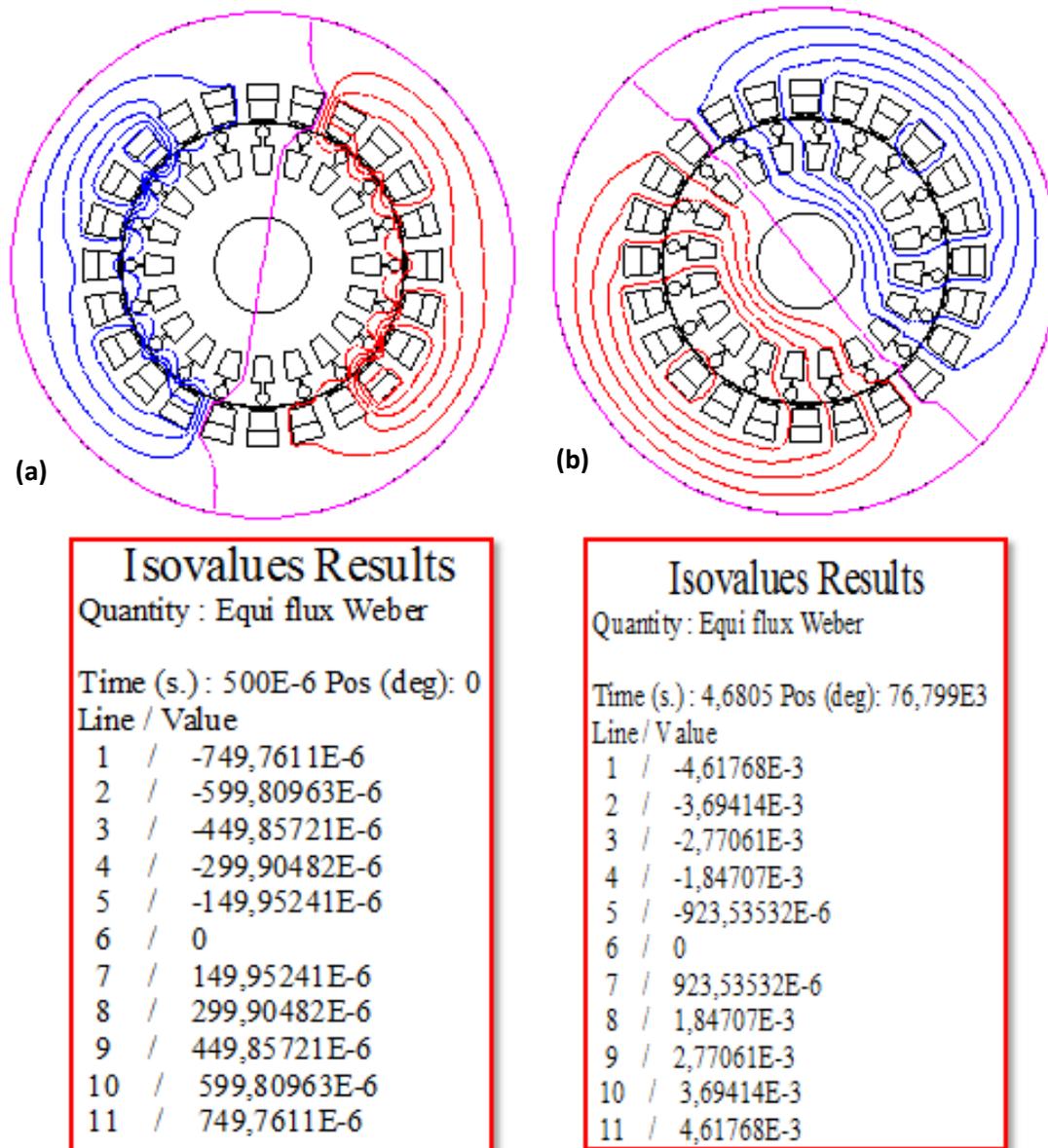


Figure 3.14 Vitesse de rotation à vide avec le zoom

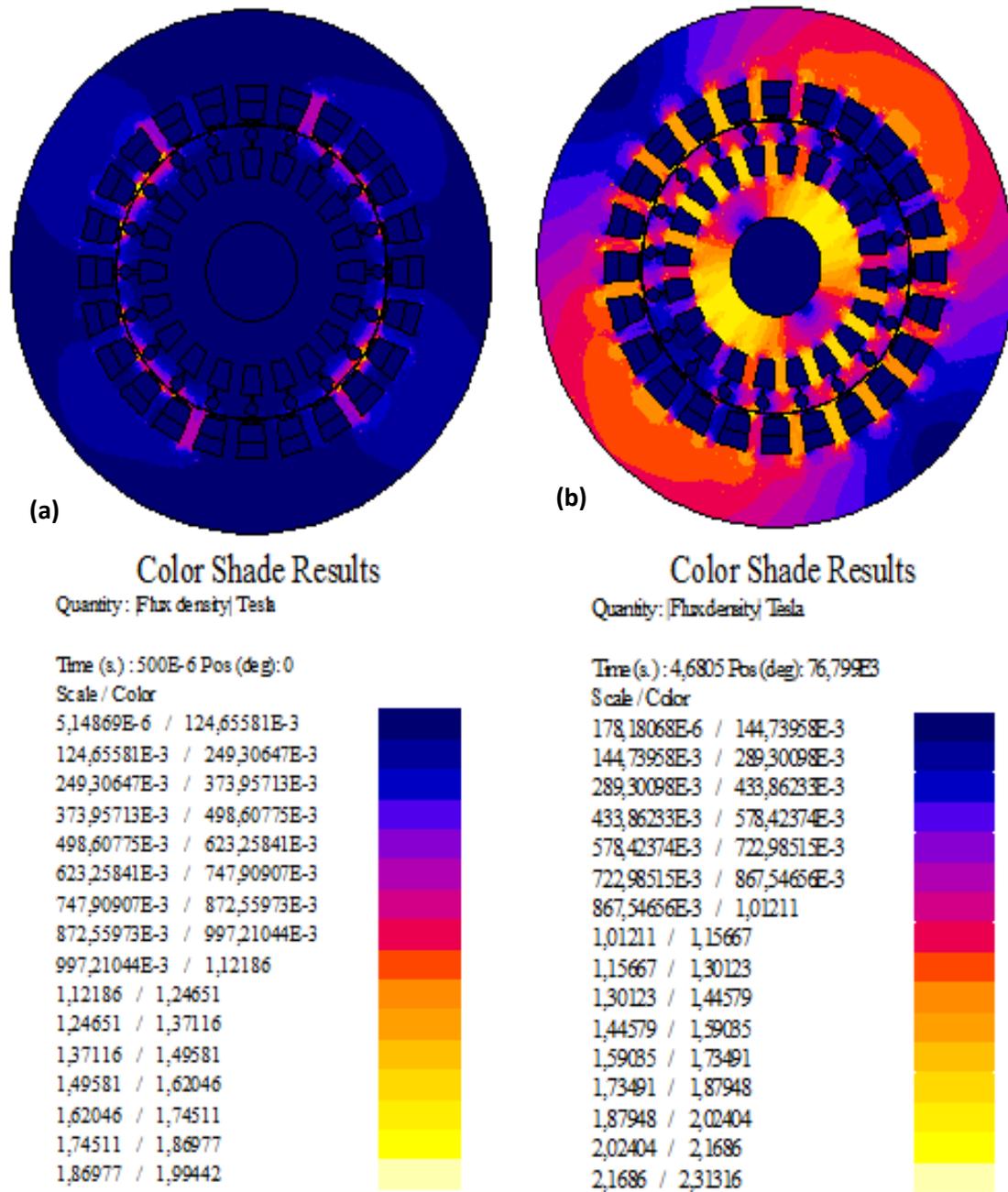


**Fig3.15** Le courant dans la barre rotorique 1 à vide

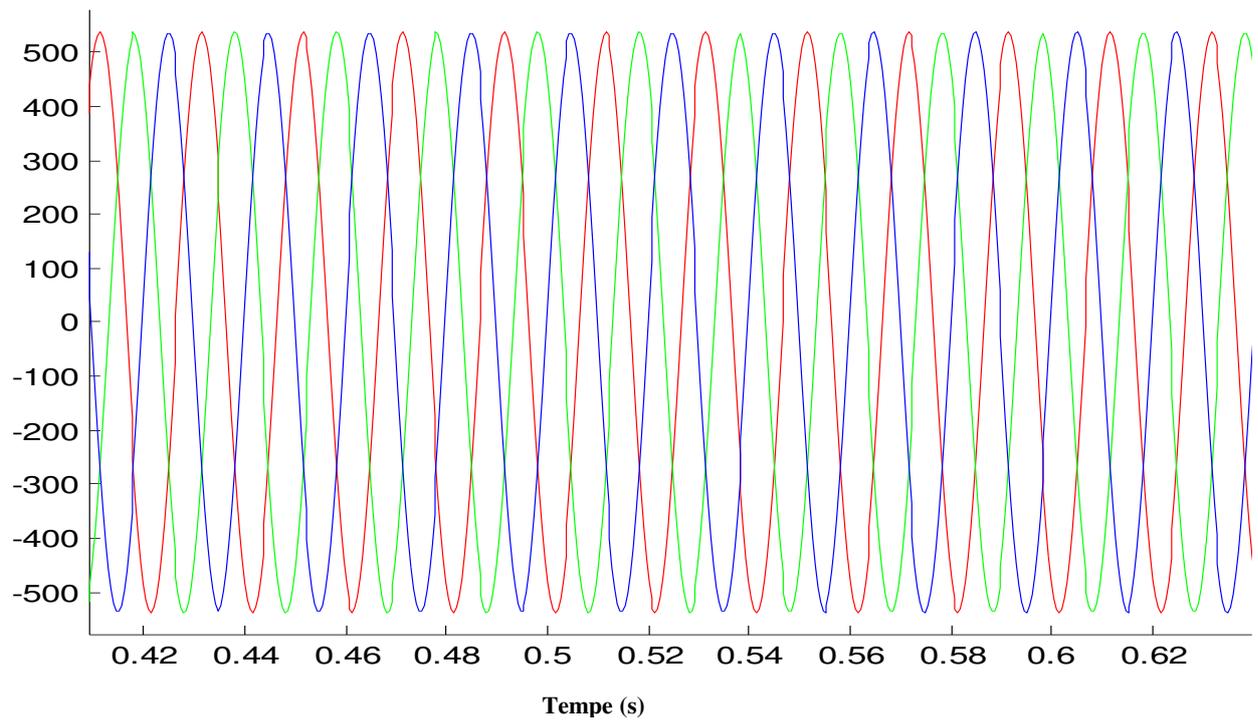
3.5.2. La machine asynchrone en charge



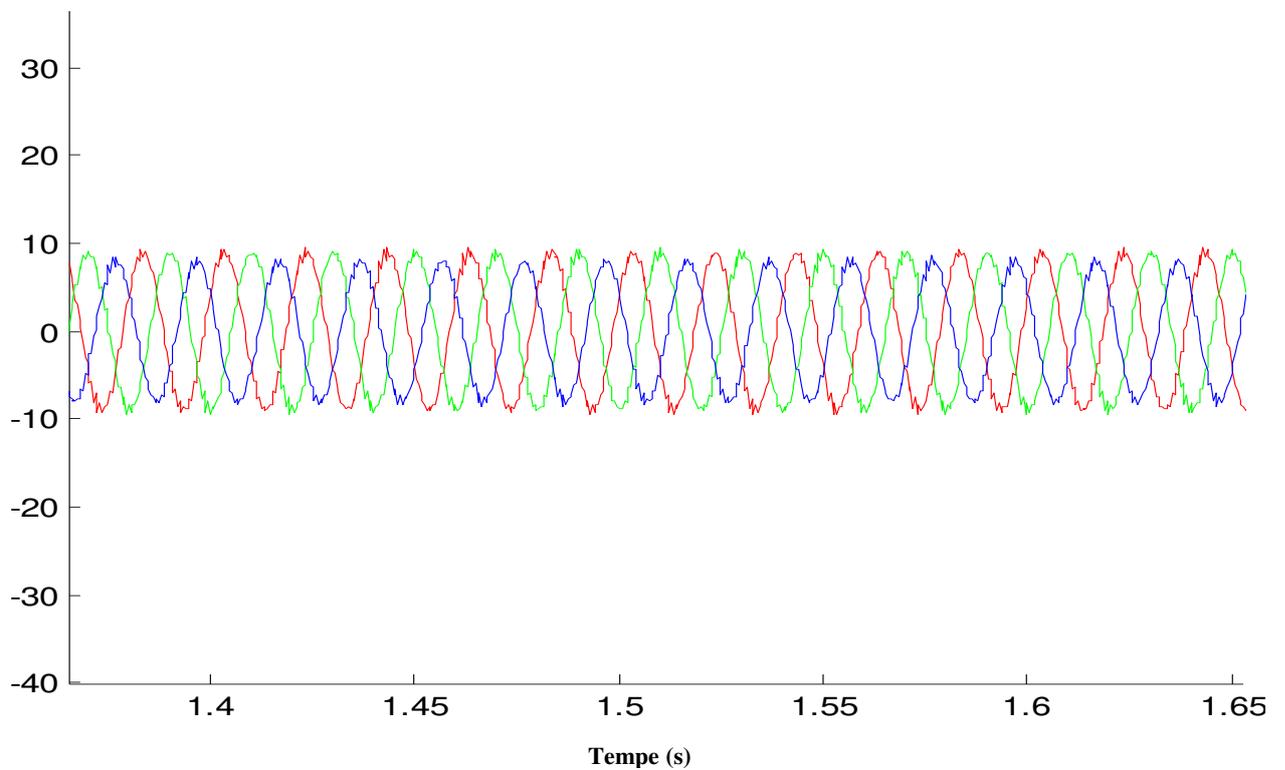
**Figure 3.16** La distribution des lignes du champ magnétique en charge en régime transitoire(a) et permanent(b)



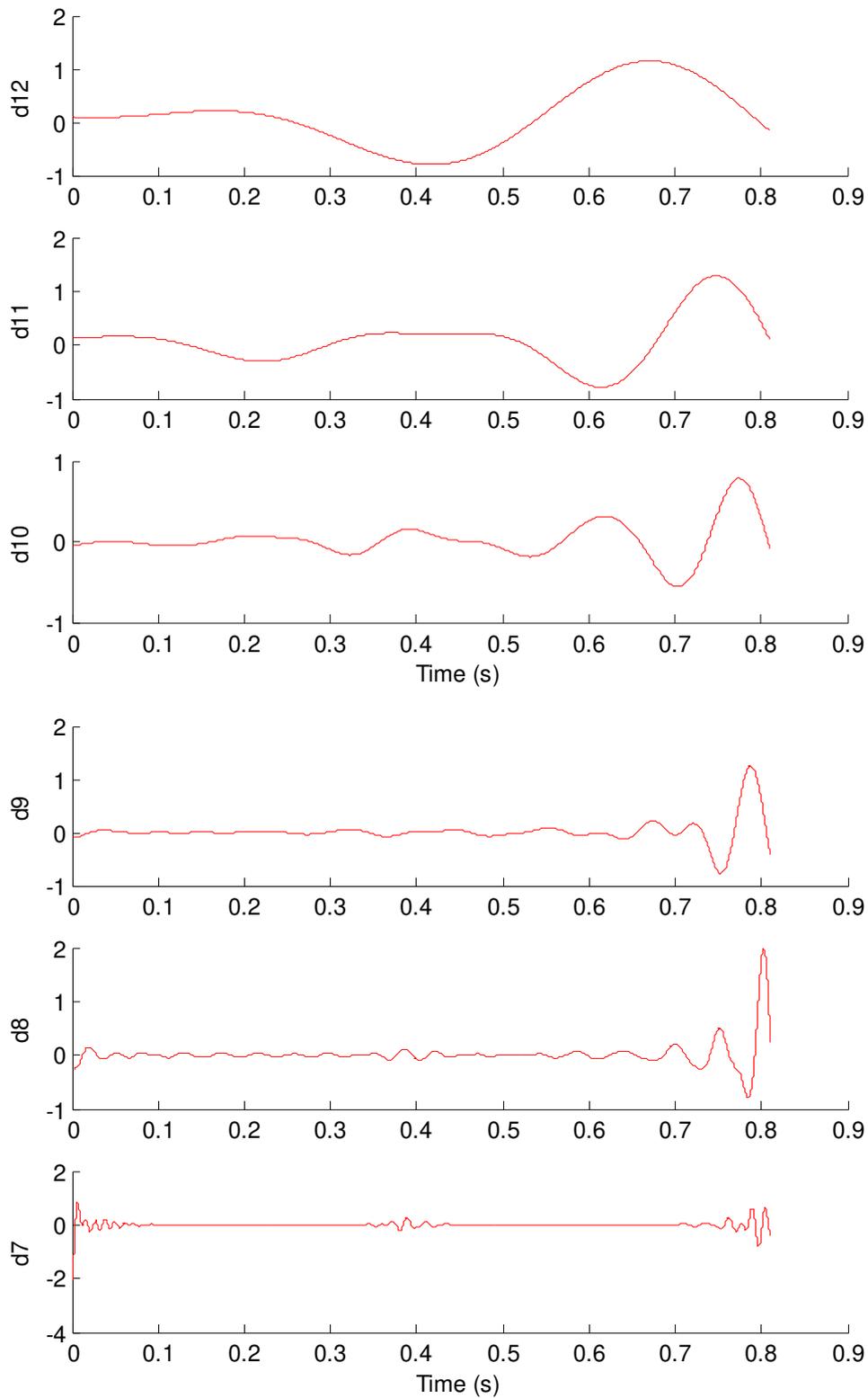
**Figure 3.17** Induction magnétique en charge en régime transitoire(a) et permanent(b)



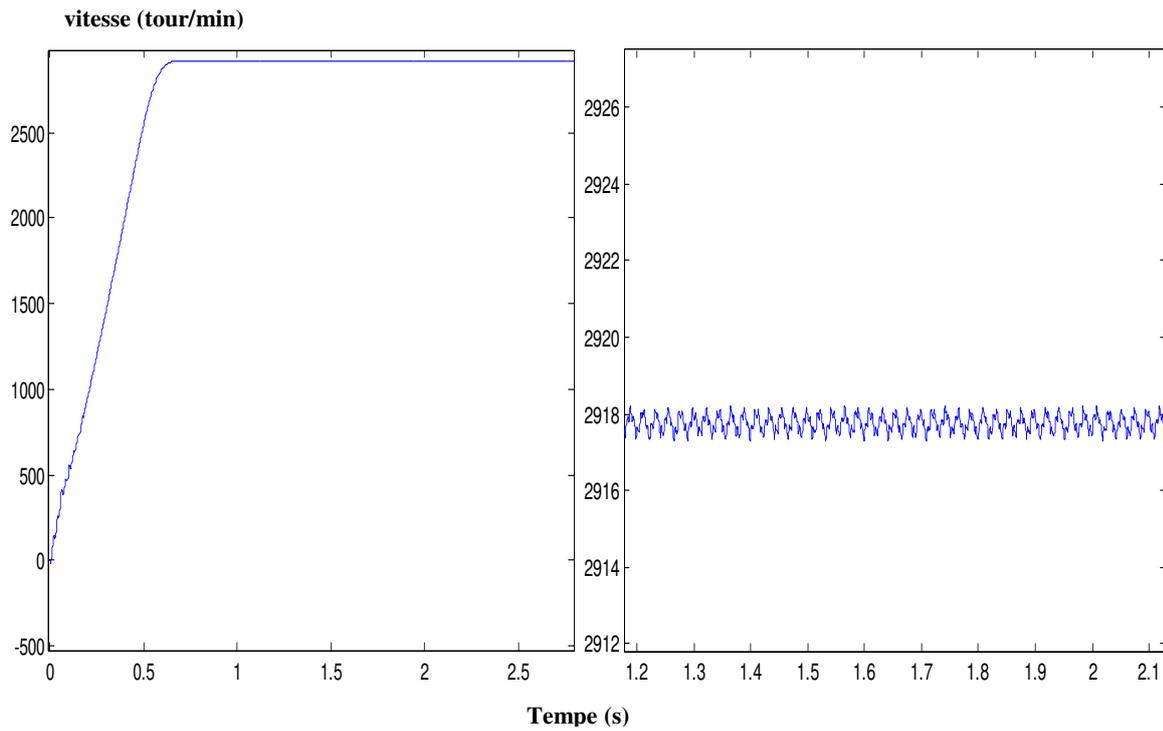
**Figure 3.18** La tension statorique en charge



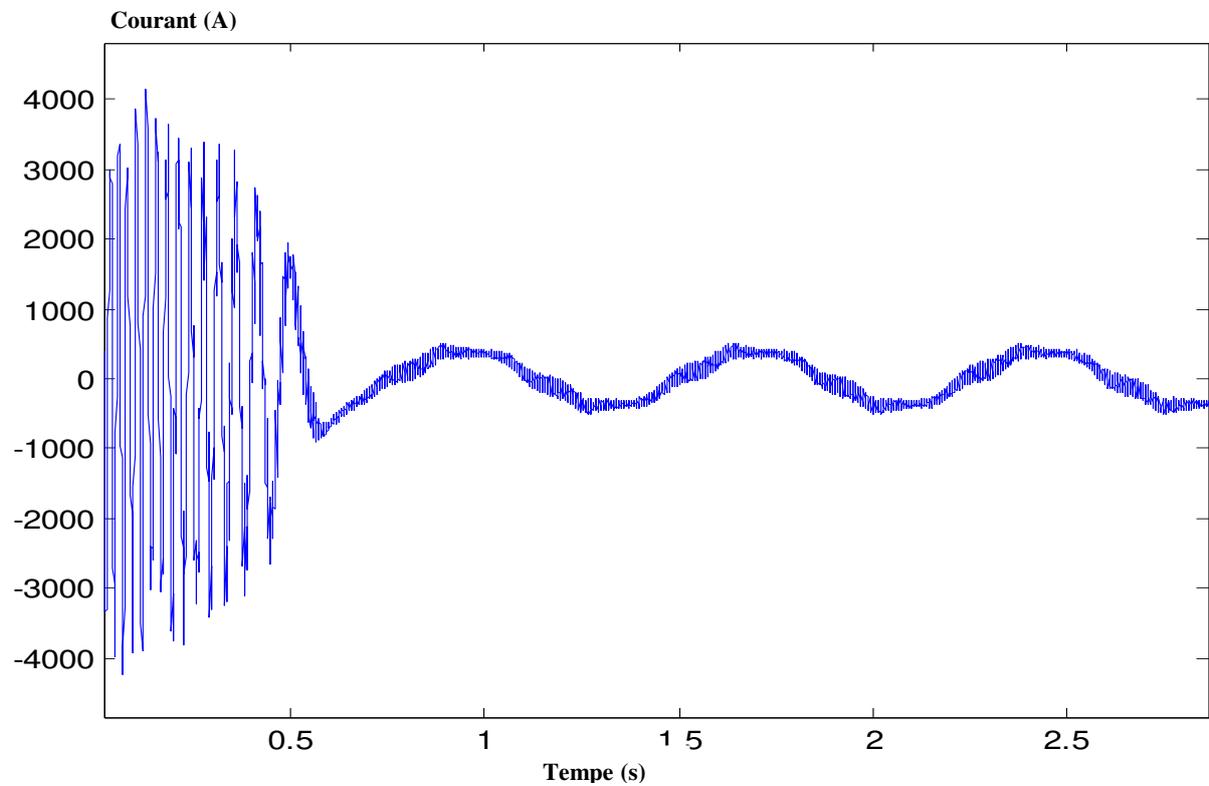
**Figure 3.19** Le courant statorique en charge

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

**Figure 3.20** Signature de la courant statoriques obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge à l'état sain



**Figure 3.21** Vitesse de rotation en charge avec le zoom



**Figure 3.22** Le courant dans la barre rotorique 1 en charge

## 4. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des simulations du comportement de la MASY, ces résultats sont obtenus à partir de la simulation du comportement électromagnétique et mécanique de la MASY. La modélisation est obtenue à partir du logiciel FLUX-2D où nous adoptons une simulation bidimensionnel de la MASY. Dans les résultats présentés, nous présentons le comportement de la MASY saine et les résultats de la MASY ayant un défaut bien précis dans le but de voir l'influence du défaut sur le comportement de la MASY sur le spectre de certains grandeurs, électrique, magnétique voir mécanique où la méthode des ondelettes est exploitée. Ceci permet de prévoir le type de défaut provoqué à partir de l'analyse spectrale du signal de ces grandeurs.

