

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur**  
**et de la recherche scientifique**

**Université Hassiba Benbouali de Chlef**



**Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur**  
**Département d'Electrotechnique**

## **MEMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Magister** (école doctorale génie électrique)

Option : Entraînement des systèmes électriques

Présenté par

**GUETTAB ABDELKADER**

Ingénieur d'état en électrotechnique, Univ. HB Chlef

THEME

---

---

# **Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant**

---

---

Soutenu le : 06/04/2011

Devant le jury composé de :

M<sup>r</sup> : TAHAR ABBES MILOUD  
Président

M.C.A (U.CHLEF)

M<sup>r</sup> : BELMADANI BACHIR  
Rapporteur

Professeur, UHB Chlef

M<sup>r</sup> : MELLAKHI ABDELKADER

M.A.A (U.CHLEF)

CO-ENCADREUR

M<sup>r</sup> : NEZLI LAZHARI

M.C.A (E.N.P. ALGER)

Examineur

M<sup>r</sup> : TADJINE MOHAMED

Professeur, ENP Alger

Examineur

Année : 2011

# Avant-Propos

*Mes remerciements vont tout premièrement, à dieu le tout puissant de m'avoir donné courage et patience durant toutes ces années d'études.*

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur **B. Belmadani** Professeur au département d'électrotechnique de l'Université de Chlef, d'accepter d'être rapporteur de cette thèse et pour la confiance et l'intérêt qu'il ma témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur **A. Mellakhi** M.A.A(U.CHLEF) au département d'électrotechnique, d'accepter d'être Co-Encadreur de cette thèse et pour la confiance et l'intérêt qu'il ma témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.

C'est un honneur pour moi que Monsieur **T. ABBES** ait accepté de participer à ce jury et d'en assumer la tâche de président. Je l'en remercie très sincèrement et très profondément.

Mes remerciements vont également aux autres membres de jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de ma thèse. Il s'agit, en l'occurrence de : Monsieur **M.Nezli** professeur à ENP Alger et Monsieur **M.Tadjine** professeur à ENP Alger.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui m'ont formé et le chef département. M<sup>r</sup> **Alouache**.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues de ma promotion **Mohamed.B, Mohamed.T, Adil, Djilali, Fayçal,Zin el aabidine**, pour leurs conseils éclairés, leurs informations coopératives, leurs questions pertinentes et l'ambiance sympathique qu'ils ont su créer.

Enfin, je ne saurais ici oublier dans ces sentiments mon entourage proche qui depuis toujours m'a aidé à réaliser mes projets avec la plus grande compréhension et le plus grand intérêt.

# Sommaire

Sujet	Page
<b>Introduction générale</b>	1

## **Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil**

I.1 Construction de la machine électrique.....	03
I.1.1 Le stator.....	04
I.1.2 Le rotor.....	05
I.1.3 Paliers.....	06
I.2 Différents types de défauts.....	06
I.2.1 Causes et conséquences des défauts.....	06
I-2-2 Principaux défauts d'une machine asynchrone triphasée.....	08
I.2.2.1 Défauts statoriques .....	08
I.2.2.2 Défauts rotoriques.....	08
I.1.2.2.1 Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique.....	08
I.2.2.3 Défaut de roulement.....	09
I.2.2.4 Défaut d'excentricité.....	10
I.3 Différentes techniques de diagnostic des machines électriques.....	12
I.3.1 Techniques mécaniques.....	13
I.3.1.1 Diagnostic par mesure des vibrations du moteur.....	13
I.3.1.2 Diagnostic par la mesure de la température.....	13
I.3.2 Diagnostic chimique.....	13
I.3.3 Techniques magnétiques et électriques.....	14
I.3.3.1 Diagnostic par mesure du flux axial de fuite.....	14
I.3.3.2 Diagnostic par l'analyse des grandeurs électriques.....	14
a. Diagnostic par analyse spectrale du courant statorique.....	14
b. Diagnostic par l'approche des vecteurs des courants de Park.....	16
b.1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park.....	17
b-2 Forme de Lissajous.....	24
I.4 Différents modes d'alimentation des moteurs asynchrones.....	24
I.4.1 Onduleur.....	25

## **Chapitre II : Modélisation de l'ensemble convertisseur -machine pour le diagnostic de défaut**

II.1 Modélisation du moteur asynchrone a cage d'écureuil.....	29
II.1.1 Hypothèses simplificatrices.....	29
II.1.2 Equations des tensions.....	29
II.1.2.1 Equations du stator.....	29

II.1.2.2 Equation du rotor.....	31
II.1.3 Equations mécaniques .....	34
II.2 Prise en compte des harmoniques d'espaces dans le calcul des inductances de la machine...	35
II.3 Calcul des inductances de modèle de la machine.....	36
II.3.1 Inductance de magnétisation d'une phase statorique.....	36
II.3.2 inductance mutuelle entre phases statoriques.....	36
II.3.3 Inductances mutuelles entre les phases statoriques et les boucles rotoriques.....	36
II.3.4 inductance de magnétisation d'une boucle rotorique.....	37
II.3.5. Inductances mutuelles entre les boucles rotoriques.....	37
II.4 Modélisation des défauts.....	38
II.4.1 Modélisation des ruptures des barres.....	38
II.4.2 Modélisation des défauts d'excentricité.....	40
II.4.2.1 Calcul les Inductances avec excentricité statique.....	40
II.4.2.2 Calcul des inductances avec excentricité dynamique.....	42
II.4.2.3 Calcul les Inductances avec excentricité mixte.....	43
II.5 Modélisation de l'onduleur MLI.....	45

### **Chapitre III : simulation et interprétation**

III.1 Fonctionnement de la machine sans défaut.....	47
III.2 Fonctionnement de la machine en tenant compte des harmoniques d'espace.....	51
III.3 Fonctionnement de la machine avec défaut de barres.....	56
III.4 Fonctionnement de la machine avec défaut de barres en tenant compte des harmoniques.....	66
III.5 Fonctionnement de la machine avec défaut d'excentricité.....	76

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>80</b>
---------------------------------	-----------

### **Annexes**

<b>Annexe A.....</b>	<b>82</b>
<b>Annexe B.....</b>	<b>83</b>

### **Bibliographie**

Bibliographie.....	88
--------------------	----



Le moteur asynchrone est certainement la machine électrique la plus fréquemment utilisée dans l'industrie. Cela tient, surtout s'il s'agit du moteur à cage, à sa grande robustesse, à la facilité avec laquelle on peut le démarrer, et à son prix de revient. Toutes ces qualités justifient le regain d'intérêt de l'industrie vis-à-vis de ce type de machine. De plus, les développements récents de l'électronique de puissance et de commande permettent au moteur asynchrone à cage d'avoir les mêmes performances que celles des machines à courant continu. Ceci explique son développement dans l'industrie et le remplacement progressif des machines à courant continu. Ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures. L'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Ces défauts peuvent aller jusqu'à l'endommagement total du moteur qui paralyse le processus industriel, ce qui se répercute sur la production. Donc, le diagnostic et la surveillance de cette machine deviennent un enjeu majeur.

L'histoire du diagnostic des défauts et de la protection est très ancienne au même titre que l'ancienneté des machines électriques elles-mêmes. Les fabricants et les utilisateurs de machines électriques se sont basés au départ sur les méthodes simples de protection, telles que les techniques de détection utilisées à l'arrêt (off line), ainsi que l'intervention de l'appareillage de protection qu'au dernier stade de défaut (cas critique). L'insuffisance de ces techniques a poussé les recherches vers une maintenance prédictive utilisant le couple, la vitesse, les vibrations, le bruit, la température ...etc. Ces grandeurs demandent l'introduction des capteurs au niveau de la machine, ce qui exige la conception d'une machine spéciale et coûteuse.

Pour effectuer un diagnostic précis basé sur l'analyse de signal du courant et des puissances, il est préférable d'analyser ces grandeurs dans le domaine temps/fréquentiel pour faire apparaître les composantes significatives des défauts. Car les spectres de courant et de la puissance instantanée contiennent aussi des harmoniques dues à l'alimentation.

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone à cage avec défaut (cassure de barre, et excentricité). Dans cette méthode, les inductances peuvent être calculées en utilisant une décomposition en série de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques des inductances souhaités (simulation possible au fondamental de l'induction ou avec les harmoniques d'espace les plus importants).

Les méthodes d'analyse des signaux obtenus sans modèle (diagnostic externe) se fondent sur l'analyse des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement. Le spectre du courant statorique est très intéressant pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques.

La technique d'analyse en temporel et en fréquentiel identifie le comportement optimal de la machine dans le cas où elle est saine et compare les résultats avec ceux obtenus en présence de défaut.

Le présent mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre décrit, brièvement les différents défauts affectant la machine asynchrone, leurs causes et les principales techniques de détection. Les différents modes d'alimentation de la machine sont également présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation du moteur asynchrone sain et avec défaut, ainsi que l'onduleur de tension commandé en Modélisation de largeur d'impulsion MLI.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats de simulation pour les différents cas de fonctionnement du moteur avec les deux modes d'alimentation, en utilisant les différentes techniques de diagnostic citées ci-dessus.

Enfin on termine par une conclusion générale.

La machine asynchrone triphasée est maintenant largement utilisée dans l'industrie notamment les applications nécessitant une vitesse variable. Ces machines ont la réputation d'être robustes et d'être adaptées à des applications de forte puissance. Malgré ses qualités évoquées, il n'est pas rare que ces machines présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré.

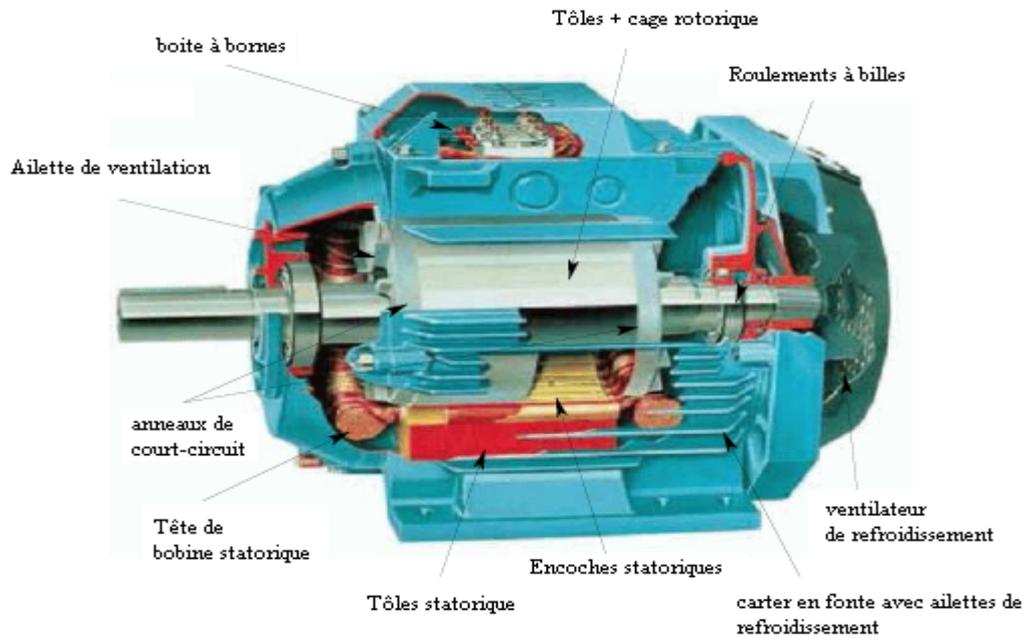
Dans cette partie du mémoire, Les points suivants seront évoqués :

- Différents types de défauts de la MAS.
- Différents techniques de diagnostic.
- Différents modes d'alimentation.

### **I.1 Construction de la machine électrique**

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones (fig. I.1) permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

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

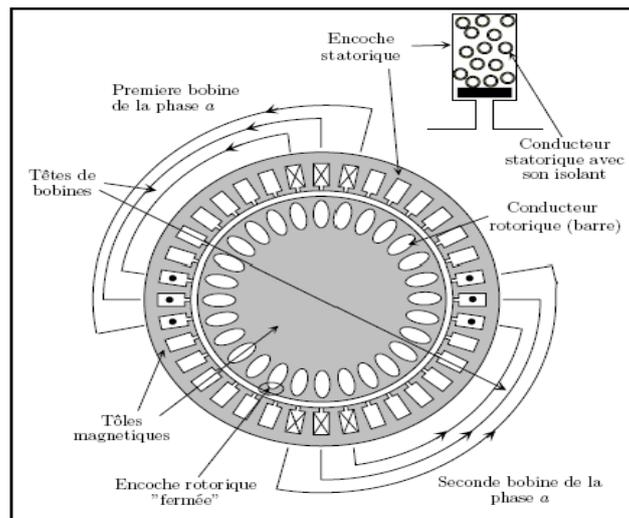


**Fig. I.1.** Élément de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil [Bol 02]

### I.1.1 Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manières imbriquées, ondulées ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.



**Fig. I.2.** Coupe de la machine asynchrone à cage

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.2 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine en charge [Bol 02] [Did 04].

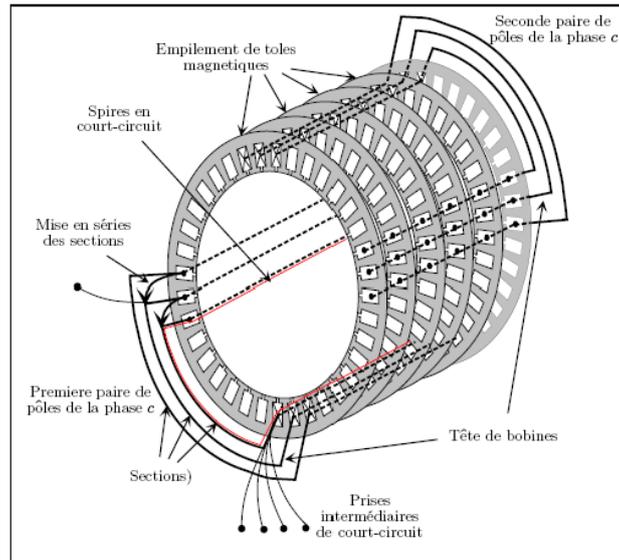
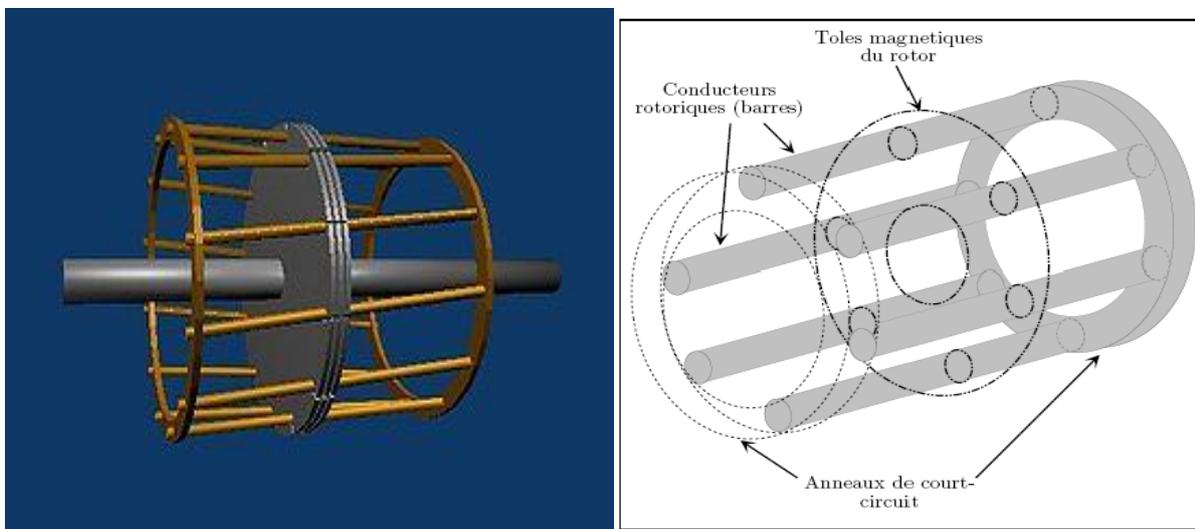


Fig. I.3. Coupe schématique de la constitution du stator

**I.1.2 Le rotor**

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

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



**Fig. I.4** : Rotor à cage d'écureuil

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

Nous donnons une photographie en (Fig. I.4) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil.

Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoches au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. **[Bol 02][Did 04]** . Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la figure I.1.

### **I.1.3 Paliers**

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure I.1.

## **I.2 Différents types de défauts**

Avant d'étudier les différents types de défauts, il est indéniable de présenter les causes donnant naissance à ces défauts ainsi que leurs conséquences.

### **I.2.1 Causes et conséquences des défauts**

Les défauts majeurs affectant les machines électriques sont dus à un ensemble de contraintes nocives qui sont généralement de nature thermique, électrique, mécanique, environnementale, électromagnétique, résiduelle et dynamique. **[Raz 05][Aus 87][Tav 86][Lar 05]**

#### **a. Les Contraintes électriques**

Elles ont des effets directs sur la partie isolante du bobinage. Ce qui crée des problèmes diélectriques pouvant entraîner les ruptures des isolants.

#### **b. Les Contraintes dynamiques**

Elles ont pour conséquence des dépassements dynamiques d'origine externe apparaissant sous forme de couples pulsatoires, vibrations, forces centrifuges, augmentation de la vitesse et la

contrainte périodique. Ces contraintes peuvent provoquer le décalage de la masse rotorique, la flexion de l'arbre et des formations au niveau des barres rotoriques.

**c. Les contraintes magnétiques**

On distingue :

- Les effets électromagnétiques.
- La sollicitation magnétique déséquilibrée.
- Les parasites et les vibrations électromagnétiques.
- Des parasites et des vibrations électromagnétiques.

**d. Les contraintes d'environnement :**

Un moteur doit toujours être gardé dans un endroit propre et sec car sa durée de vie et sa bonne tenue dépend de l'environnement dans lequel il fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière qui contient des particules métalliques engendre de graves endommagements au niveau de la surface rotorique du moteur et détériore l'isolant ce qui provoque des court-circuits dans ses enroulements. [Raz 93]

**e. Les contraintes mécaniques**

Elles se présentent sous les formes suivantes :

- mouvement des bobinages.
- déflexion de l'arbre.

**f. Les contraintes thermiques**

L'excès de température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits de différents types. Les dépassements thermiques sont dus :

- à des variation des tensions,
- au déséquilibre des tension d'alimentation,
- au démarrage du moteur,
- à la surcharge du moteur,
- à la d défaillance du système de ventilation,
- à l'augmentation de la température ambiante,
- aux pertes thermiques excessives. [Raz 93]

**g- Les contraintes de démarrage :**

Le démarrage est la période la plus dangereuse pour la tenue de l'enroulement rotorique d'une moteur, durant laquelle tous les phénomènes sont aggravés par suite de l'appel important du

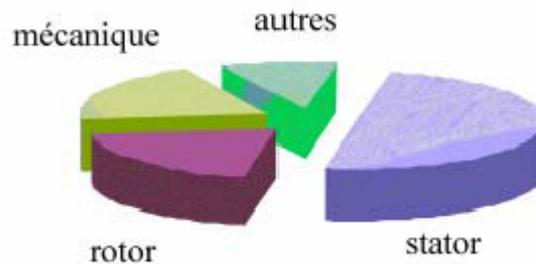
courant. Si on prend par exemple le rotor à cage, trois principaux éléments peuvent contribuer à la rupture de sa cage durant cette période de fonctionnement : [Gou 92]

- Les conditions de démarrage,
- Les contraintes permanentes,
- Les contraintes vibratoires.

### I-2-2 Principaux défauts d'une machine asynchrone triphasée

Une étude statistique est effectuée en 1998, par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50KW à 200KW) a donne les résultats suivantes ; [Sad 07]

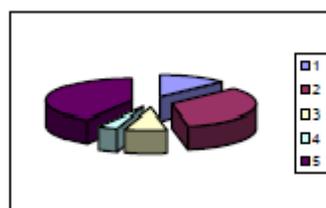
- Stator : 60%
- Rotor : 20%
- Mécanique : 18%
- Autre : 12%



**Fig.I.5** : Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance

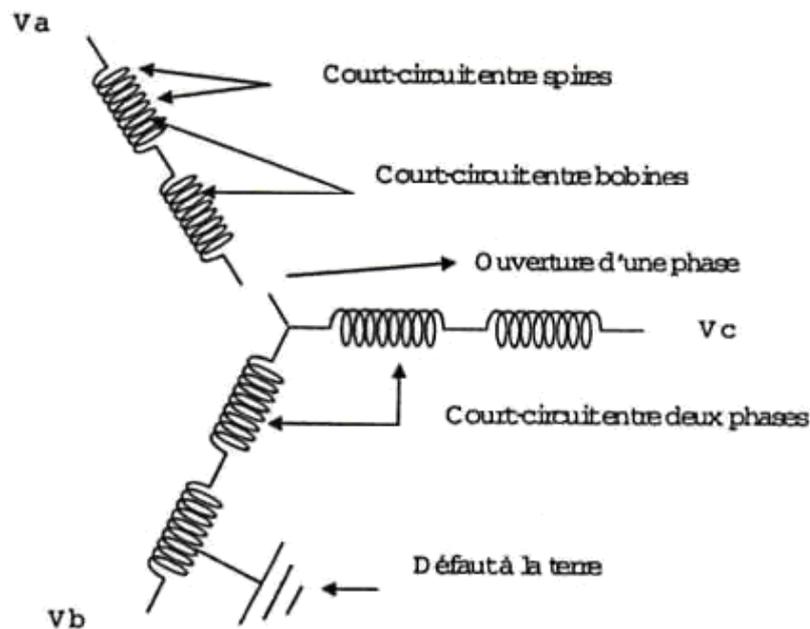
Une autre étude statistique a été faite sur les machines de grande puissance (de 100KW à 1MW) a donne les résultats suivantes ;

- 1-Stator : 13%
- 2-Autres : 34%
- 3-Rotor : 08%
- 4-couplage mécanique : 04%
- 5-Roulement : 41%



**Fig.I.6** : Répartition des défauts pour une machine de grande puissance**I.2.2.1 Défauts statoriques**

La dégradation de l'isolation électrique engendre des défauts de court circuit illustrés par la figure I.7. [Tou 02]

**Figure I.7** : Différents types de défauts statorique. [Tou 02]**I.2.2.2 Défauts rotoriques**

Les différents défauts relatifs à la partie rotorique peuvent être traduits par : [Raz 05][Tav 86]

[Lar 05] [Tou 02][Alg 70][Khe 05][Bac 99][Emm 99]

- Rupture d'anneau ou de barre de la cage rotorique.
- Défauts de roulements à billes.
- Excentricité statique, dynamique ou mixte.

**I.2.2.2-1 Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique**

Le rotor du moteur asynchrone est soit constitué d'un bobinage triphasé ou de barres conductrices placées dans des encoches et mises en court-circuit par des anneaux. Parmi les défauts qui se manifestent dans la cage rotorique, on cite :

### **A- Rupture des barres**

Une barre cassée, signifie que le courant circulant dans cette barre est nul. Les phénomènes qui peuvent participer à la rupture de la cage rotorique sont de type thermiques ou électrodynamiques.

#### **a- phénomènes thermiques**

Au démarrage, on considère une répartition inégale de la température dans les barres qui risque de conduire à une rupture. Il y a des parties dans le moteur où la température est assez élevée et ceci est dû à des défauts de fabrication comme dans le cas d'une mauvaise liaison ou soudure entre les barres et les anneaux de court circuit.

#### **b- phénomènes électromagnétiques**

L'action du flux de fuites d'encoches sur le courant qui parcourt les barres produit des effets électromagnétiques, ces derniers sont proportionnels au carré de l'intensité du courant et sont dirigés dans le même sens. Si ces contraintes sont suffisamment élevées, la rupture de barres se produit rapidement.

### **B- Rétrécissement des barres**

Une barre rétrécie représente une plus grande résistance, à cause d'une mauvaise coulée d'aluminium, ce qui provoque le passage d'un faible courant dans cette barre.

### **C- Mauvaise soudure de la barre**

Une barre mal soudée présente un point chaud dans la cage, cela est dû à un défaut de fabrication, ce qui provoque une augmentation de la résistance entre la barre et l'anneau de court circuit.

### **D- Rupture des segments d'anneau**

Un segment est l'élément de court circuit entre deux barres, et comme ce dernier lui aussi subit des contraintes de démarrage plus les contraintes thermiques et mécaniques, il peut subir des cassures totales ou partielles (résistance très élevée).

#### **I.2.2.2-2 Défaut de roulement**

Les roulements sont constitués généralement de deux bagues, intérieure et extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (fig.I.8)

Les défauts de roulement sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité. Les défauts de roulements à billes peuvent être classifiés comme suit :**[Raz 05]**

**[Lar 05][Bac 99][Emm 99][Pen 94][Vas 93][Raz 01].**

- défaut de la bague extérieure ;

- défaut de bague intérieure ;
- défaut de billes ;

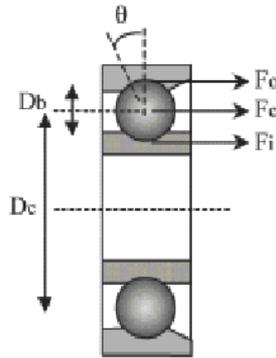


Fig.I.8. le roulement à bille

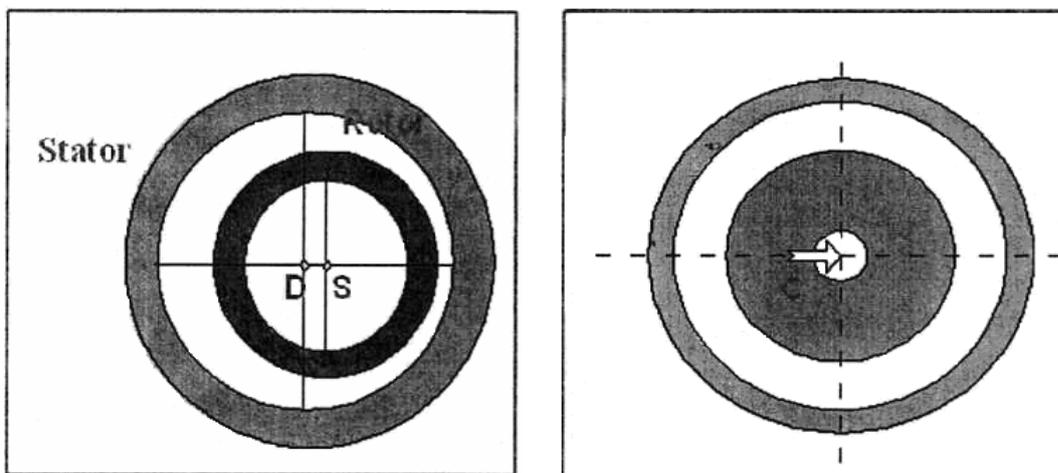
**I.2.2.2-3 Défaut d'excentricité**

L'excentricité de la machine est le résultat d'uniformité d'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, à un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, à l'usure du roulement, ou à un déplacement du noyau statorique. Lorsque cette excentricité s'accroît, la résultante des forces magnétiques radiales déséquilibrées (connue aussi sous le nom de traction magnétique déséquilibrée) peut causer un frottement entre le stator et le rotor, qui peut endommager le circuit magnétique et l'enroulement du stator et le rotor.

L'excentricité se répartit en deux catégories, la première est l'excentricité statique, la seconde est l'excentricité dynamique. Pour expliquer le phénomène d'excentricité on va définir les trois centres géométriques : [Ben 06]

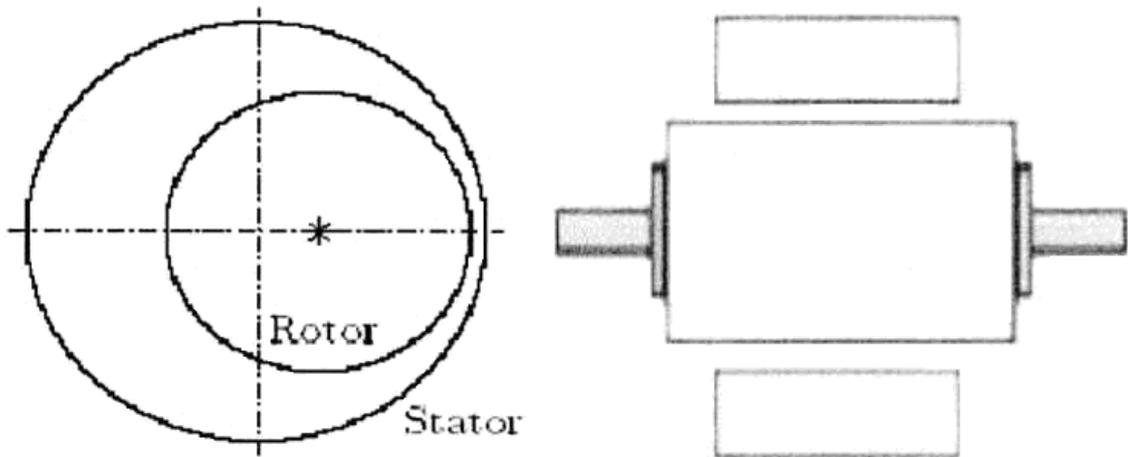
- centre géométrique du stator D (figure I.9).
- centre géométrique du rotor S (figure I.9).
- centre géométrique de rotation C (figure I.10).

Lorsque la machine est saine les trois centres sont confondus (figure I.10).



**Fig.I.9** -Centre géométriques de la machine. **Fig.I.10** -Cas d'une machine saine.

L'excentricité statique apparaît lorsque le centre géométrique du rotor est aligné avec le centre de rotation tandis qu'il est décalé par rapport à celui du stator (figure I.11).

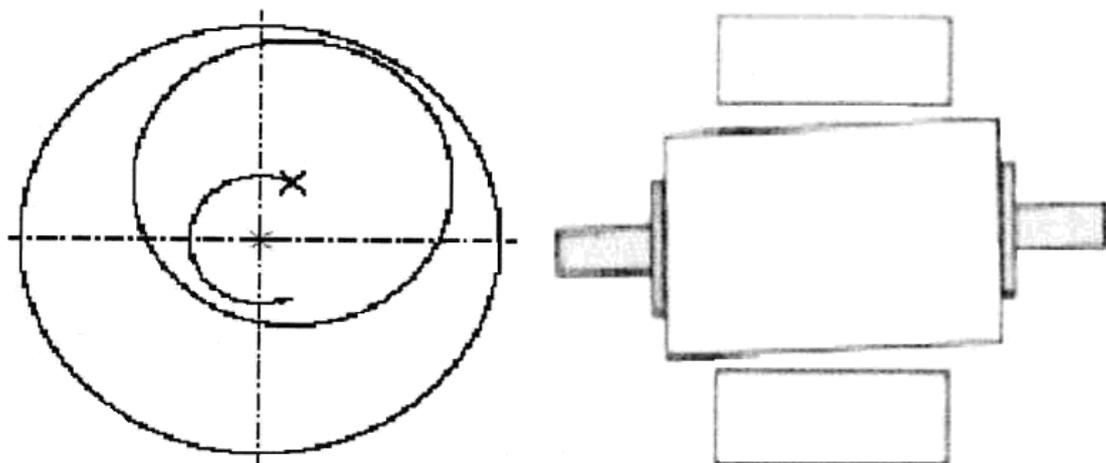


**Fig.I.11** -Excentricité statique

Dans le cas de l'excentricité statique, la portion de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace.

L'excentricité statique peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si l'assemblage du rotor-arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

L'excentricité dynamique se manifeste lorsque le centre géométrique du stator est aligné avec le centre de rotation par centre il est décalé par rapport à celui du rotor (figure I.12).



**Fig.I.12** –Excentricité dynamique

Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas au centre de rotation et la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Ce ci est du a plusieurs causes telles que la flexion de l'arbre de rotor, l'usure ou défaut d'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique, etc. Nous pouvons dire que l'excentricité dépend du temps et de l'espace tandis que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace. (figure I.13).

En réalité les excentricités statiques et dynamiques dans une machine asynchrone ont tendance à coexister.

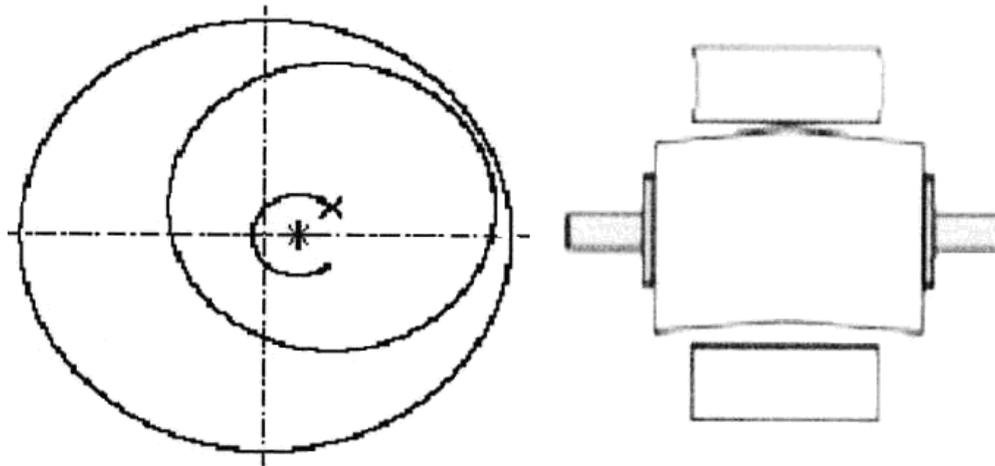
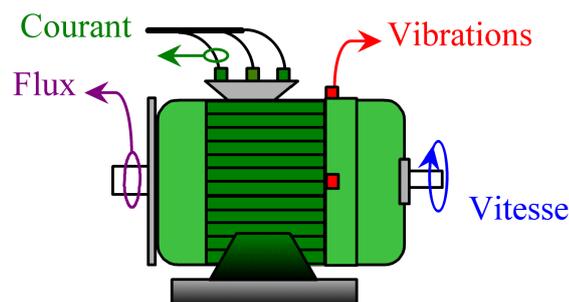


Fig.I.13 –Excentricité mixte

### I.3 Différentes techniques de diagnostic des machines électriques

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement a plusieurs contraintes de différentes natures ; l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur (figure I.14).il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection ; certaines d'entre elles sont basés sur l'observation et la mesure (mesure du champ magnétique ; mesure de bruit ; mesure de vibration ...etc.) Et d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromagnétiques (courant statorique, couple et vitesse de rotation) à celles du moteur sain.



**Fig.I.14 –Les points de mesures. [Lar 05]**

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : [Raz 05][Did 04][Tou 02][Alg 70][Yan 00]

- Les techniques mécaniques ;
- Les techniques chimiques ;
- Les techniques magnétiques et électriques ;

**I.3.1 Techniques mécaniques****I.3.1.1 Diagnostic par mesure des vibrations du moteur**

Toute machine électrique produit du bruit et des vibrations ; leur analyse est peut être employée pour donner des informations sur l'état de la machine .le bruit et les vibrations sont provoqués principalement par des forces qui sont d'origine magnétique. Ces forces sont créés par le champ d'entrefer, dont leur expression est la suivante [Tav 86] [Alg 70] :

(I-1)

Avec :

B : L'induction magnétique.

: La perméabilité magnétiques de l'air.

Les vibrations dans les machines électriques peuvent être captées par des accéléromètres piézoélectriques ; qui sont les capteurs les plus utilisés pour la mesure de ces vibrations en raison de leur fiabilité, de leur gamme de fréquence élevée et de leur robustesse. Après avoir capter les vibrations, une analyse spectrale est effectuée et comparée avec celle du moteur sain. Si les spectres des signaux captés sont différents de ceux du moteur sain, cela indique la présence d'un défaut dans le moteur.

**I.3.1.2 Diagnostic par la mesure de la température**

La machine électrique dissipe une certaine quantité de chaleur due aux pertes mécaniques dans les paliers (frottement et ventilation) et aux pertes électriques dans les conducteurs et les pertes magnétiques dans le fer .il en découlent des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement.[Tou 02][Bac 99]

L'approche thermique ou la méthode de diagnostic par la mesure de la température consiste à mesurer la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite, Si elle dépasse le taux admissible, on déduit une existence du défaut dans le moteur.

### **I.3.2 Diagnostic chimique**

Le diagnostic chimique est basé sur l'analyse des fluides de refroidissement qui sont utilisée pour l'évacuation de la chaleur dans les moteurs a grandes puissances (eau ; air ou huile).La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone, qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement est qui peut être détecte par une technique d'absorption infrarouge.

La méthode de diagnostic chimique est uniquement utilisée dans les moteurs à grande puissance, donc elle n'englobe pas tous les types de machines. [Lar 05][Pen 94]

### **I.3.3 Techniques magnétiques et électriques**

#### **I.3.3.1 Diagnostic par mesure du flux axial de fuite :**

Théoriquement les courants statoriques et rotoriques sont équilibrés ce qui annule le flux de fuite axial, qui est en réalité présent dans toutes les machines électriques à causes des défauts de fabrication .Le flux axial peut être utilisé pour la détection des différents défauts qui surgissent dans les moteurs asynchrones tels que : [Tou 02] [Yan 00] [Jar 04]

- Les ruptures des barres rotoriques et des couronnes de court –circuit.
- Les courts-circuits entre les spires statoriques.
- Les coupures de phases.

Le flux de fuite axial peut être détecte par une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine, ou par un arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de la machine.

Les tensions induites dans les bobines sont captées et analysées puis comparées a celles du moteur sain.

La condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic des défauts est que ce dernier doit avoir une valeur importante. [Lar 05]

#### **I.3.3.2 Diagnostic par l'analyse des grandeurs électriques**

Dans notre étude nous allons utiliser plusieurs techniques de diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil, Ces techniques sont basées sur l'analyse des deux grandeurs électriques: le courant et la tension.

##### **a. Diagnostic par analyse spectrale du courant statorique**

L'analyse spectrale du courant statorique du moteur est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques ou électriques dans les moteurs, et également dans leurs charges

.Les signaux des courants présentent l'avantage d'être facilement mesurables. Et à moindre coût.

**[Lar 05][Sch 95][Kli 90][Ben 00][Tou 01][Tou 01]**

Si on prend le cas d'un moteur sain, Les courants des trois phases statoriques créent dans l'entrefer un flux tournant à la vitesse synchrone .Ce flux va balayer les enroulements rotoriques ce qui provoque la rotation de l'arbre du moteur. La vitesse rotorique augmente et atteint une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme , les enroulements rotoriques sont alors balayés par le flux à la vitesse .A cet instant , le champ crée les enroulements rotoriques est directe (c'est-à-dire qu'il tourne dans le même sens de rotation que le champ crée par les courants statoriques ) et la fréquence des courants dans les enroulements rotoriques est égale à , avec  $s$  représente le glissement de la machine et  $f$  la fréquence des courants statoriques .**[Bac 99]**

**[Raz 01][Yan 00]**

Le schéma de la figure 1-15, permet une meilleure compréhension du fonctionnement de la machine avec un rotor sain ou nous avons les relations suivantes :

$n_s$  : représente la vitesse de synchronisme,  $p$  : le nombre de paire de pôles de la machine.

$n$  : La vitesse de rotation.

$s$  : La vitesse de glissement.

$\sigma$  : Le glissement.

En plus de l'harmonique fondamental, apparaît sur le spectre du courant statorique les harmoniques d'encoches rotoriques à des fréquences qui sont données par l'expression suivante :**[Tou 02]**

**[Tou 01][Tou 01]**

(I-2)

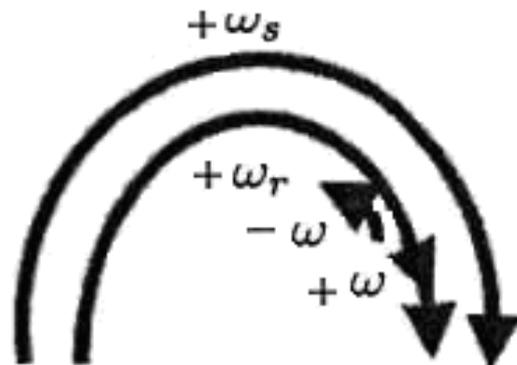
Avec  $f$  : fréquence d'alimentation,  $k$  ordre des harmoniques de temps.  $p$  Nombre de barres rotoriques et  $k$  un nombre entier positif.

Lorsque le défaut de cassure de barres ou d'anneau de court circuit apparaît, il se crée en plus du champ rotorique direct un champ inverse qui tourne à la vitesse . cela est dû au fait que les courants rotoriques sont maintenant directs et inverses suite au déséquilibre des résistances. C'est l'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique qui crée les ondulations de couple et qui induit au stator des forces électromotrices de fréquences .

et , d'où des courants statoriques comportant ces composantes. Les champs créés par ces courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses. Donc par le même processus que celui décrit précédemment, on retrouvera des composantes dans le spectre du courant statorique de fréquences :

$$(I-3)$$

Le fonctionnement de la machine avec défaut de barres ou d'anneau de court-circuit est illustré sur la figure I.15. [Raz 05][Tav 86][Lar 05][Khe 05].



**Fig.I.15** –Schéma de fonctionnement du moteur sain

**Fig.I.16** –Schéma de fonctionnement du moteur défaillant

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression ci-dessous [Lar 05][Tou 02][Pen 94][Dri 04] :

(I-4)

Avec .....

La présence de l'excentricité dans la machine se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences données par l'expression suivante [Lar 05][Khe 05][Pen 94][Dri 04]

(I-5)

Avec la fréquence d'alimentation,  $k$  un entier, le nombre d'encoches rotoriques (barres rotoriques) et le nombre d'ordre d'excentricité :  $=0$  pour l'excentricité statique et  $=1,2,3,\dots$  pour l'excentricité dynamique,  $s$  le glissement,  $p$  le nombre de paires de pôles et

l'ordre des harmoniques de temps de la F.M.M, L'excentricité statique n'engendre aucun harmoniques dans les spectres du courant statorique.

En présence de l'excentricité statique et dynamique c'est-à-dire mixte, il y a création des harmoniques de basses fréquences de part et d'autre du fondamental dont leurs fréquences sont données par la relation ci après

(I-6)

Avec  $k=1, 2, 3 \dots$  et

### **b. Diagnostic par l'approche des vecteurs des courants de Park**

Il existe une autre méthode d'analyse du courant, qui est l'analyse par l'approche des vecteurs des courants de park. [Lar 05][Ben 06][Yan 00][Ben 00]

L'application de la transformation de Park aux courant triphasés, permet d'avoir deux composantes exprimées par les relations suivantes :

(I-7)

Sur la base de ces deux composantes de Park obtenues, deux techniques peuvent être employées en vue du diagnostic des défauts :

### **b.1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park**

Cette technique consiste à visualiser le module des vecteurs des courants de Park dans le domaine fréquentiel. Les trois courants de phases statoriques dans le cas d'une répartition sinusoïdale des enroulements sont donnés par :

(I-8)

Avec :

Courants des trois phases.

: La valeur maximale du courant de la phase.

Si on fait la transformation de Park de ces trois courantes, on obtient :

(I-9)

En calculant le module de Park, on obtient

(I-10)

Nous remarquons dans ce cas que le spectre du module de Park ne contient que la composante continue.

On sait que la répartition non sinusoïdale des enroulements engendre dans le spectre du courant statorique des harmoniques additionnels qui sont les harmoniques d'encoche rotoriques, d'où la forme générale des courants statoriques sera exprimée par l'expression suivante :

(I-11)

Avec  $\omega_1$  et  $\omega_2$  : représentent respectivement les fréquences caractéristiques des différents défauts étudiés et leurs amplitudes,  $\omega_3$  et  $\omega_4$  : représentent respectivement fréquences et les amplitudes des harmoniques d'encoches rotoriques.

On suppose que le moteur est sain, d'où le calcul des fréquences d'encoches rotoriques se fait, en remplaçant (I-2) dans (I-11), on obtient :

(I-12)

La transformation de Park de ces trois courants donne :

(I-13)

En calculant le module de Park, on obtient :

(I-14)

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale des enroulements de la machine à cage sans défaut, nous obtenons dans le spectre du module des vecteurs des courants de Park, en plus de la composante continue et l'harmonique de fréquence  $\omega$ , l'apparition des harmoniques d'encoches rotoriques à des fréquences données par l'expression suivante :

$$k=1,2,\dots \quad (I-15)$$

Avec  $\omega$  la fréquence d'alimentation,  $k$  un entier, et  $p$  le nombre de barres de la cage rotorique.