### 4.1. Modélisation d'un défaut de la MASY dû à un Court-circuit

Dans ce paragraphe nous présentons les résultats des simulations de la MASY où dans un premier temps nous présentons un défaut avec un court-circuit. La méthode des ondelettes sera présentée. Selon les résultats présentés ainsi que la méthode des ondelette employé, nous pouvons dire qu'un court-circuit provoque l'augmentation de l'amplitude des courants. Concernant la dynamique de la MASY, celle-ci est considérablement changée, ainsi que la valeur de la vitesse atteinte au régime permanent où elle à décroît.

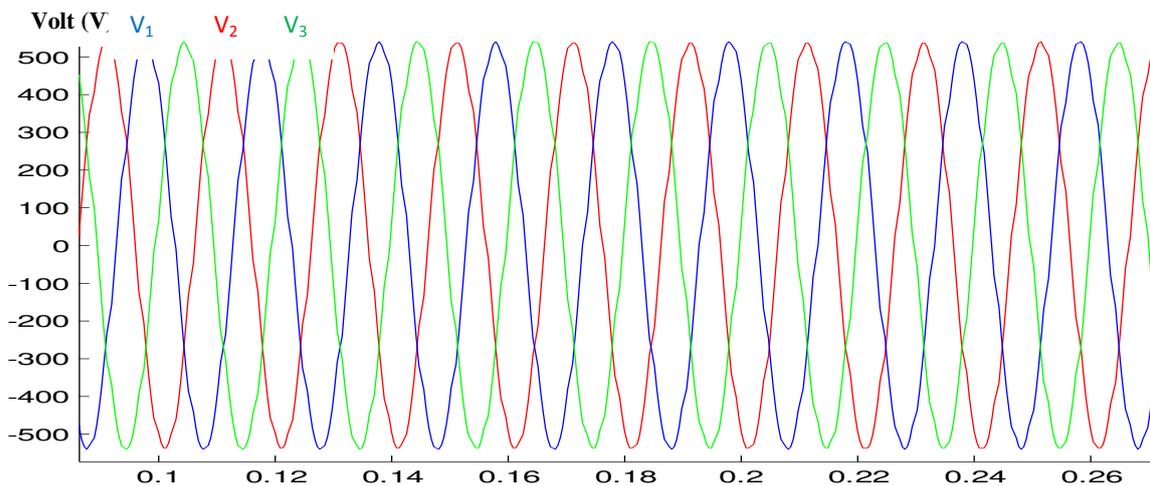


Figure 4.1 Tension d'alimentation de la MASY

4.1.1. Analyse le courant  $i_1$  par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

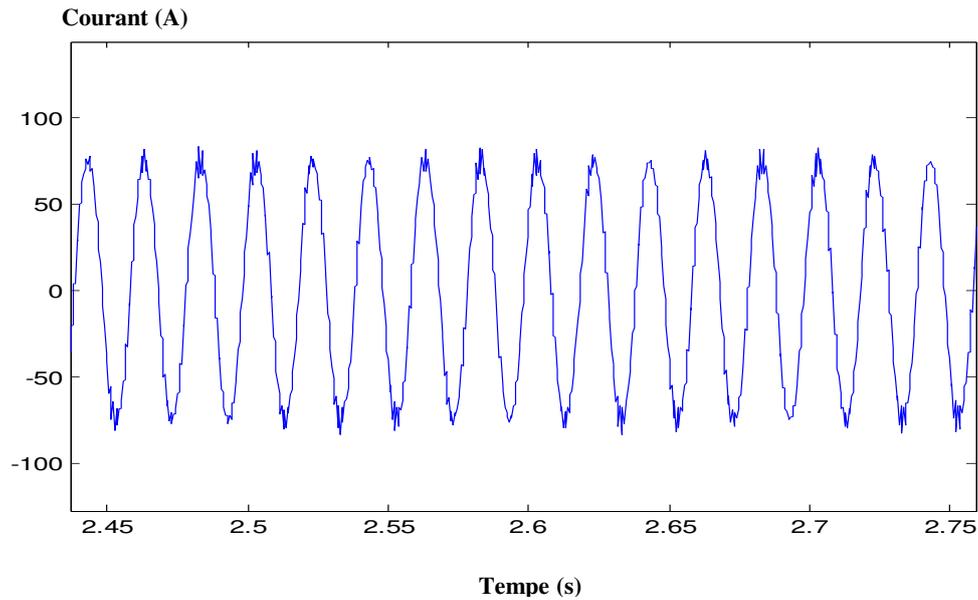


Figure 4.2 Zoom de la courant statorique avec le défaut.

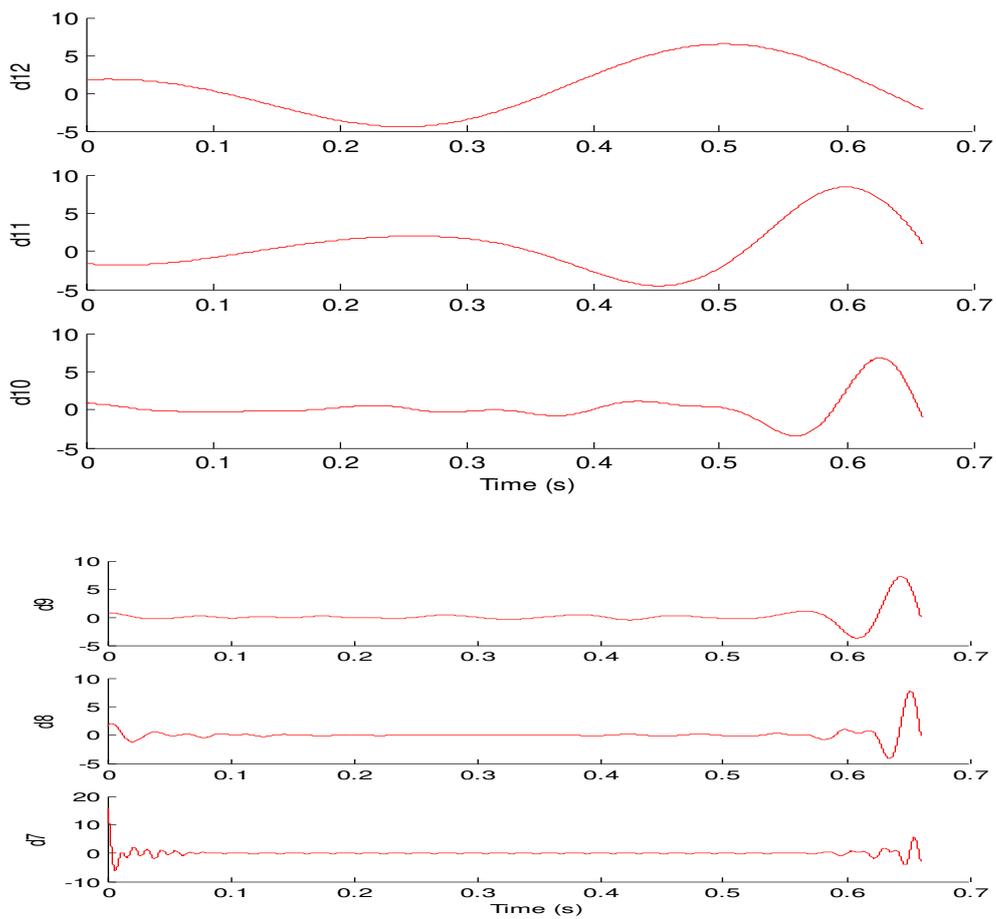
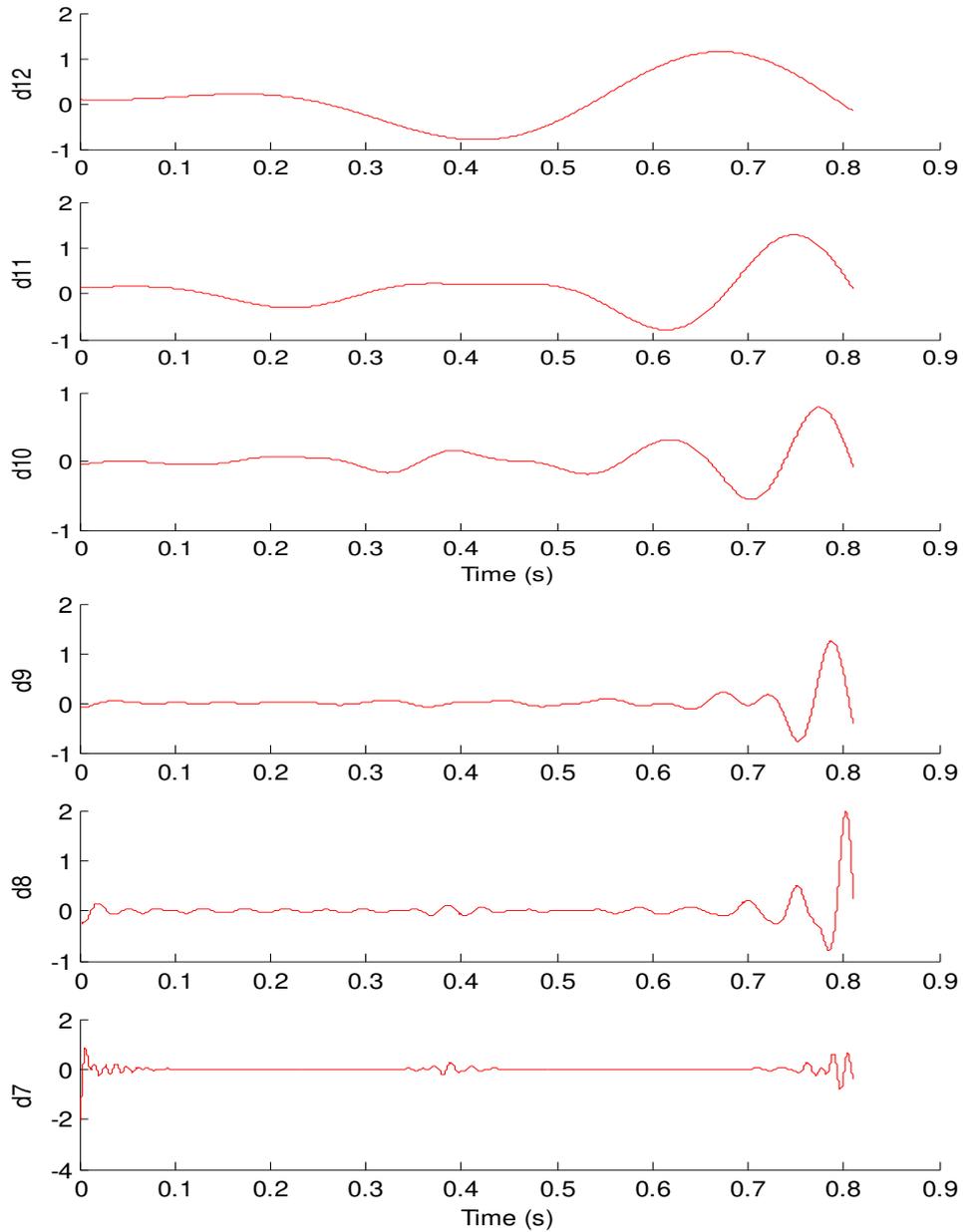
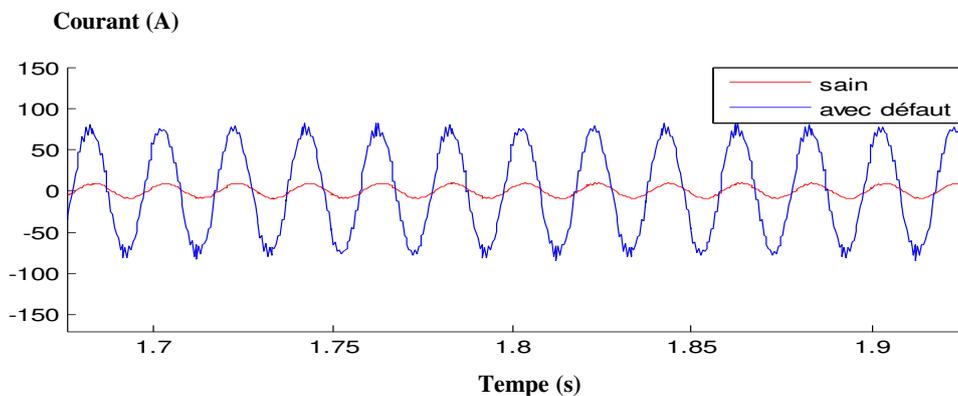