Le défaut de barres se traduit dans le spectre du courant statorique par la création des harmoniques de part et d'autre du fondamental (équation I-3) et une série d'harmoniques supplémentaires (équation (I-4)). Pour identifier ce type de défaut dans le spectre du module des vecteurs des courants de Park, on remplace (I-3) et (I-4) dans (I-11), d'où les courants de phases se réécrivent sous la forme

s u i v a n t e :

(I-16)

Avec et sont les fréquences caractéristiques du défaut de

barres et le amplitudes des harmoniques caractéristiques du défaut, et les fréquences des harmoniques d'encoches rotoriques et leurs amplitudes respectivement.

La transformation de Park de ces trois courants donne :

(I-17)

En appliquant la transformation de Park de ces trois courants, on obtient l'expression de son module :

(I-18)

A Partir de l'expression ci-dessous, on conclut que le spectre du module des vecteurs des courants de Park dans le cas de ce type de défaut, contient en plus de la composante continue et les

harmoniques d'encoches rotoriques, les fréquences caractéristiques du défaut et une série d'harmoniques, à des fréquences données par les expressions suivantes :

(I-19)

(I-20)

Avec la fréquence d'alimentation, et le nombre de barres de la cage

rotoriques.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique qui conduit aussi à la création d'harmoniques dans le spectre du module des vecteurs des courants de Park et pour les identifier, on remplace (I-5) dans (I-11), d'où les courants de phases se réécrivent comme suite :

(I-21)

Avec sont les fréquences caractéristiques du défaut de l'excentricité

et les amplitudes des harmoniques caractéristiques du défaut.

La transformation de Park de ces trois courants donne :

(I-22)

En calculant le module, on obtient :

(I-23)

A partir de l'expression (I-23), nous constatons que le spectre du module des vecteurs des courant de Park contient en plus de la composante continue et les harmoniques d'encoches rotoriques, les harmoniques caractéristiques du défaut dont leurs fréquences sont données par l'expression suivante :

(I-24)

Avec la fréquence d'alimentation,  $k$  un entier, le nombre de barres de la cage rotorique et le nombre d'ordre d'excentricité : pour l'excentricité statique et

Pour l'excentricité dynamique,  $s$  le glissement,  $p$  le nombre de paires de pôles et  $n$  l'ordre des harmoniques de temps de la FMM, (

En présence de l'excentricité statique et dynamique c'est-à-dire mixte, il y a création des harmoniques de basses fréquences de part et d'autre du fondamental dans le spectre du courant statoriques (équation (I-6)). Ce type de défaut on peut l'identifier dans le spectre du module des vecteurs de courants de Park en remplaçant (I-6) dans (I-11), on obtient :

$$(I-25)$$

Avec  $I_{\alpha}$  et  $I_{\beta}$  les fréquences caractéristiques du

défait de l'excentricité mixte et  $I_{\alpha}$  leurs amplitudes.

La transformation de Park de ces trois courant donne :

(I-26)

En calculant le module, on obtient :

(I-27)

A partir de l'expression (I-27) on conclut qu'en plus de la composante continue, les harmoniques d'encoches rotoriques et les harmoniques caractéristiques du défaut d'excentricité dynamiques apparaissent sur le spectre du module des vecteurs des courants de Park. Les harmoniques de part et d'autre du fondamental à ces fréquences données ci après :

$$k=1,2,\dots \quad (I-28)$$

### b-2 Forme de Lissajous

Cette technique consiste à visualiser l'évolution de la composante quadrature du courant de Park en fonction de la composante directe. Dans le cas d'un moteur sain, la fonction à une forme circulaire, son diamètre est proportionnel à l'amplitude du courant statorique. Ce cercle représente la forme de Luscious. Le changement de la forme et de l'épaisseur du graphe indique l'existence d'un défaut. [Lar 05][Ben 06]

### I.4 Différents modes d'alimentation des moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone triphasé est maintenant largement utilisé dans les applications nécessitant une vitesse variable. Il peut faire appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ces machines ont la réputation d'être robustes et d'être adaptées à des applications de forte puissance.[Bol 02]

Le développement de l'industrie dans l'utilisation des entraînements électriques a exigé le fonctionnement de la machine à vitesses variables. Pour ce faire, plusieurs procédés sont utilisés, parmi eux, nous citons :

- Modification du nombre de paire de pôles.
- Cascade hyposynchrone.
- Action sur le glissement (tension d'alimentation, résistance rotorique..).
- Variation de la fréquence d'alimentation.

Suivant ces modes de variation de vitesse de la machine asynchrone, on distingue plusieurs modes d'alimentation :

- Alimentation par tensions du réseau industriel (amplitude et fréquence constantes)
- Alimentation par autotransformateur (amplitude variable et fréquence constantes)
- Alimentation par convertisseur statique :
  - Gradateur (amplitude variable et fréquence constante)
  - Cycloconvertisseur.

- Onduleur.

Les commandes avancées de la machine nécessitant la variation de la fréquence d'alimentation. C'est à cause développement de l'électronique de puissance, que cette exigence est rendue possible. Les principales techniques d'alimentation permettant d'obtenir des tensions à fréquence variable à partir du réseau à tension et fréquence constantes, sont : **[Lar 05]**

- Cycloconvertisseur
- Association redresseur-onduleur.

La première technique est utilisée pour les grandes puissances aux faibles vitesses (machine de traction, machine d'outillage).

La deuxième technique est la plus utilisée de nos jours, on branche aux bornes du réseau un convertisseur alternatif-continu (redresseur) qui alimente un second convertisseur continu-alternatif (onduleur). Par la commande d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de ce dernier, on arrive à obtenir des tensions à amplitude et fréquences désirées.

D'après ces deux structures de variateurs de vitesse associées aux moteurs asynchrones. On retiendra la solution utilisant les onduleurs qui sont largement utilisées actuellement dans diverses applications industrielles.

#### **I.4.1 Onduleur**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce aux semi conducteurs, On relie chacune des bornes du récepteur tantôt à l'une, tantôt à l'autre des bornes d'entrée, On obtient une tension de sortie alternative (figure I.16). La fréquence des changements de connexions donne la fréquence de cette tension.

L'onduleur est dit autonome, si la fermeture et l'ouverture des connexions entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi conducteurs.

La commande de l'onduleur est d'une très grande importance. Les stratégies de commande les plus répondues sont :

- Si on effectue aux semi-conducteurs qu'un cycle de fermeture-ouverture par période des grandeurs de sortie, On dit alors que l'onduleur est commandé en pleine onde.
- Si on utilise des interrupteurs statiques fonctionnant à fréquence de commutation élevée (imposer un fonctionnement de plusieurs cycles de fermeture-ouverture par période), dans le but de fermer, par alternance, des ondes à plusieurs créneaux de largeurs variable. On dit alors que l'onduleur est commandé en MLI.

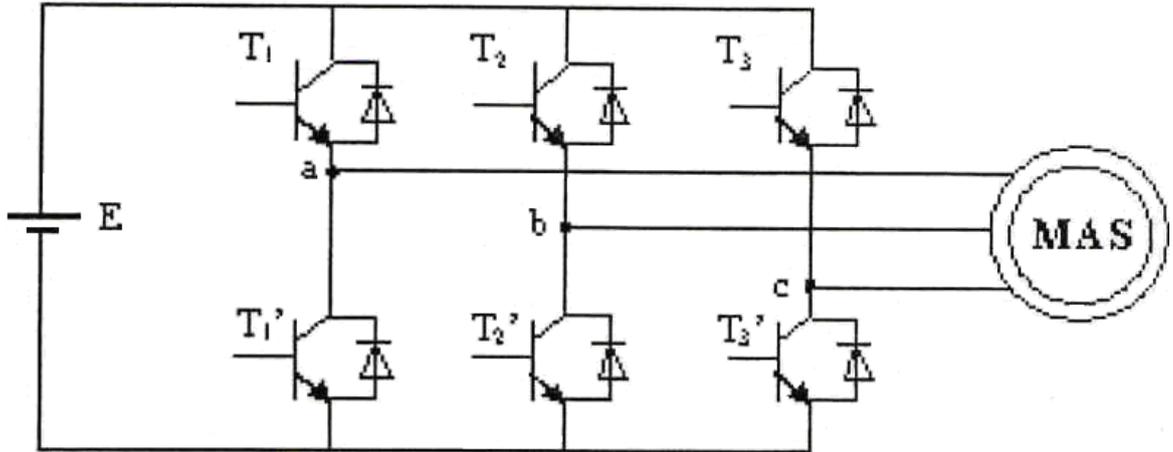


Fig.I.17 –Structure d'un onduleur de tension triphasé alimentant une machine asynchrone

**Onduleur à commande en MLI**

Habituellement, pour réaliser une commande MLI triphasée on génère un système sinusoïdal de tension de référence  $v_{Ar}, v_{Br}, v_{Cr}$ , déphasé de  $120^\circ$  que l'on compare à une tension de modulation commune afin de produire trois signaux de commande de type MLI bipolaire (ou unipolaire). La figure I.18 représente le schéma de principe d'une commande MLI sinus-triangle triphasée.

**Modulantes :**

$\varphi = 0^\circ$

Comparateur

$\varphi_R =$

$\varphi = -120^\circ$

Comparateur

Phase B

$\varphi = -240^\circ$

Comparateur

Phase C

Amplitude :  $V_m$  Fréquence :  $f$

**Porteuse  $v_p$**

Amplitude :  $V_p$  Fréquence :

Fig.I.18 : Schéma de principe d'une commande «sinus -triangle » triphasée

La technique de commande MLI permet un réglage de la fréquence et la valeur efficace de la tension de sortie par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation  $m$ , qui influe principalement sur le contenu d'harmoniques

de l'onde de sortie.

- Le rapport de réglage  $\alpha$ , et  $V_m$  étant respectivement la valeur maximale de la

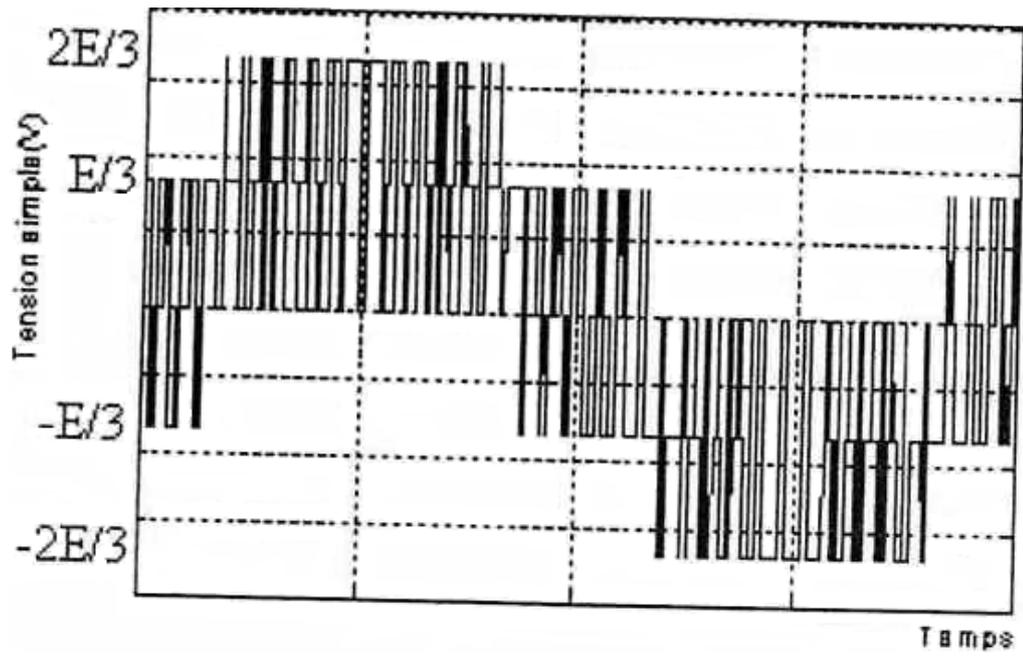
référence et la valeur de crête de la porteuse.

Une forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI est présentée par la figure I.19.

Le développement en série de Fourier de la tension de sortie simple de fréquence  $f$ , comporte des harmoniques dont les plus importants peuvent se diviser en familles :

- La première famille est centrée sur la fréquence  $f$  et comprend, outre le terme de rang  $m$ , la paire d'harmoniques de rang  $m-2$  et  $m+2$ ,  $m-4$  et  $m+4$ .....
- La seconde famille est centrée sur la fréquence  $2f$  et comprend la paire d'harmoniques de rang  $2m-1$  et  $2m+1$ ,  $2m-3$  et  $2m+3$ .....
- La troisième famille est centrée sur  $3f$  et comporte les harmoniques de rang  $3m$ ,  $3m-2$  et  $3m+2$ ,  $3m-4$  et  $3m+4$ .....

L'étude du spectre de la tension de sortie a montré que l'on obtient un harmonique fondamental dont la fréquence et l'amplitude dépendent de celles de la référence et des harmoniques importantes dont leurs fréquences sont proches de celle de la porteuse (très élevées). Le filtrage est donc très facile. Cette méthode qui permet d'obtenir un harmonique fondamental variable en amplitude et en fréquence est très utilisée dans les variateurs de vitesse pour les machines à induction.



**Fig.I.19** : forme d'onde de la tension simple de sortie d'onduleur à commande en MLI

## II.1 Modélisation du moteur asynchrone a cage d'écureuil

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses qui font l'objet de la suite de cette partie. Nous développerons ensuite les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques pour permettre la résolution numérique du modèle proposé. [Did 04] [Lar 05] [Tou 02] [Ben 06]

### II.1-1 Hypothèses simplificatrices [Did 04]

Nous considérons un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la perméabilité magnétique de fer est infinie.
- la saturation du circuit magnétique est négligeable.
- l'hystérésis et le courant de Foucault sont aussi négligeables.
- les surfaces statorique et rotorique sont parfaitement lisses, le flux magnétique résultant produit par l'entrefer est donc radial.
- on néglige les effets d'inclinaison de l'encochage pour l'armature dentaire.

### II.1-2 Equations des tensions

La figure II-1, montre le circuit électrique équivalent de la cage rotorique, les barres rotoriques et les portions d'anneaux qui les court-circuitent sont représentées par leurs résistances et inductances de fuite correspondantes

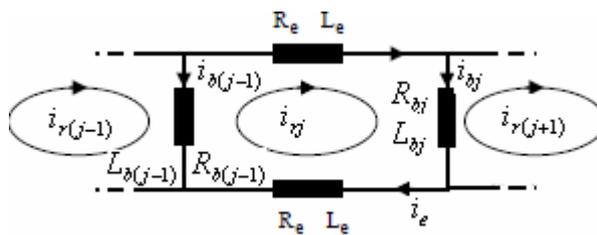


Figure II.1 Circuit électrique équivalent de la cage d'écureuil.

#### II.1.2-1 Equations du stator :

Ces équations vont nous permettre d'associer le vecteur de tension, le vecteur de courant ainsi que le vecteur de flux pour les trois phases statoriques.

(II.1)

Où  $\mathbf{u}$  représente le vecteur de tension,  $\mathbf{i}$  le vecteur de courant,  $\mathbf{\psi}$  le vecteur de flux tel que

(II.2)

La matrice des résistances  $\mathbf{R}$  ou sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques, se met sous la forme suivante :

(II.3)

Où  $R_s$  : est la résistance de chaque phase statorique.

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants rotoriques notés ici  $\mathbf{i}_r$  interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation ci-dessous :

(II.4)

La matrice inductance  $\mathbf{L}$  se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

Où  $L_{ss}$  (II.5)

La matrice des inductances mutuelles entre les trois phases statoriques et les trois phases rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

(II.6)

Le vecteur regroupe les trois courants rotoriques :

(II.7)

On remplace l'équation (II-4) dans l'équation (II-1), on obtient :

(II.8)

Le terme peut être représenté sous la forme :

(II.9)

: est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

: représente la vitesse mécanique du rotor.

L'équation (II.8) devient :

(II.10)

L'ordre du système d'équations différentielles obtenu est de 3.

### **II.1.2-2 Equation du rotor :**

La cage d'écureuil est constituée de barres, reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par les anneaux de court-circuit, elle peut donc se représenter par un circuit maillé ou

chaque maille est constituée de deux barres adjacentes, les deux portions d'anneaux les relient à chaque extrémité (fig.II.2).

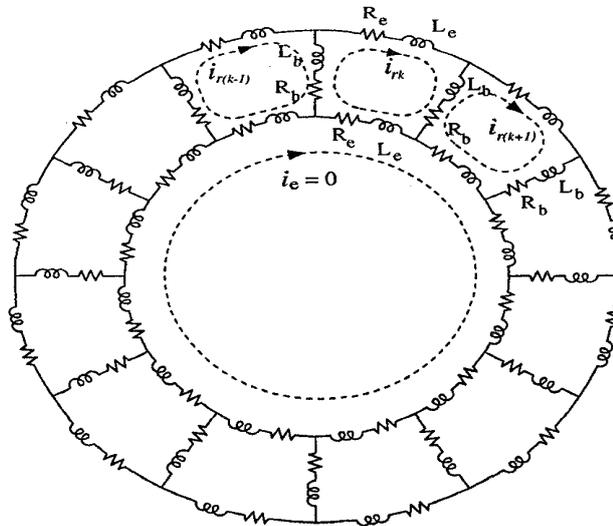


Fig.II.2: Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil.

La modélisation de la cage rotorique consiste à écrire les équations des tensions de mailles parcourues par courants indépendants. A partir de la figure II.1 on tire les équations des tensions des mailles rotoriques :

$$(II.11)$$

: représente le vecteur des flux totaux à travers les mailles rotoriques, est leurs courants correspondants.

$$(II.12)$$

$$(II.13)$$

:est le vecteur des tensions des mailles rotoriques

$$(II.14)$$

vecteur des courants des mailles rotoriques, et la matrice des résistances des mailles rotoriques possède :

(II.15)

Avec : résistances d'une barre rotorique.

: Résistances des segments d'anneaux de court-circuit.

Les inductances de rotor à cage d'écureuil

(II.16)

Avec :

: L'inductance de magnétisation de chaque maille rotorique.

et Sont respectivement les inductances de fuite d'une barre rotorique et d'un segment de l'anneau de court-circuit.

: L'inductance mutuelle entre la et la maille rotorique.

Les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques sont donné par :

(II.17)

Les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les segments de l'anneau de court-circuit sont négligées, ceci est représenté par un zéro dans la dernière colonne de la matrice.

Dans le cas d'un entrefer uniforme la matrice est égale à sa transposée .

En remplaçant l'équation (II.12) dans (II.11), on obtient :

(II.18)

Sachent que :

(II.19)

Il en résulte que :

(II.20)

Le système obtenu est un système d'équations différentielles d'ordre . Afin d'obtenir le système d'équations électriques global de la machine, on rassemble les deux systèmes (II.10) et (II.18).sous la forme suivante :

(II.21)

En posant :

(II.22)

On obtient :

(II.23)

Le système ainsi obtenu est de           équations différentielles a coefficients variables.

### **II.1-3 Equations mécaniques**

L'équation du mouvement dépend des caractéristiques de la charge qui diffère d'une application à l'autre. Dans cette étude, on ne prend en considération que le couple d'inertie et le couple extérieur. En outre, l'équation mécanique s'écrit sous la forme suivante : **[Lar 05]**

(II.24)

et :

(II.25)

Avec :

J : le moment d'inertie du rotor -charge combinée.

          le couple de charge.

          : L'angle de déplacement.

          : la vitesse de rotation.

          : le couple électromagnétique produit par la machine qui s'exprime comme suit :

(II.26)

Dans le but de faire une étude du fonctionnement de la machine du point de vue électromécanique l'équation mécanique générale donnée dans (II.24) est associée au système d'équations électriques (II.10). Le modèle complet de la machine prend la forme suivante :

(II.27)

Ce qui donne :

(II.28)

D'où la forme générale suivante :

(II.29)

Nous avons donc obtenu un système d'équations différentielles d'ordre . Les seuls éléments qui restent à déterminer sont les inductances. L'approche que nous allons utiliser pour le calcul des différentes inductances est l'approche des fonctions d'enroulements dont nous avons décrit auparavant l'intérêt de son utilisation pour une modélisation dédiée au diagnostic

## **II.2 Prise en compte des harmoniques d'espaces dans le calcul des inductances de la machine**

Les harmoniques d'espace apparaissent lorsque la forme de la force magnétomotrice n'est pas sinusoïdale le long de l'entrefer .pour intégrer ce modèle au modèle de la machine asynchrone, une méthode consiste a calculer les différents inductances de la machine a partir de l'expression de l'induction de l'entrefer créée par chaque phase statorique

.l'induction d'entrefer qui dépend de la force magnétomotrice créée par les trois phases statorique, est décomposée en séries de fourrier pour permettre de prendre en compte les harmoniques les plus importants.[28]

Comme bobinage de la machine asynchrone peut prendre différentes formes, nous devons introduire plusieurs coefficients d'étalement , le coefficient d'inclinaison et le

coefficient de bobinage propre a chaque phase statorique. Ces coefficients sont fonction du rang de l'harmonique de l'induction d'entrefer considéré, leurs expressions mathématiques sont données ci-après:

$$(II.30)$$

$$(II.31)$$

$$(II.32)$$

Où les termes  $m_e$ ,  $n_s$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$  représentent le nombre d'encoches par pole et par phase, le nombre d'encoches statoriques, la valeur du raccourci utilisée pour le bobinage statorique et la valeur de l'inclinaison des encoches statoriques et/ou rotoriques. Par conséquent, en introduisant un coefficient global égal au produit des trois coefficients précédemment décrits ( $= * *$ ),

### **II.3 Calcul des inductances de modèle de la machine**

Toutes les inductances du système sont calculées à partir de l'expression de l'induction d'entrefer créée par chaque phase statorique, dont le développement est donné dans l'annexe .suivant cette méthode en déterminant le flux propre et le flux mutuel de chacune des phases.

#### **II.3-1 Inductance de magnétisation d'une phase statorique:**

Le calcul du flux magnétisant d'une phase statorique s'effectue grâce à la relation :

$$(II.33)$$

Où les indices  $i$  et  $j$  peuvent se substituer indépendamment à la lettre  $a$ ,  $b$  ou  $c$ . les terme  $l$  et  $r$  représente la longueur active du circuit magnétique et  $g$  le rayon moyen de l'entrefer.

L'expression du flux d'une phase statorique donne :

(II.34)

Ce qui nous permettons d'obtenir l'expression de l'inductance magnétisante

Correspondante:

(II.35)

Où le terme  $(2k+1)$  représente toujours le rang de l'harmonique d'espace considéré.

### **II.3-2 Inductance mutuelle entre phases statoriques:**

Pour le calcul de ces inductances, il suffit d'introduire l'angle mécanique dans le calcul du flux .cet angle représente l'écart angulaire entre la phase  $i$  et la phase  $j$  statorique. L'expression de l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques nous donne:

(II.36)

Où l'angle est égale à pour un stator triphasé.

### **II.3-3 Inductances mutuelles entre les phases statoriques et les boucles rotoriques:**

Le calcul de ces inductances s'effectue en introduisant le coefficient global rotorique . (Notre rotor étant à cage, seul le coefficient d'inclinaison est pris en compte) et l'angle mécanique entre les phases statoriques  $i$  et les boucles rotoriques  $m$  pour le calcul du flux, ce qui nous donne:

(II.37)

**Et**

(II.38)

En divisant cette expression par le courant concerné, nous obtenons pour l'expression de l'inductance mutuelle entre les phases statoriques et les boucles rotoriques :

(II.39)

Où

(II.40)

De plus, comme les circuits électriques statoriques sont en quadrature avec l'anneau de court circuit intérieur, les inductances mutuelles correspondantes sont nulles.

#### **II.3-4 Inductance de magnétisation d'une boucle rotorique**

Comme pour le calcul des inductances de magnétisation statoriques, l'inductance magnétisante d'une boucle rotorique est déduite de l'expression du flux correspondant donné par l'expression : **[Tar 09]**

(II.41)

L'inductance magnétisante est alors égale à:

(II.42)

#### **II.3-5 Inductances mutuelles entre les boucles rotoriques:**

Ces inductances se calculent en introduisant l'angle mécanique dans le calcul du flux .cet angle représente l'écart angulaire entre la boucle rotorique  $m$  et la boucle rotorique  $n$  de la cage d'écureuil .l'expression de l'inductance mutuelle entre deux boucles rotoriques donne :

(II.43)

Où les indices  $m$  et  $n$  peuvent être remplacés indépendamment par les nombres  $1 \dots N_r$ .

Comme toutes les expressions des inductances dépendent de la valeur de certaines grandeurs ( $l$ ,  $r$ ,  $g$  ou encore  $N_r$ ), nous avons dû effectuer des mesures géométriques directement sur la machine asynchrone concernée. La connaissance de ces paramètres nous permet de représenter la forme des inductances mutuelles entre les bobinages statoriques et rotoriques pour un nombre d'harmoniques d'espace fixé.

## **II.4 Modélisation des défauts**

Nous allons étudier dans ce qui suit les défauts les plus fréquents qui surgissent dans les moteurs asynchrones au niveau du rotor (cassure de barres et excentricité), et de mettre en évidence les modifications qu'il faut apportées au modèle du moteur sain décrit auparavant.

### **II.4-1 Modélisation des ruptures des barres**

La rupture d'une barre rotorique est modélisée soit par élimination de la ligne et de la colonne correspond à la barre cassée dans la matrice des résistances et des inductances du moteur sain soit par augmentation de la résistance de la barre cassée. [Lar 05][Ben 06]

La modélisation par élimination consiste à considérer la rupture totale de la barre, c'est-à-dire un courant nul dans la barre cassée et une résistance infinie (circuit ouvert).

Effectivement le courant de la barre cassé est éliminé (Fig. II.3) et les deux courants et

des deux mailles adjacentes sont substitués par un seul courant [1]

Cela est introduit dans la matrice des résistances et des inductances par l'addition des deux lignes et des colonnes correspondant aux deux courants.

Le courant est donc éliminé ainsi que la tension correspondante. De cette façon, l'ordre du système à résoudre diminue.

Fig.II.3: Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil.

En réalité, le courant dans la barre cassée n'est pas jamais nul. Les barres ne sont pas isolées du circuit magnétique du rotor, il existe toujours un courant qui passe par les tôles du rotor. Dans ce cas pour simuler la rupture d'une barre. Pour ce faire, il suffit d'augmenter la résistance de la barre cassée. La procédure consiste à additionner à la matrice des résistances rotoriques une nouvelle matrice ou les éléments non nuls de cette matrice correspondent aux éléments défailants. Dans le cas où le défaut concerne la barre  $k$  par exemple, la matrice s'écrit comme suit :

(II.44)

Il faut noter que l'ordre du système d'équations à résoudre reste le même que celui dans cas sans défaut et seuls certains éléments de la matrice sont modifiés. Cette dernière méthode est adoptée dans notre étude, ou l'estimation de la résistance ajoutée et de la résistance d'une barre saine.

#### **II.4.2 Modélisation des défauts d'excentricité**

Pour calculer la nouvelle fonction d'enroulement on utilise la rotation suivante:

(II.45)

: est la fonction d'inverse d'entrefer

(II.46)

Les équations de fonction d'enroulements rotorique sont données par

(II.47)

Avec  $j$  est le numéro de la barre considérée.

#### **II.4.2.1 Calcul les Inductances avec excentricité statique**

- **Inductances magnétisantes et leurs dérivées**

Les inductances magnétisantes de rotor avec excentricité statique et leurs dérivées sont :

(II.48)

(II.49)

(II.50)

(II.51)

(II.52)

- **Inductances mutuelles entre les mailles rotorique et leurs dérivées**

Les inductances mutuelles de rotor avec excentricité statiques sont:

(II.53)

**La dérivée de l'inductance mutuelle du rotor avec excentricité statique est :**

- **Inductances mutuelles entre stator et les mailles rotoriques et leurs dérivées**

Les inductances mutuelles entre chaque phase statorique et les mailles rotoriques est :

(II.55)

(II.56)

La dérivée de l'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et les mailles rotoriques est

(II.57)

(II.58)

#### **II.4.2.2 Calcul des inductances avec excentricité dynamique**

Pour calculer la nouvelle fonction d'enroulement on utilise la relation suivante: [Tar 09]

(II.59)

$g^{-1}(\varphi)$  est la fonction d'inverse d'entrefer

(II.60)

Les équations de fonction d'enroulement rotorique donné par

(II.61)

- **Inductances magnétisantes et leurs dérivées**

L'inductance magnétisante de rotor avec excentricité dynamique est :

(II.62)

La dérivée de l'inductance magnétisante de rotor avec excentricité statique est:

(II.63)

- **Inductances mutuelles entre les mailles rotorique et leurs dérivées**

L'inductance mutuelle du rotor avec excentricité dynamique est:

La dérivée de l'inductance mutuelle du rotor avec excentricité statique est

(II.65)

- **Inductances mutuelles entre stator et les mailles rotoriques et leurs dérivés:**

Les inductances mutuelles entre chaque phase statorique et les mailles rotoriques est:

(II.66)

(II.67)

Le dérivé d'inductance mutuelle entre chaque la phase statorique et les mailles rotoriques

(II.68)

(II.69)

#### **II.4.2.3 Calcul les Inductances avec excentricité mixte**

Pour calculer la nouvelle fonction d'enroulement on utilise la relation suivant:

(II.70)

$g^{-1}(\varphi)$  est la fonction d'inverse d'entrefer

(II.71)

Les équations de fonction d'enroulement rotorique donné par :

(II.72)

- **Inductance magnétisante:**

L'inductance magnétisante de rotor avec excentricité mixte est :

(II.73)

(II.74)

(II.75)

(II.76)

- **inductances mutuelles entre les mailles rotorique :**

Inductances mutuelles de rotor avec excentricité mixte est:

(II.77)

(II.78)

- **Inductances mutuelles entre stator et les mailles rotoriques :**

L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et les mailles rotoriques est :

(II.80)

(II.81)