Figure 4.3 Signature de la courant  $i_1$  obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge (court circuit entre les files)



**Figure 4.4** Signature de la courant  $i_1$  obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge à l'état sain



**Figure 4.5** Le courant statorique à l'état sain avec le défaut

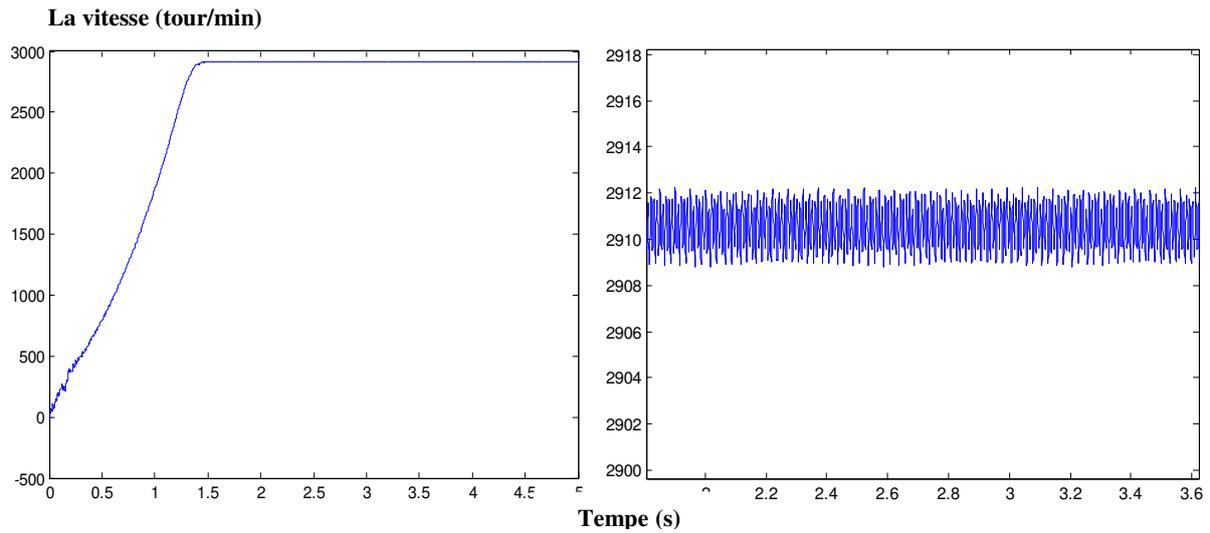


Figure 4.6 La vitesse de rotation avec le zoom pour cas : court circuit

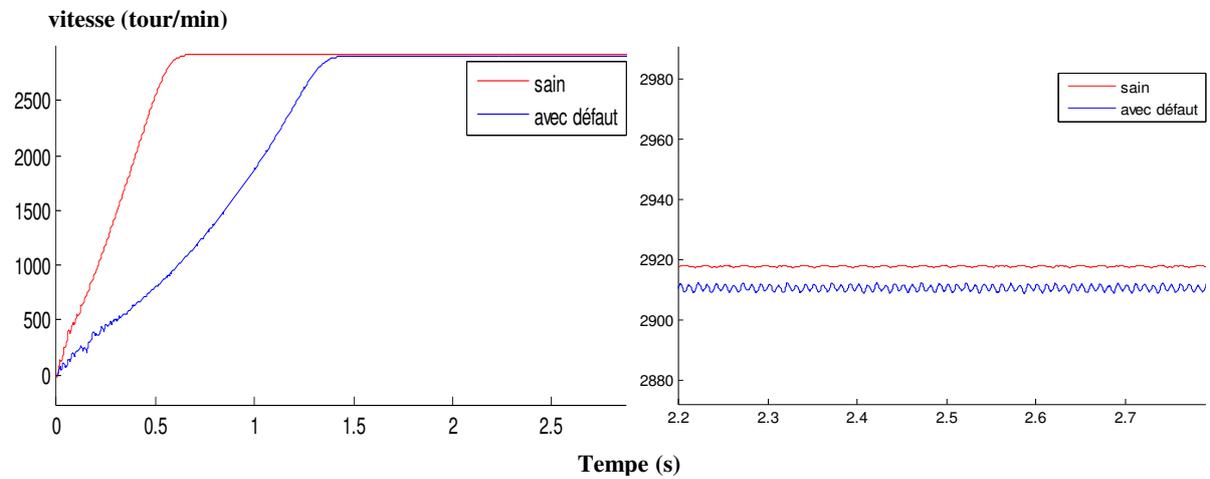


Figure 4.7 La vitesse de rotation avec le zoom pour les deux cas : sain avec le défaut

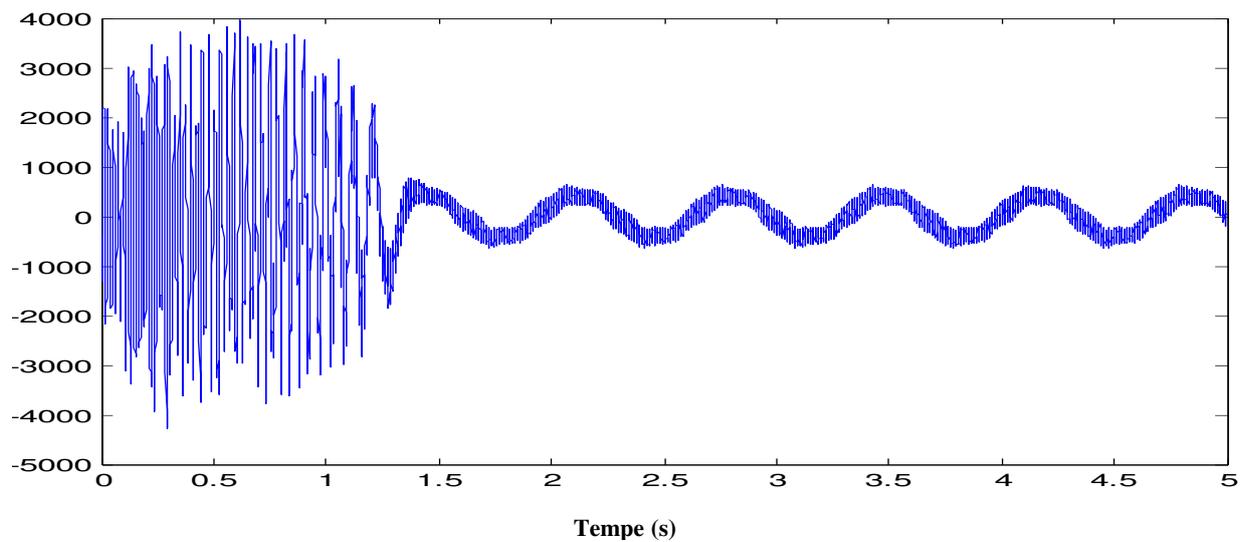
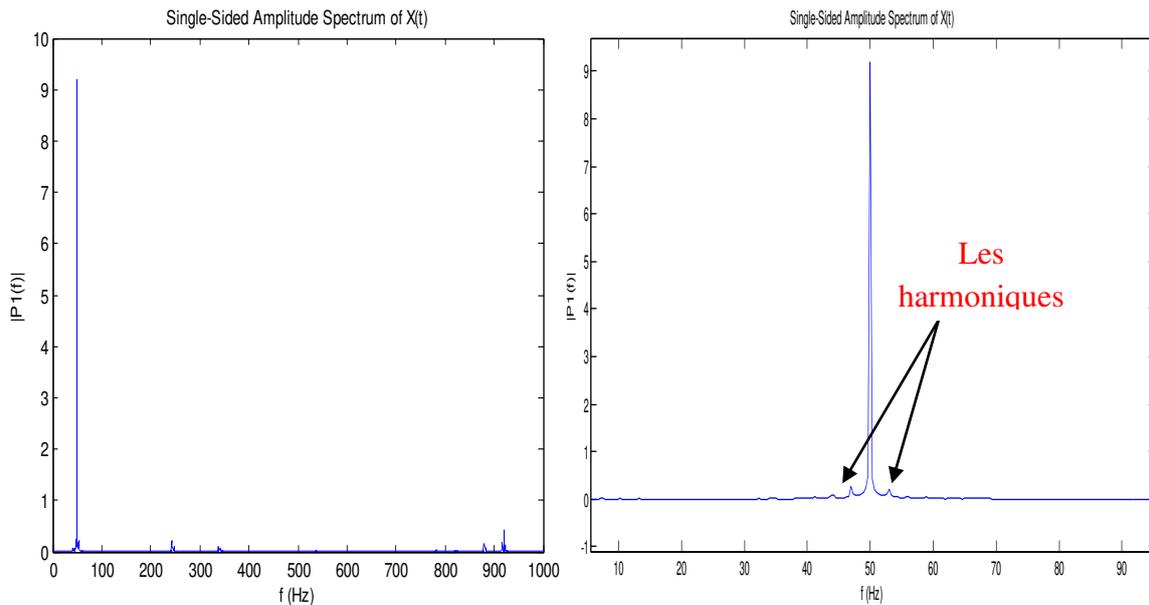


Figure 4.8 Le courant de barre avec le défaut

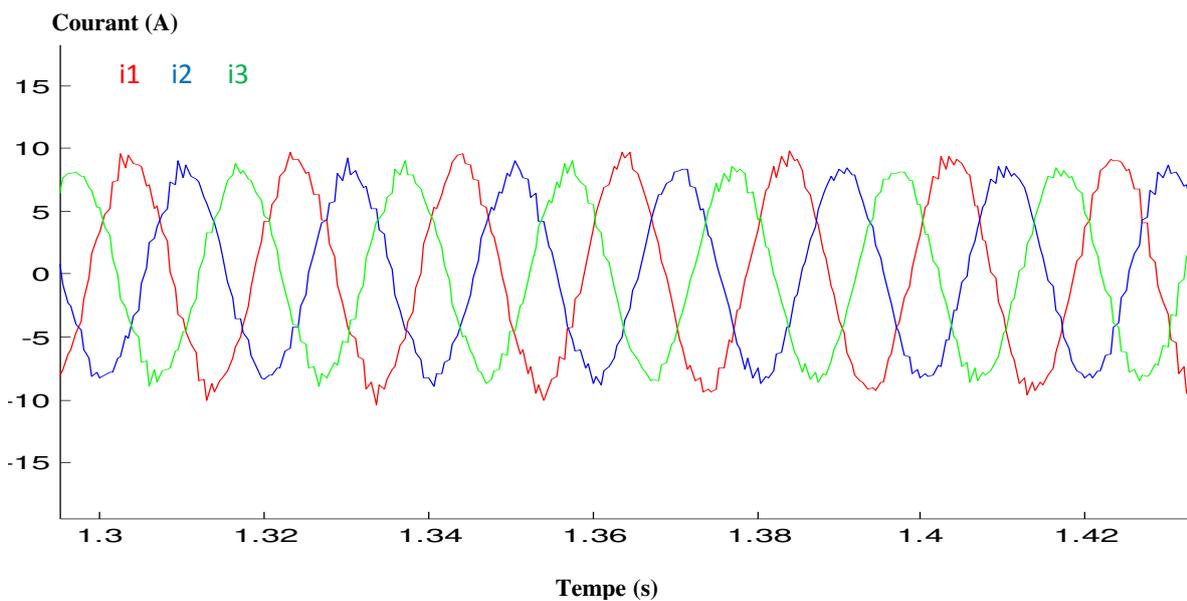
**4.2. Modélisation d'un défaut de la MASY dû à un Casser des trois barres**

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations du comportement de la MASY , avec et sans défaut. où l'analyse spectrale de quelques grandeurs magnétique et mécanique sera présenté dans le but de prévoir la grandeur qui comporte assez de renseignement sur la présence d'un défaut.

**4.2.1. Analyse le courant  $i_1$  par la transformée de fourier**



**Figure 4.9** transformée de fourier du courant statorique (avec zoom) pour un défaut (3 barres cassées)



**Figure 4.10** Le courant statorique avec le défaut

4.2.2. Analyse le courant  $i_1$  par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

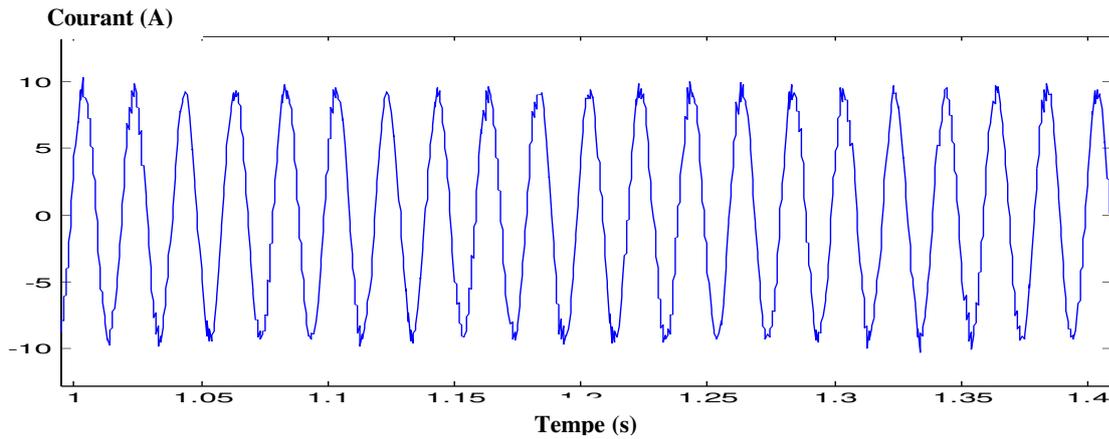


Figure 4.11 Le courant statorique dans la phase 1 avec le défaut

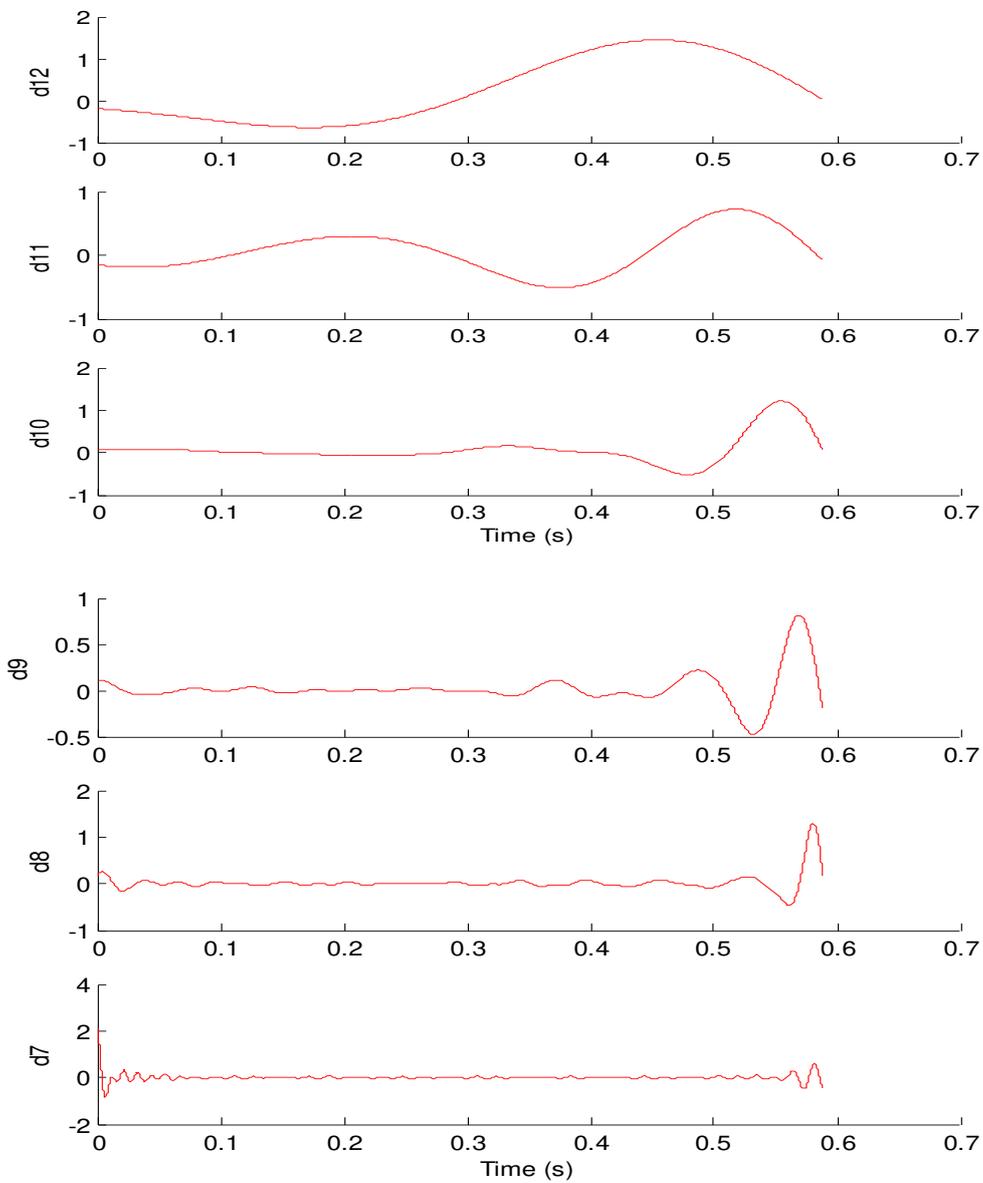
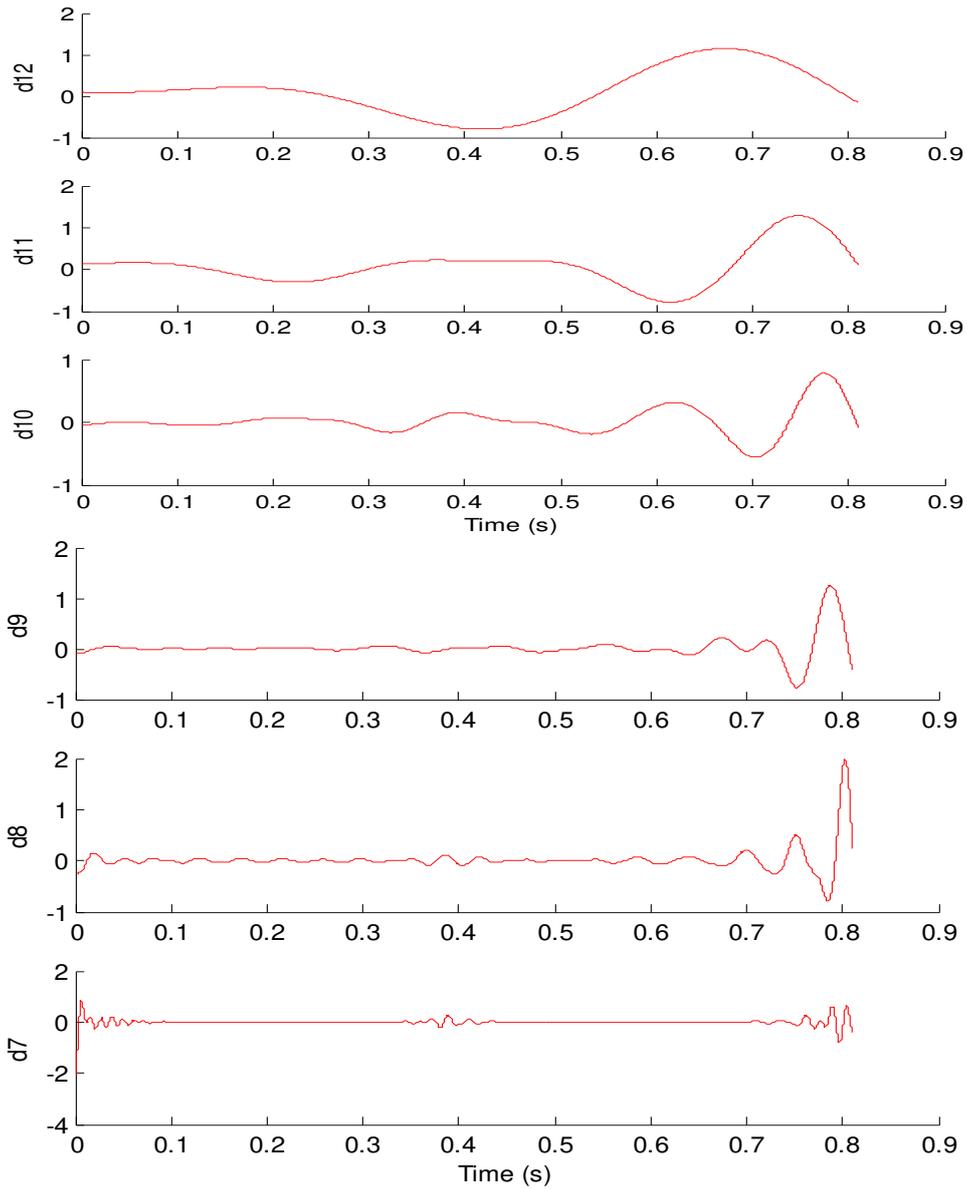
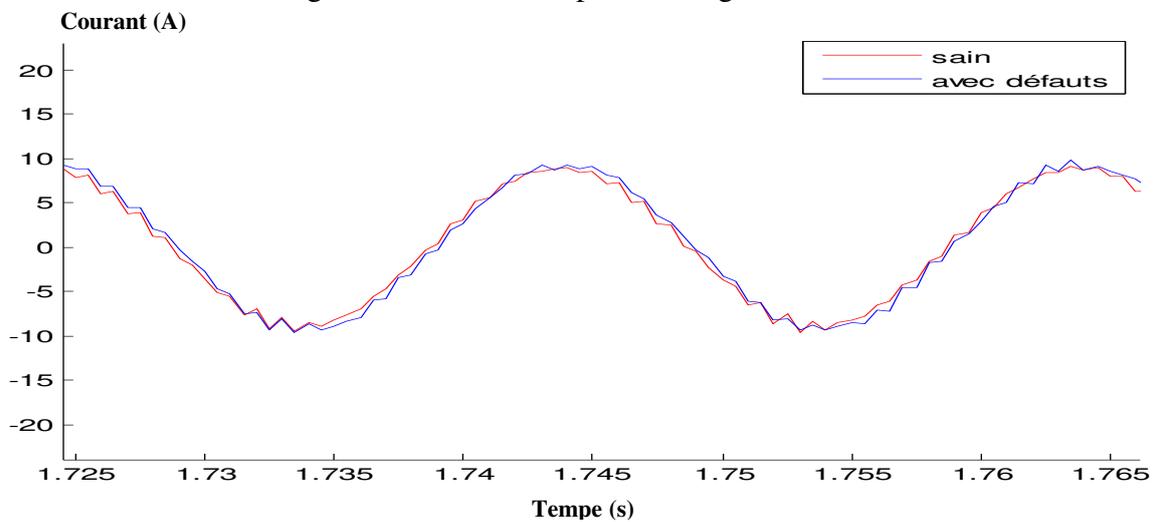