## **II.5 Modélisation de l'onduleur MLI**

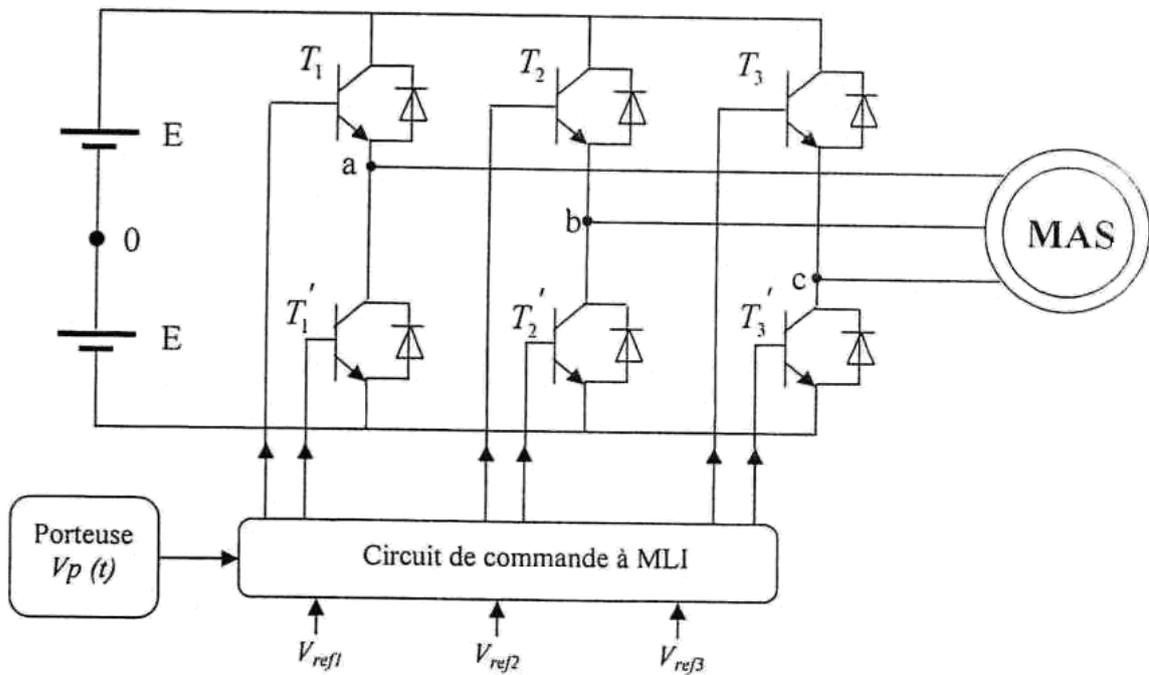
La figure II.4 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension alimentant une machine asynchrone. L'onduleur est placé entre une source de tension continue supposée parfaite.

Il est constitué des interrupteurs statiques et montés en antiparallèle par des diodes de récupération, afin de renvoyer le courant négatif vers la source. [Lar 05]

Le pilotage de l'onduleur se fait par des fonctions logiques, les tensions appliquées à la machine se déduisent de la tension d'entrée de l'onduleur « E » et des signaux logiques caractérisant l'état de chaque interrupteur :

Si alors est passant et est ouvert.

Si alors est ouvert et est passant.



Avec  $i=1, 2, 3$

Fig.II.4 : Schéma de principe d'un onduleur à MLI

Les tensions composées aiguillées par l'onduleur sont :

(I-30)

Soit sous forme matricielle :

(I-31)

Vu la symétrie de la matrice et le couplage étoile de l'enroulement statorique, nous avons :

(I-32)

Les tensions simples s'écrivent :

(I-33)

L'onduleur étant commandé par la technique à MLI, qui compare des signaux l'un triangulaire nommé porteuse et l'autre sinusoïdal dit référence (voir figure II.6-a). A leurs intersections, des ordres d'allumage ou d'extinction sont envoyés aux interrupteurs correspondants.

On définit l'équation des deux droites donnant la porteuse par :

(I-34)

Avec  $A$  et  $f$  Sont respectivement l'amplitude et la fréquence de la porteuse.

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude  $A$  et de fréquence  $f$  :

Le signal de commande du premier bras et la tension simple à la sortie de l'onduleur correspondante sont présentés par les figures II.6-b et -c.

Les simulations ont été réalisées pour un moteur triphasé à cage dont les paramètres sont donnés en annexe A. Les résultats sont obtenus par l'intégration du système d'équations électromécaniques décrit dans le chapitre II du moteur en utilisant la méthode de Runge-kutta d'ordre 4. Le programme de calcul a été élaboré langage MATLAB (programme).

L'analyse spectrale des signaux obtenus est effectuée par l'algorithme de la transformée de Fourier rapide FFT sous MATLAB.

L'étude de la machine est faite pour deux types d'alimentations :

- Alimentation par un système de tensions sinusoïdales équilibrées.
- Alimentation avec onduleur de tension à commande MLI.

Pour les deux modes différents d'alimentations nous avons effectué les simulations sur plusieurs cas de fonctionnement du moteur :

- Fonctionnement d'un moteur sain.
- Fonctionnement d'un moteur sain en tenant compte des harmoniques d'espace ;
- Fonctionnement d'un moteur avec défaut de barres ;
- Fonctionnement de la machine avec défaut de barres en tenant compte des harmoniques ;
- Fonctionnement d'un moteur avec défaut d'excentricité mixte (statique et dynamique) ;

Le type de modélisation choisi permet d'étudier indépendamment l'influence de chaque harmonique d'espace sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone. De plus, la prise en compte des harmoniques de temps (tensions d'alimentation) permet, en plus de l'étude spécifique aux harmoniques d'espace, d'analyser l'influence de ceux-ci sur ces mêmes grandeurs. La possibilité de prendre en compte un quelconque harmonique d'espace et/ou un quelconque harmonique de temps permet d'étudier le contenu harmonique des grandeurs temporelles de la machine pour un point de fonctionnement donné.

## **III.1 Fonctionnement de la machine sans défaut**

### **III.1-1 Analyse spectrale du courant statorique**

#### **III.1.1-1 Alimentation sinusoïdale**

La simulation du modèle du moteur à cage est effectuée pour un couple de charge 6 N.m à l'instant  $t = 1s$ . Les figures III.1a et b présentent les grandeurs mécaniques du moteur

sans défaut. Le courant statorique et le zoom d'une portion de son régime permanent sont représentés respectivement par les figures III.2-a et -b.

Le spectre du courant est illustré respectivement par la figure III.2-c

Nous constatons que le spectre de courant statorique ne contient que l'harmonique fondamental de fréquence 50 Hz.

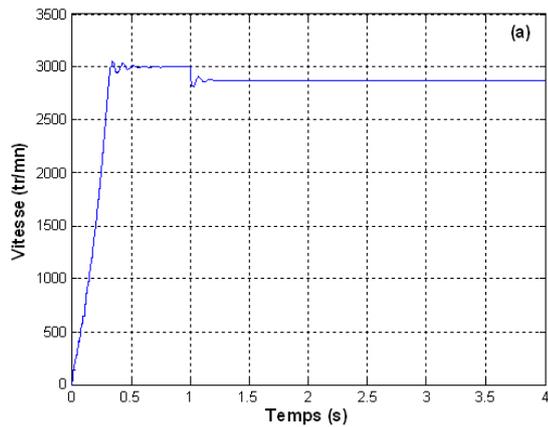
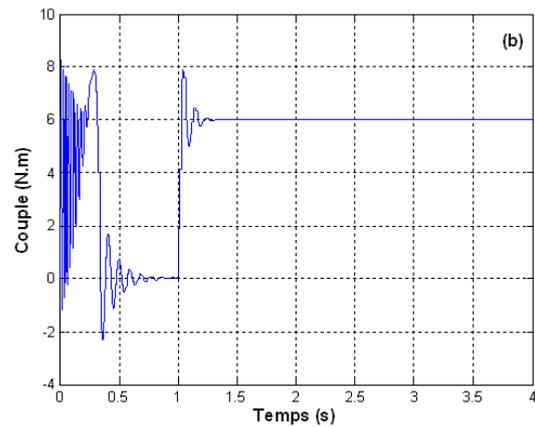


Figure III.1 : Caractéristiques



caractéristiques d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale.

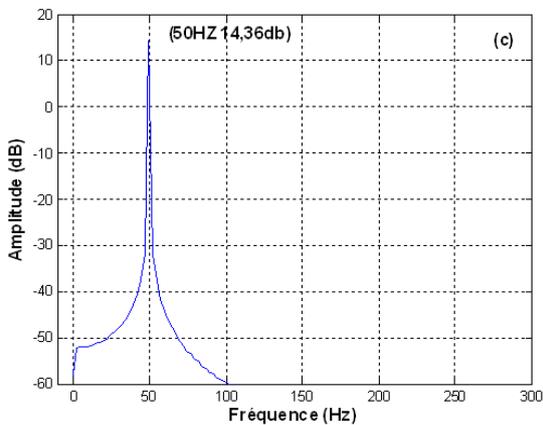
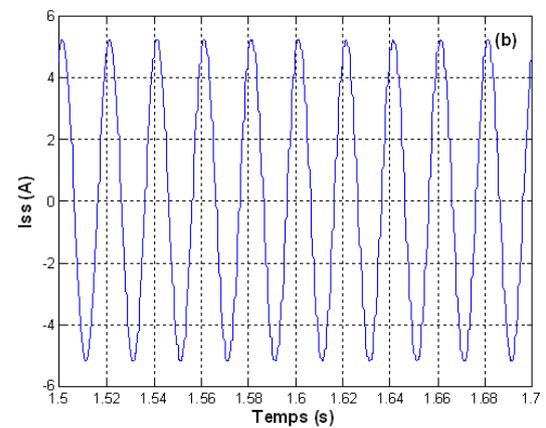
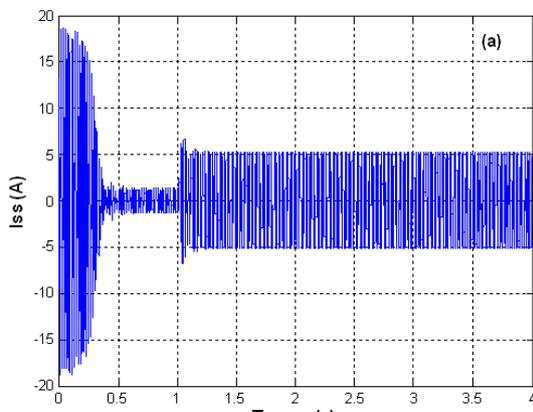
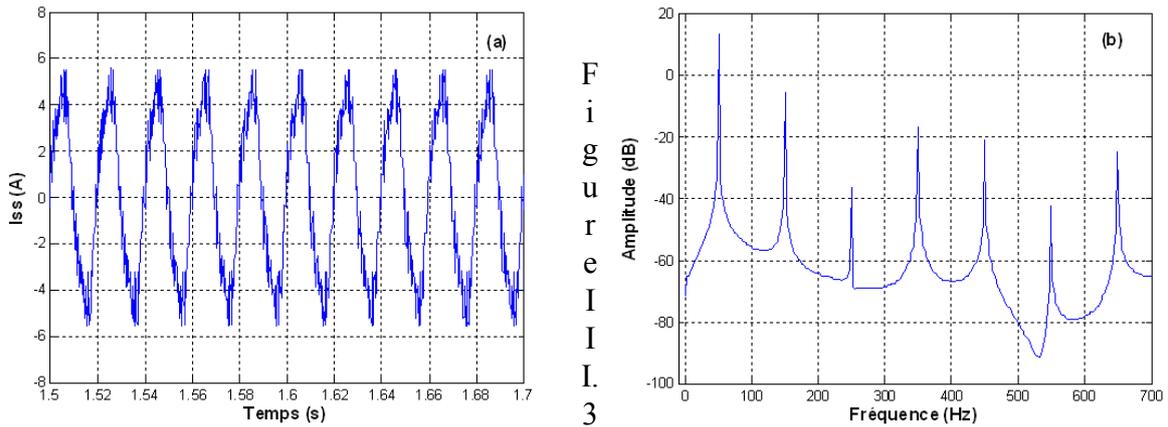


Figure III.2 Cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale.  
Courant statorique et son spectre.

**III.1.1-2 Alimentation par onduleur à MLI**

D'après la figure III.3-b nous remarquons que le spectre du courant statorique contient en plus de l'harmonique fondamental harmonique supplémentaire. Il s'agit de ceux créés par l'onduleur, c'est-à-dire une alimentation non sinusoïdale.



Cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI,  
(a) courant statorique en régime permanent (b) spectre du courant respectivement

**III.1-2 Approche des vecteurs des courants de Park**

**III.1.2-1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park**

**III.1.2.1-1 Alimentation sinusoïdale**

La simulation du moteur sain avec une alimentation sinusoïdale sous une charge de 06 Nm, nous permet de visualiser le module des vecteurs des courants de Park en régime permanent

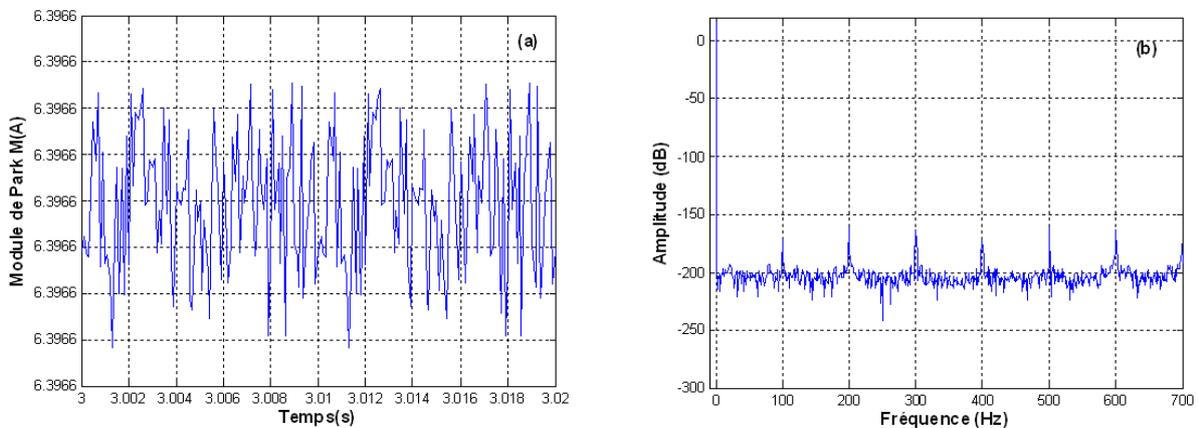


Figure III.4 Cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale

(a) Module des courants de Park et (b) son spectre

### III.1.2.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

Le but de cette simulation est de pouvoir analyser l'effet de l'association onduleur –machine en utilisant cette technique de diagnostic des défauts. Dans un premier lieu la simulation du moteur alimenté par un onduleur à MLI est faite pour une charge de 06 Nm.