Figure 4.12 Signature de la courant statorique obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge (défauts casser des barres)



**Figure 4.13** Signature de la courant statoriques obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge à l'état sain



**Figure 4.14** Le courant statorique  $i_1$  à l'état sain avec le défaut

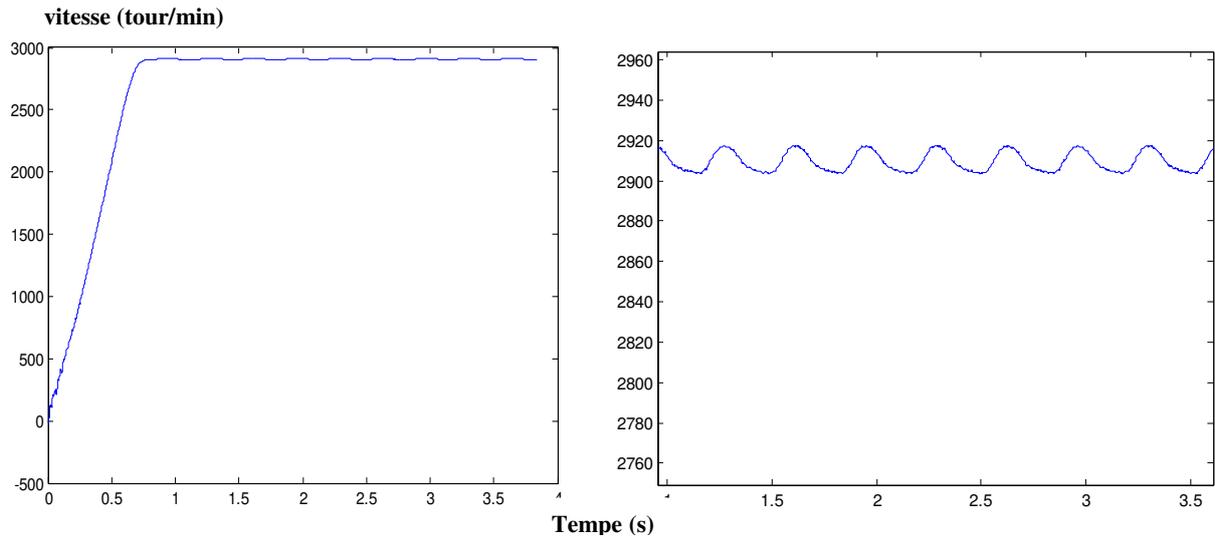


Figure 4.15 La vitesse de rotation avec la zoom pour cas : casser des trois barres

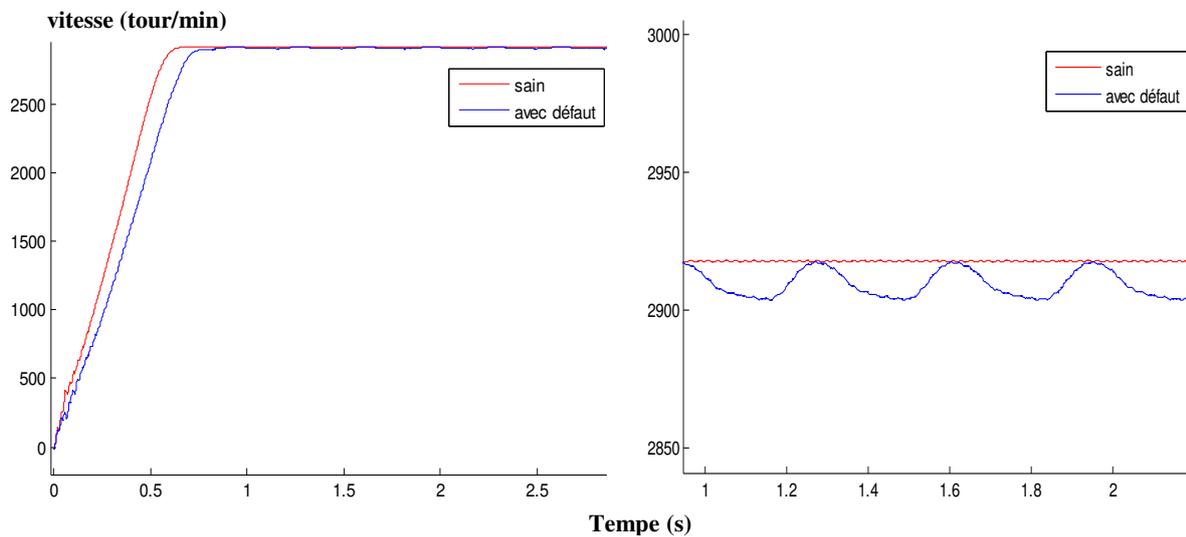


Figure 4.16 La vitesse de rotation pour les deux cas : sain avec le défaut

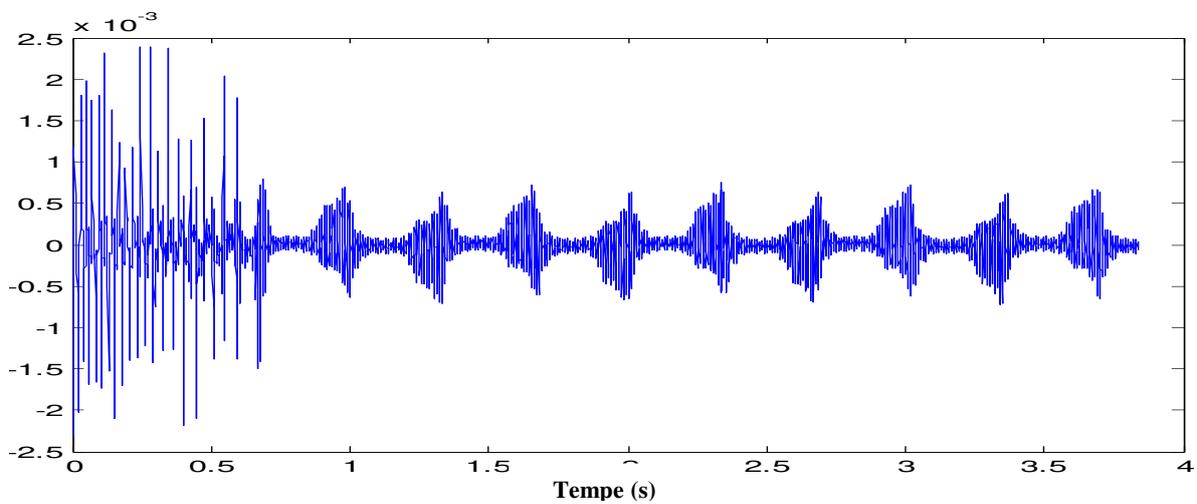


Figure 4.17 Le courant de barre pour le cas : casser des barres

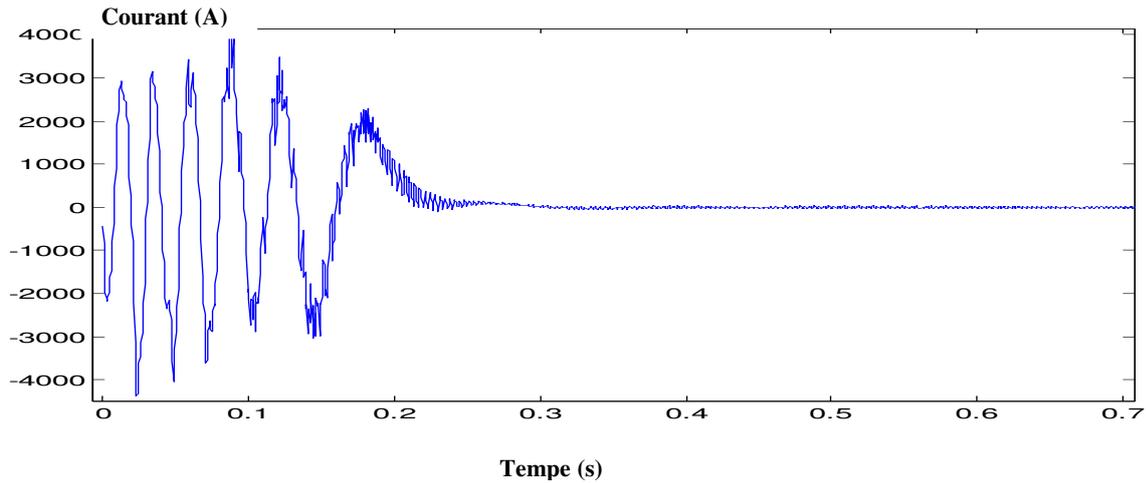


Figure 4.18 Le courant dans la barre rotorique 1 à vide à l'état sain

### 4.3. Modélisation d'un défaut de Réduction de nombre de spires

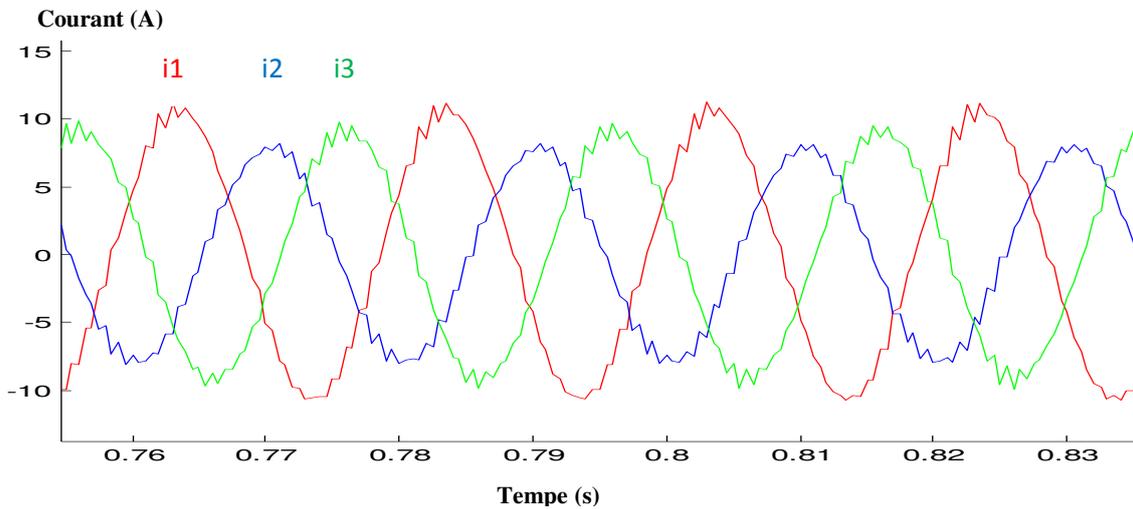


Figure 4.19 Formes d'onde des courants statorique pour réduction

#### 4.3.1. Analyse le courant $i_1$ par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

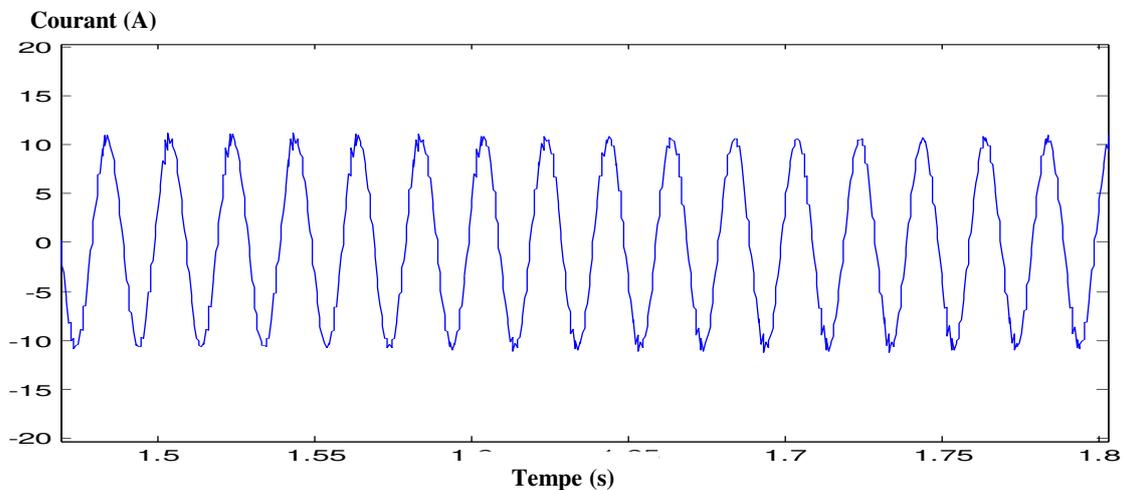
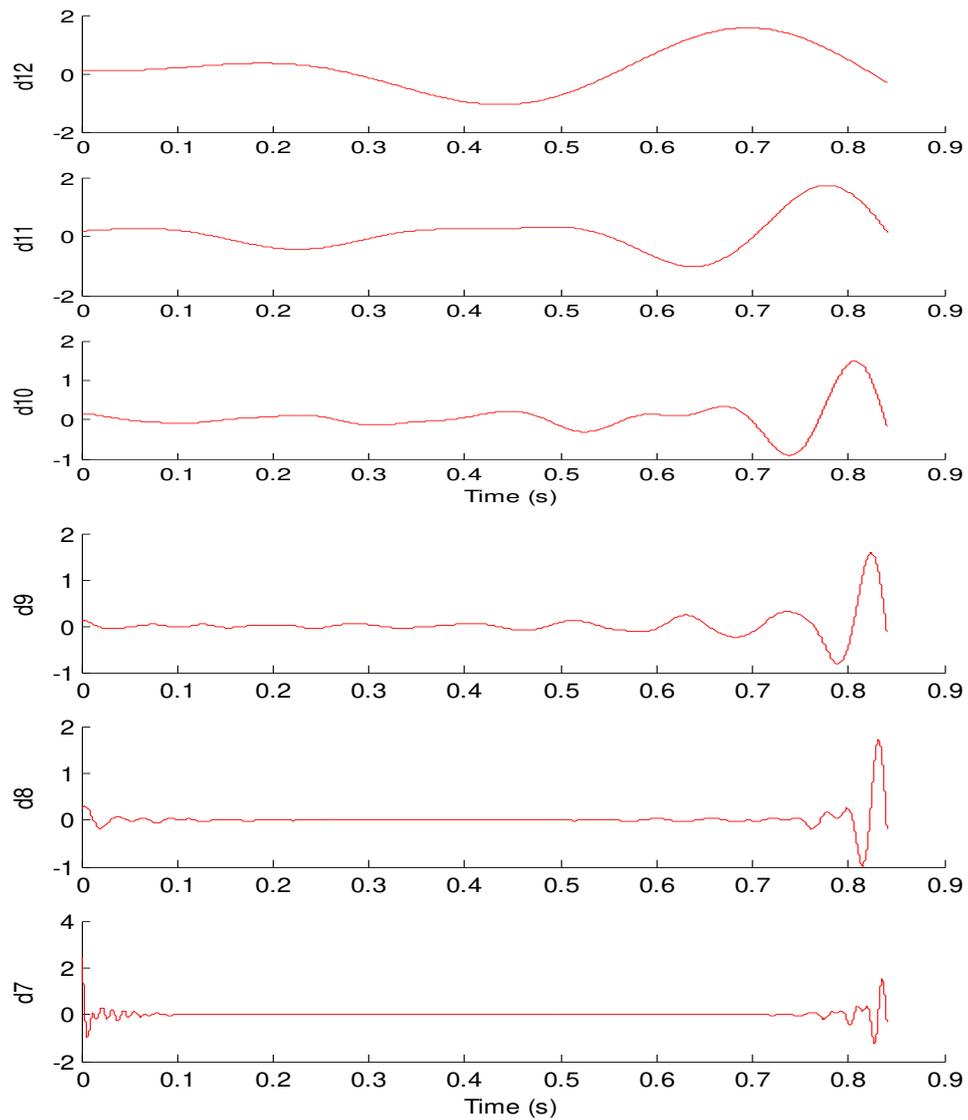


Figure 4.20 Le courant statorique dans la phase 1 avec le défaut



**Figure 4.21** Signature de la courant statoriques obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge (réduction de nombre de phases)

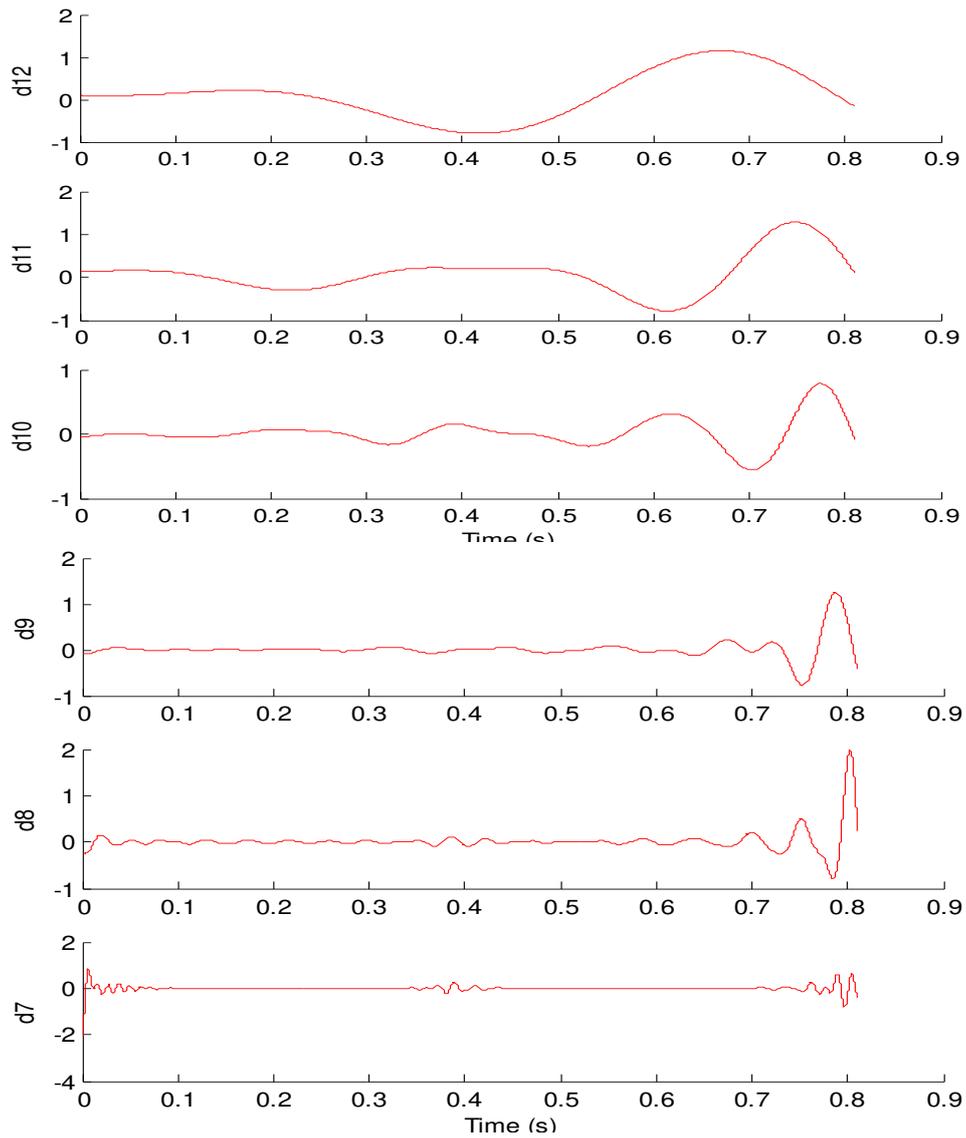


Figure 4.22 Signature de la courant statoriques obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime stationnaire en pleine charge à l'état sain