Le module des vecteurs des courants de Park et son spectre sont illustrés respectivement par la figure III.5 a et b. On remarque que l'effet des harmoniques de temps se traduit par la création des ondulations dans le module des courants de Park (fig.III.5a). Le spectre contient en plus de la composante continue d'autres harmoniques qui sont dus aux harmoniques de temps (fig.III.5-b).

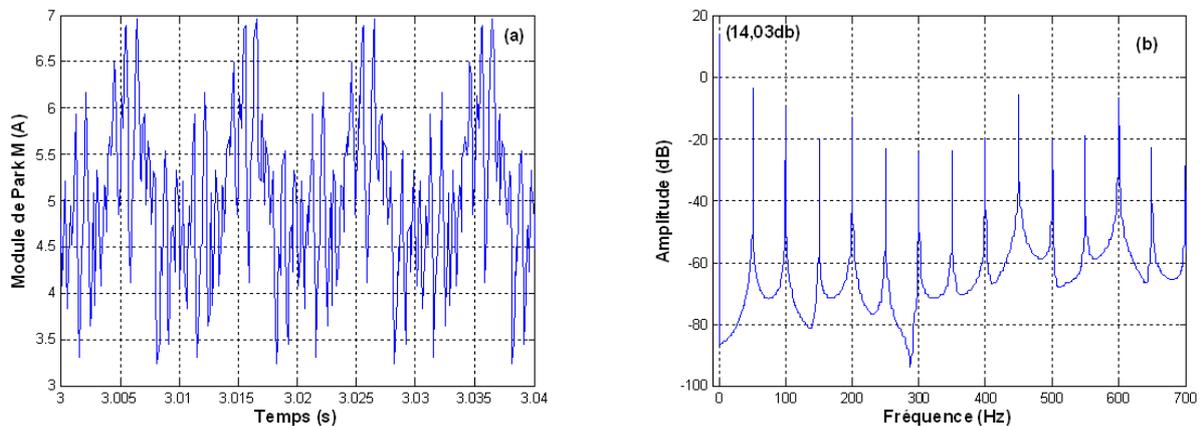


Figure III.5 Cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI  
(a) Module des courants de Park et (b) son spectre.

### III.1.2-2 Forme de Lissajous

#### III.1.2.2-1 Alimentation sinusoïdale

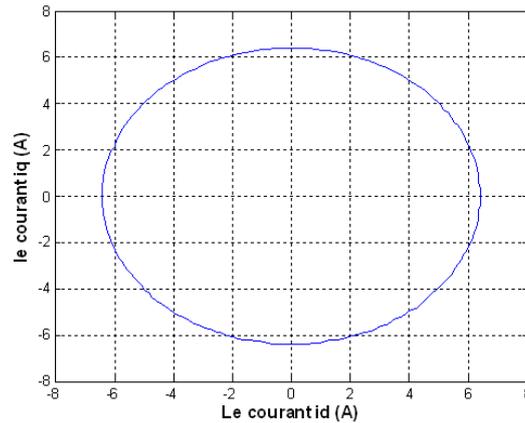


Figure III.6 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté  
Par une source sinusoïdale.

La forme de Lissajous obtenue a une forme circulaire centrée à l'origine ; son diamètre est égal à l'amplitude du courant statorique (fig.III.6).

### III.1.2.2-2 Alimentation par onduleur à MLI

La figure III.7 illustre la forme de Lissajous dans le cas du fonctionnement du moteur sain alimenté avec onduleur MLI, sous une charge de 06 Nm .

La forme de la figure obtenue contient des ondulations et se diffère de la forme circulaire obtenue dans le cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale. Ceci est dû à la présence des harmoniques de temps créés par l'onduleur.

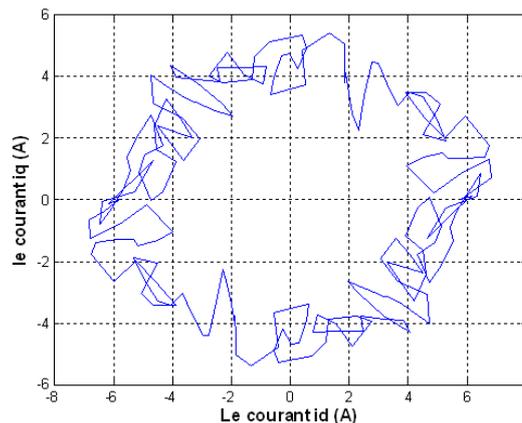


Figure III.7 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI  
avec une charge de 6 Nm

## III.2 Fonctionnement de la machine en tenant compte des harmoniques d'espace

### III.2-1 Analyse spectrale du courant statorique

#### III.2.1-1 Alimentation sinusoïdale

La figure III.8-a présente le courant statorique en régime permanent d'un moteur avec 15 harmoniques d'espace ( ). Le spectre du courant est illustré respectivement par la figure III.8b et c.

On remarque que les amplitudes des courants statoriques augmentent en présence des harmoniques d'espaces. Les harmoniques d'espace se manifestent aussi par création des battements dans la forme du courant statorique.

Le contenu spectral du courant statorique (figure III.8b) ne se limite pas seulement à la composante fondamentale de fréquence 50 Hz. En effet, les harmoniques d'espace et de temps contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal.

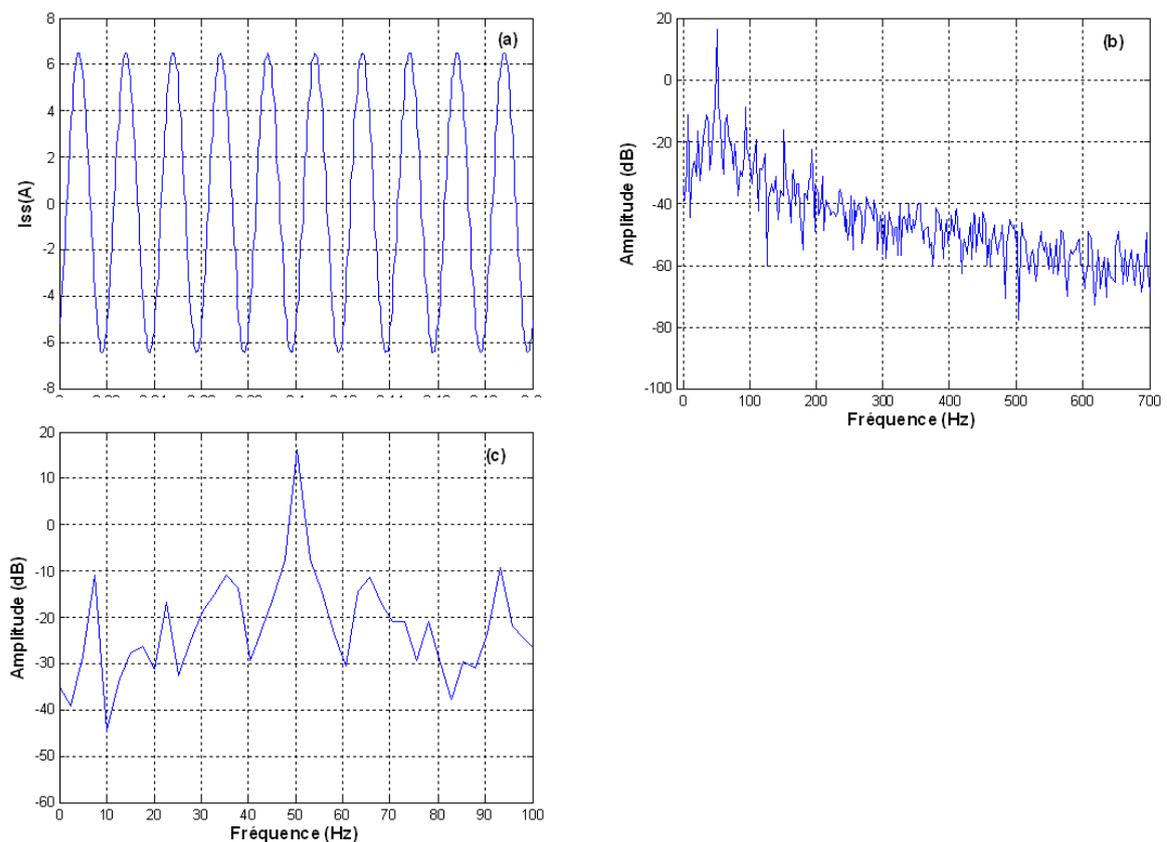


Figure III.8 : Cas d'un moteur avec 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, (a) courant statorique (b) et (c) spectre du courant respectivement

#### III.2.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

La figure III.9-a présente le courant statorique en régime permanent d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec 15 harmoniques d'espace ( ).

Le spectre du courant est illustré respectivement par la figure III.9-b et -c

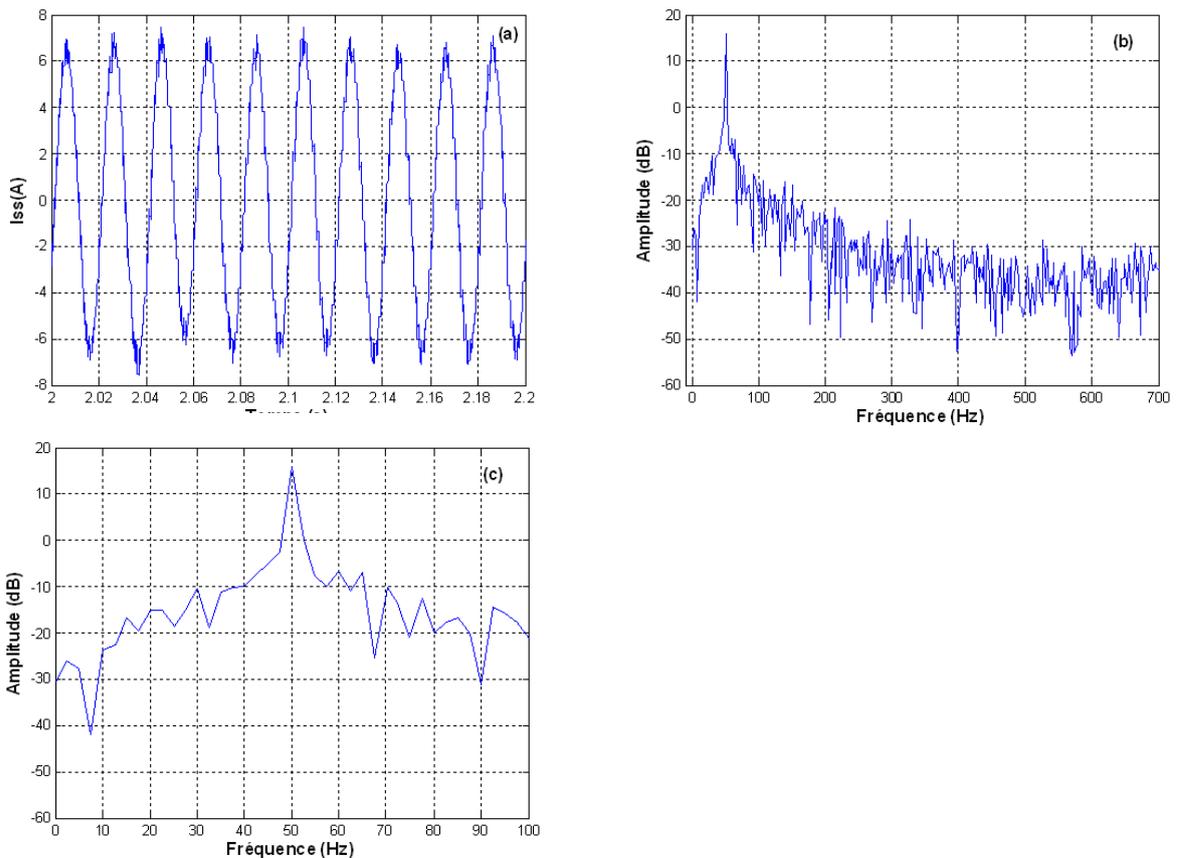


Figure III.9 : Cas d'un moteur avec 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm,(a) courant statorique de la phase « a » en régime permanent (b) et (c) spectre du courant respectivement

## III.2-2 Approche de des vecteurs des courants de Park

### III.2.2-1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park

#### III.2.2.1-1 Alimentation sinusoïdale

La forme instantanée du module des courants de Park et son spectre pour un fonctionnement sain du moteur avec 15 harmoniques d'espace sous une charge de 04 Nm sont respectivement illustrés par les figures III.10 –a, -b et –c on remarque l'apparition des ondulations dans le module des courants de Park. Elles sont essentiellement dues aux harmoniques d'espace.

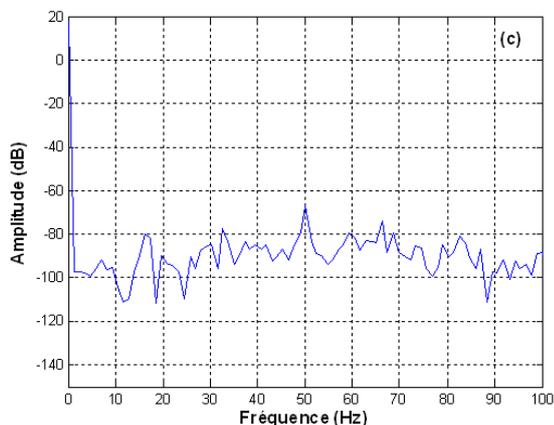
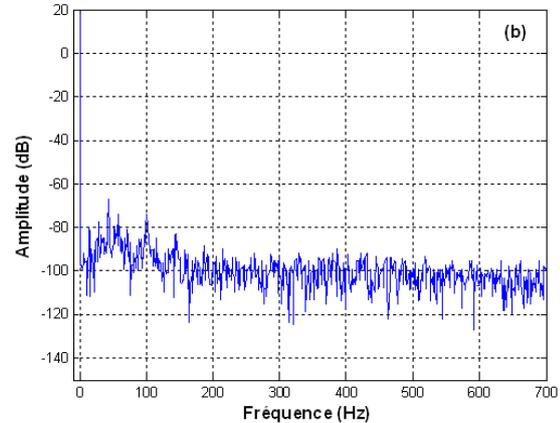
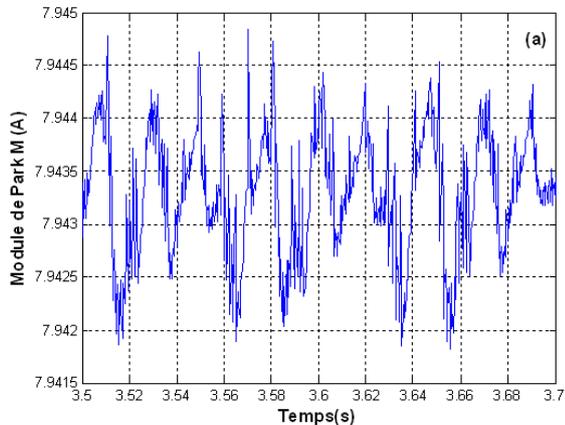


Figure III.10 : Cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4 Nm (a) Module des courants de Park et (b) et (c) son spectre

### III.2.2.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

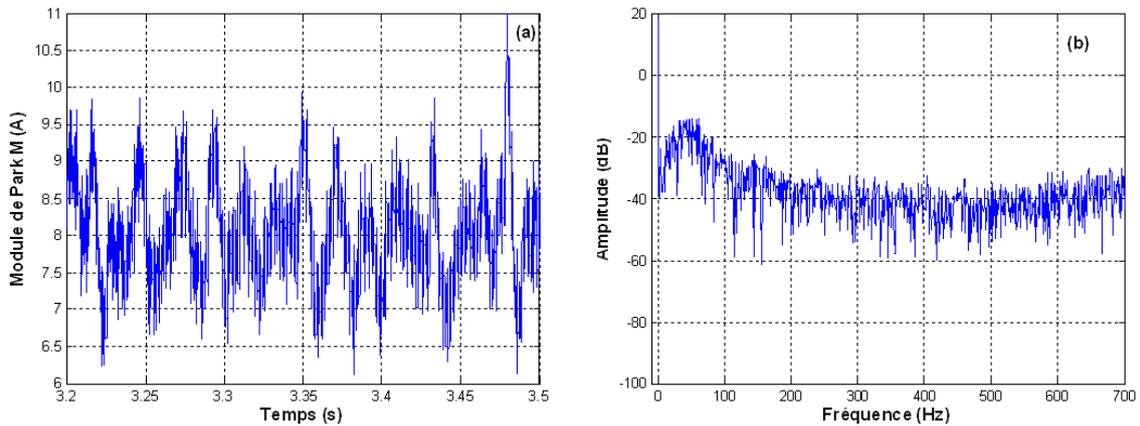


Figure III.11 : Cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4 Nm (a) Module des courants de Park, et (b) son spectre

Le module des vecteurs des courants de Park, son spectre aux hautes fréquences illustrés respectivement par les figures III.11-a et -b.