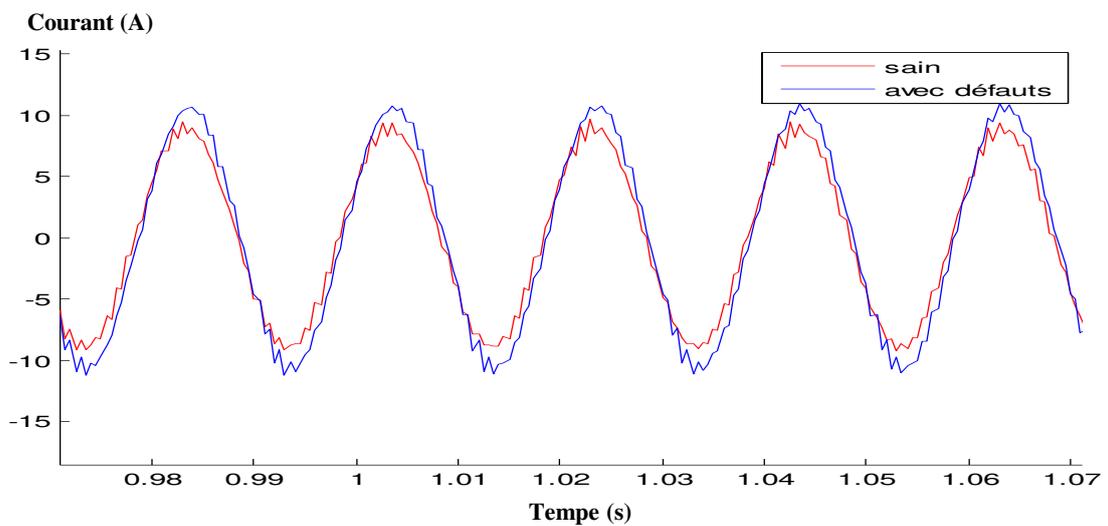


Figure 4.23 Formes d'onde des courants statoriques à l'état sain avec le défaut

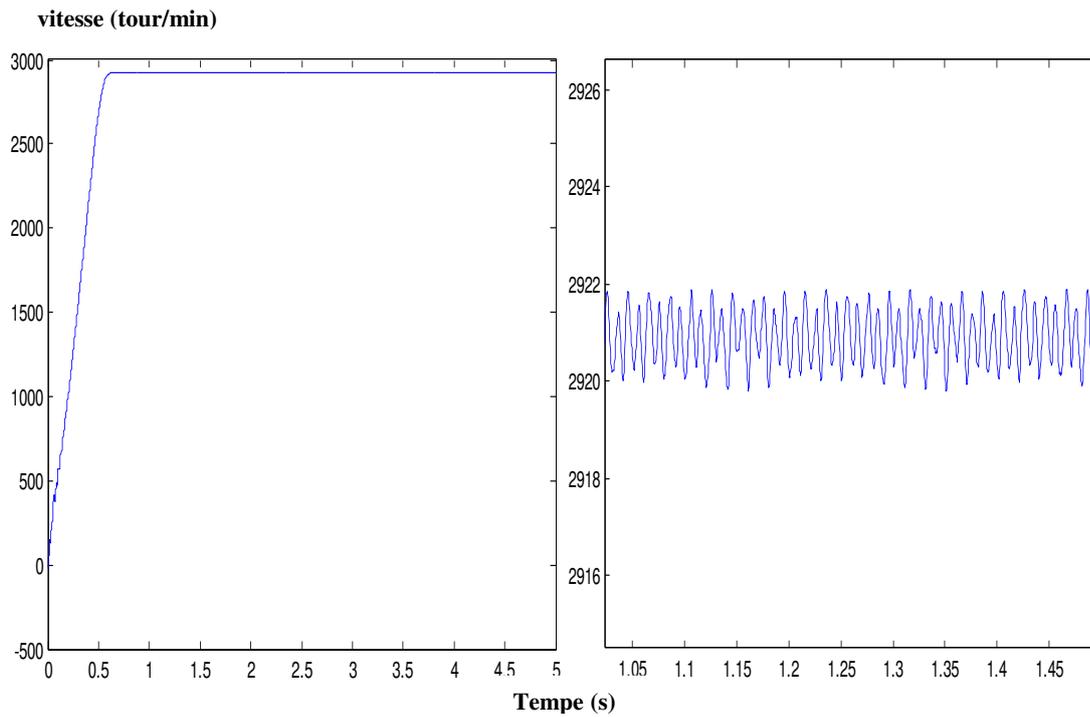


Figure 4.24 La vitesse de rotation avec le zoom pour cas : réduction de nombre de phases

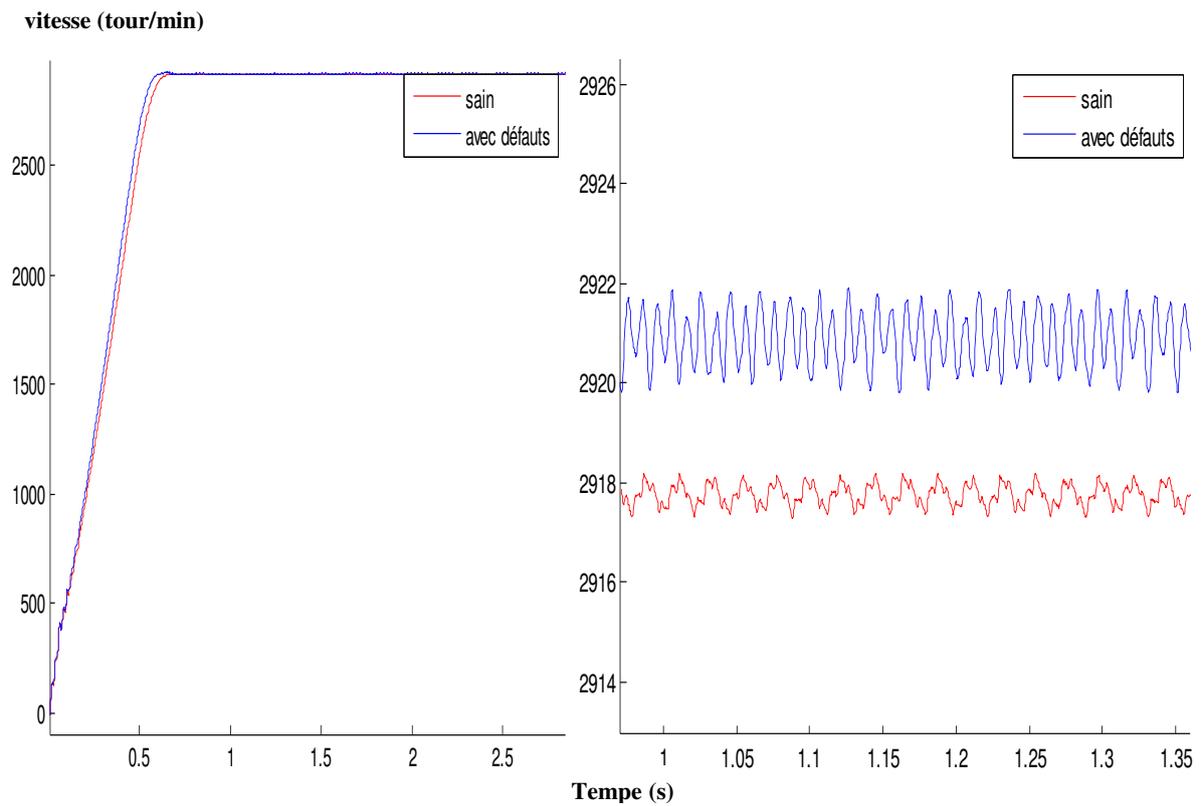


Figure 4.25 La vitesse de rotation pour les deux cas : sain avec le défaut.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présentés les résultats des simulations du comportement de la machine asynchrone, dans son état sain et dans son état ayant un défaut, quelques défauts de la machines ont été présenté ou dans la modélisation, nous avons provoqué celui-ci on agissant sur les paramètres de la machine. Par exemple une barre cassé à été modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique.

Les résultats des simulation ont montré que le comportement de la machine qui présente un défaut, diffère à celui d'une machine saine, ceci veut dire qu'on peut exploité cette différence dans son comportement pour prévoir ainsi le défaut de la machine, parmi ces chagements, la variation dans le spectre du courant, voir du couple ou de la vitesse. Ces variation dans le sepectre peut etre exploité pour prévoir ainsi l'état, le défaut et le type de défaut de la machine Aynchrone.

Dans les persepectives, ont propose d'utiliser un modèle tridimensionnel d'une part, ceci peut améliorer les résultatls des simulations présentés d'une part, aussi d'introduire le couplage magnétique thermique dans la machine, dans le but de prévoir d'autres types de défaut.

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire présente la modalisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en prenant en considération les défauts statoriques et rotoriques en vue du diagnostic des défauts statoriques.

Dans ce mémoire, nous avons développé un modèle à base des éléments finis pour simuler les comportements de la machine asynchrone à cage d'écureuil où nous avons utilisé un Logiciel dédié à la simulation électromagnétique et mécanique des machines électriques, il s'agit du FLUX2D.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents types des machines électrique et sa définition, ainsi par la présentation des différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasé à cage, ainsi que leurs causes et leurs signature spectrales.

Dans ce mémoire, nous avons présentés les résultats des simulations du comportement de la machine asynchrone, dans son état sain et dans son état ayant un défaut, quelques défauts de la machines ont été présenté ou dans la modélisation, nous avons provoqué celui-ci on agissant sur les paramètres de la machine. Par exemple une barre cassé à été modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique.

Les résultats des simulation ont montré que le comportement de la machine qui présente un défaut, diffère à celui d'une machine saine, ceci veut dire qu'on peut exploité cette différence dans son comportement pour prévoir ainsi le défaut de la machine, parmi ces changements, la variation dans le spectre du courant, voir du couple ou de la vitesse. Ces variation dans le sepectre peut etre exploité pour prévoir ainsi l'état, le défaut et le type de défaut de la machine Aynchrone.

Dans les persepectives, ont propose d'utiliser un modèle tridimensionnel d'une part, ceci peut améliorer les résultats des simulations présentés d'une part, aussi d'introduire le couplage magnétique thermique dans la machine, dans le but de prévoir d'autres types de défaut.

On propose à court terme étudier la modélisation de la machine asynchrone d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle éléments finis qui tient compte de la topologie et de dimensions de la machine.

## **Bibliographie**

- [1] : B. Bessam, Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligents, thèse de doctorat, Université de mohammed khaidher biskra,2016.
- [2] : M. BAZI Smail, Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur, thèse de doctorat, Université de Batna 2 2016.
- [3] : A. Zerrouk, Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée, Mémoire master, université de mohammed khaidher biskra,2013.
- [4] : G. Didier, modélisation et diagnostique de la machine asynchrone en présence de défaillance, thèse de doctorat, Université henri poincaré, 2004.
- [5] : H. Dahman et S. Souisi, Commande et diagnostic de la machine asynchrone à l'aide d'observateur, mémoire master, Université kasdi merbah ouargla, 2016.
- [6] : S. Kerfali, Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone, Université badji mokhtar annaba, 2016.
- [7] : M. Lakhdari, Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aerogeneration, mémoire Magister, université ferhat abbas batna, 2014.
- [8] : KH. Laadjal, modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts par flux 2D, Mémoire master, université de mohammed khaidher biskra, 2015.
- [9] : I. Boucharbe, Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable, mémoire Magister, université mentouri constantina, 2009.
- [10] : H. Cherif, détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et l'ondelettes, mémoire Magister, université de mohammed khaidher biskra, 2014.
- [11] : N. Halem, Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis, thèse de doctorat, université de Mohammed, 2015.

- [12] : S. Saadi, Diagnostique des défauts d'un entraînement électrique par technique ondelette, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [13] : M. kaikaa, Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer. Application au diagnostic, université mentouri constantina, 2010.
- [14] : A. Belaid et A. Benzetta, Classification des images texture par ondelettes, mémoire ingénieure en électronique, université de mohammed khaidher biskra, 2010.
- [15] : Z. Elgahri, Diagnostic du défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone alimenté par un variateur de vitesse, Mémoire master, université de mohammed khaidher biskra, 2017.