L'effet des harmoniques de temps et celui des harmoniques d'espace se traduit par la création des ondulations dans le module des courants de Park.

### III.2.2-2 Forme de Lissajous

#### III.2.2.2-1 Alimentation sinusoïdale

La figure III.12 illustre la forme de Lissajous dans le cas du fonctionnement du moteur sain avec 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm

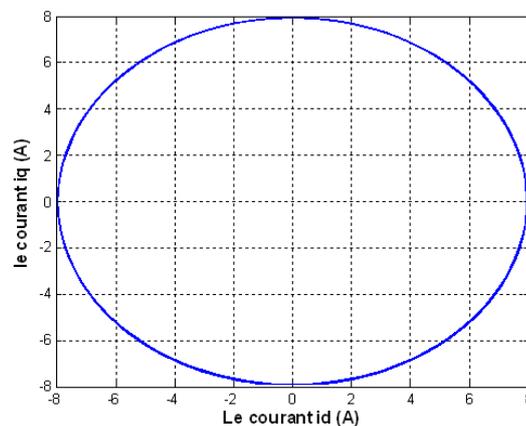


Figure III.12 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain avec 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm

### III.2.2.2-2 Alimentation par onduleur à MLI

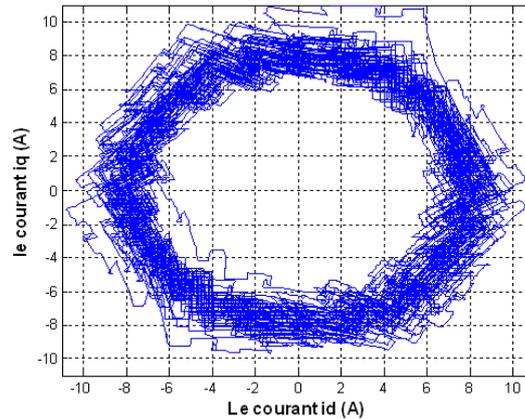


Figure III.13 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain avec 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm

La figure III.13 illustre la forme de Lissajous dans le cas du fonctionnement du moteur sain avec 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm

## III.3 Fonctionnement de la machine avec défaut de barres

La simulation du fonctionnement du moteur à cage d'écureuil avec défaut de barres est réalisée par l'augmentation par des résistances des barres considérées par la modèle mathématique ( $R_b$  est multiple par un facteur  $k = 3.10$  ). La structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons, dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

Nous proposons de comparer les spectres obtenus avec ceux issus d'une analyse de la machine asynchrone fonctionnant avec un rotor défaillant. Nous savons que la présence d'un défaut au sein de la cage rotorique fait apparaître des composantes

additionnelles dans le spectre fréquentiel des grandeurs temporelles analysées précédemment. Par conséquent, une comparaison entre les spectres obtenus avec un rotor sain et un rotor défaillant nous permettra de mieux discerner les composantes créées par le défaut rotorique.

### **III.3-1 Analyse spectrale du courant statorique**

#### **III.3.1-1 Alimentation sinusoïdale**

Les figures III.14( (a), (d)) et ((b),(e)) et ((c),(f)) illustrent le spectre du courant autour du fondamental, le spectre du courant autour des harmoniques caractérisant le défaut, correspondant à la cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres respectivement.

A partir de la figure III.14 ((d), (e) et (f)) on peut identifier les harmoniques qui sont dus au défaut de barres, qui apparaissent de part et d'autre du fondamental à des fréquences  
et

En effet, la rupture d'une barre rotorique crée, dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence  $sf$ . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence  $(1 - 2s)f$  dans le spectre du courant statorique. La présence de cette modulation dans le courant statorique induit une oscillation sur le couple électromagnétique de la machine de fréquence  $2sf$ . Cette oscillation de couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence. Cette oscillation de vitesse induit une nouvelle composante de fréquence  $(1 + 2s)f$  dans le spectre du courant statorique. Cette composante crée dans l'entrefer un nouveau champ tournant inverse de fréquence  $3sf$ . En utilisant la même approche, ce champ tournant induit une nouvelle composante de fréquence  $(1 - 4s)f$  dans le spectre du courant statorique.

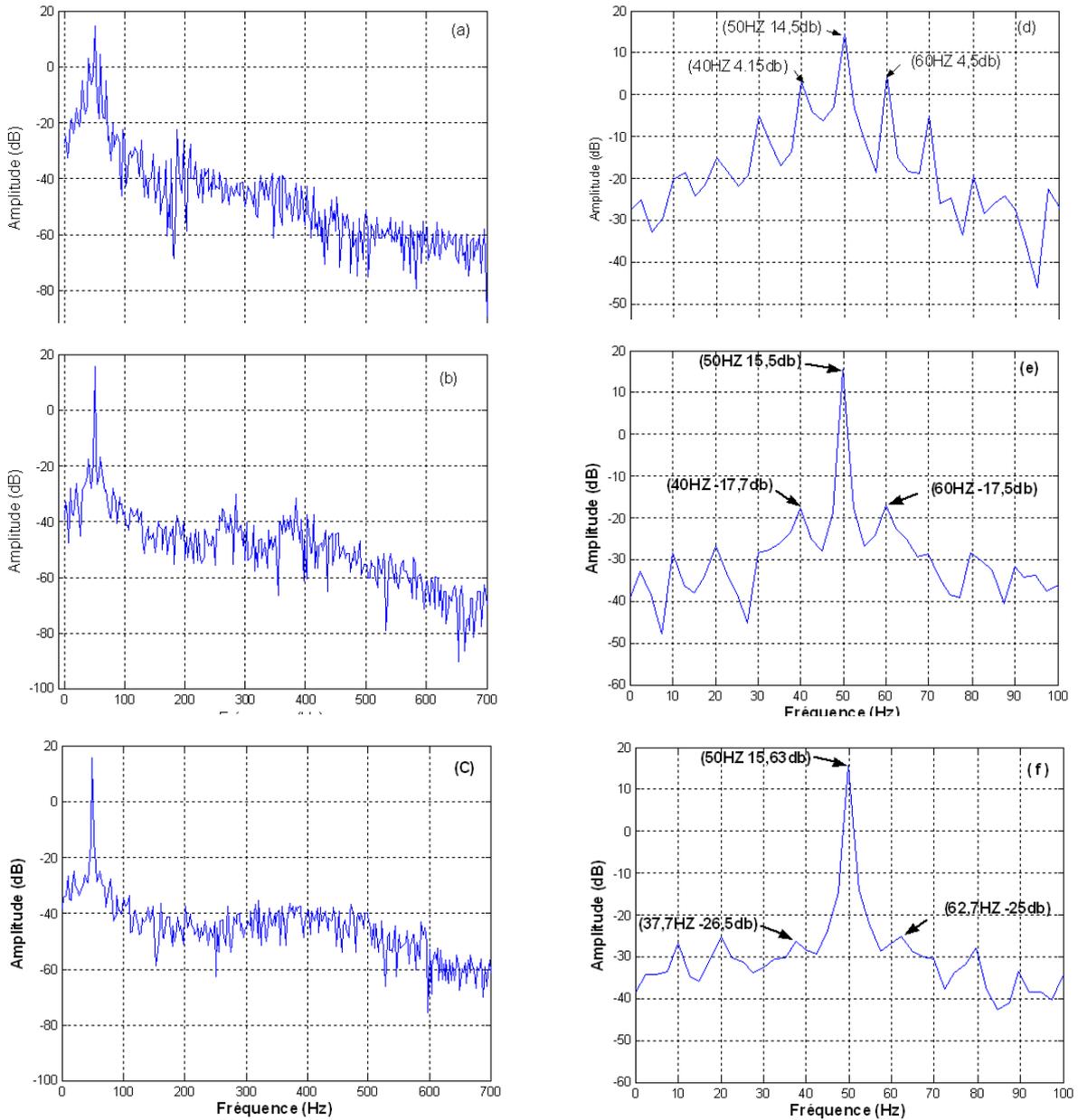


Figure III.14 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(a) et (d) spectres du courant statorique : Cas de cassure d'une barre.

(b) et (e) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 02 barres.

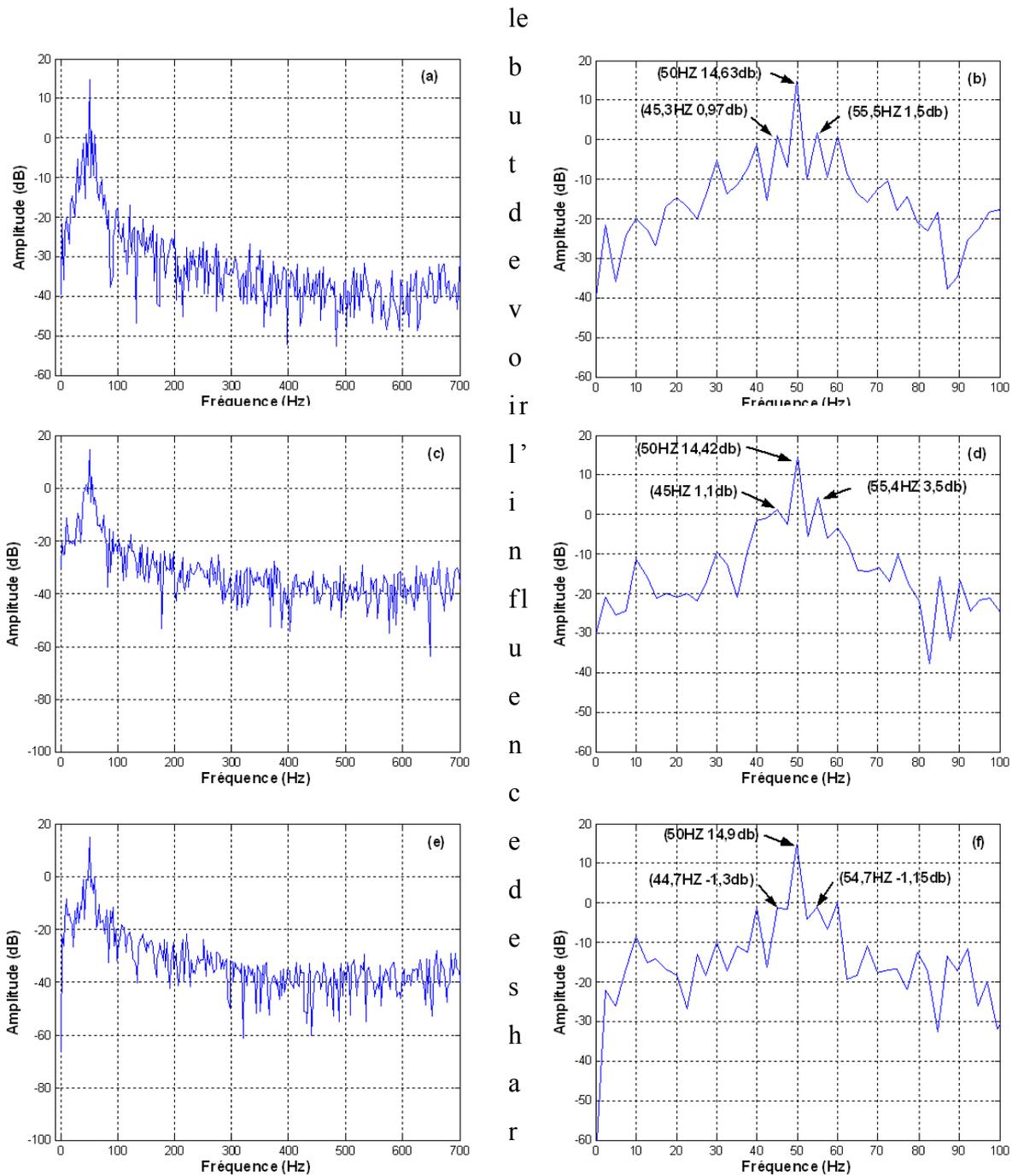
(c) et (f) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 04 barres.

Nous venons de montrer que les composantes de fréquence présentes dans le spectre du courant statorique peuvent être utilisées pour la détection d'une ou plusieurs barres rotoriques cassées.

**III.3.1-2 Alimentation par onduleur à MLI**

Il apparaît clairement que les résultats sont très différents de ceux obtenus en incluant, dans la même simulation, les harmoniques d'espace et les harmoniques de temps les plus importants.

La simulation du fonctionnement avec alimentation par onduleur à MLI est faite dans



moniques de temps sur le cas d'un défaut de barres.

Figure III.15 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI, avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(a) et (b) spectres du courant statorique : Cas de cassure d'une barre.

(c) et (d) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 02 barres.

(e) et (f) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 04 barres.

Les figures III.15( (a), (b)) et ((c),(d)) et ((e),(f)) illustrent le spectre du courant autour du fondamental, le spectre du courant autour des harmoniques caractérisant le défaut, correspondant à la cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres respectivement

### III.3-2 Approche de des vecteurs des courants de Park

#### III.3.2-1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park

##### III.3.2.1-1 Alimentation sinusoïdale

Les figures (III.16 –a,-b,-c ; III.17 –d,-e,-f ; III.18 –g,-i ) représentent respectivement le module des courants de Park, son spectre autour de la composante continue et son spectre autour des harmoniques d'encoches rotoriques dans les trois cas : cassure d'une barres, de deux barres, et quatre barres.

Le spectre du module des courants de Park contient en plus de la composante continu les harmoniques caractéristiques du défaut de cassure de barres, qui se manifeste aux fréquences

et

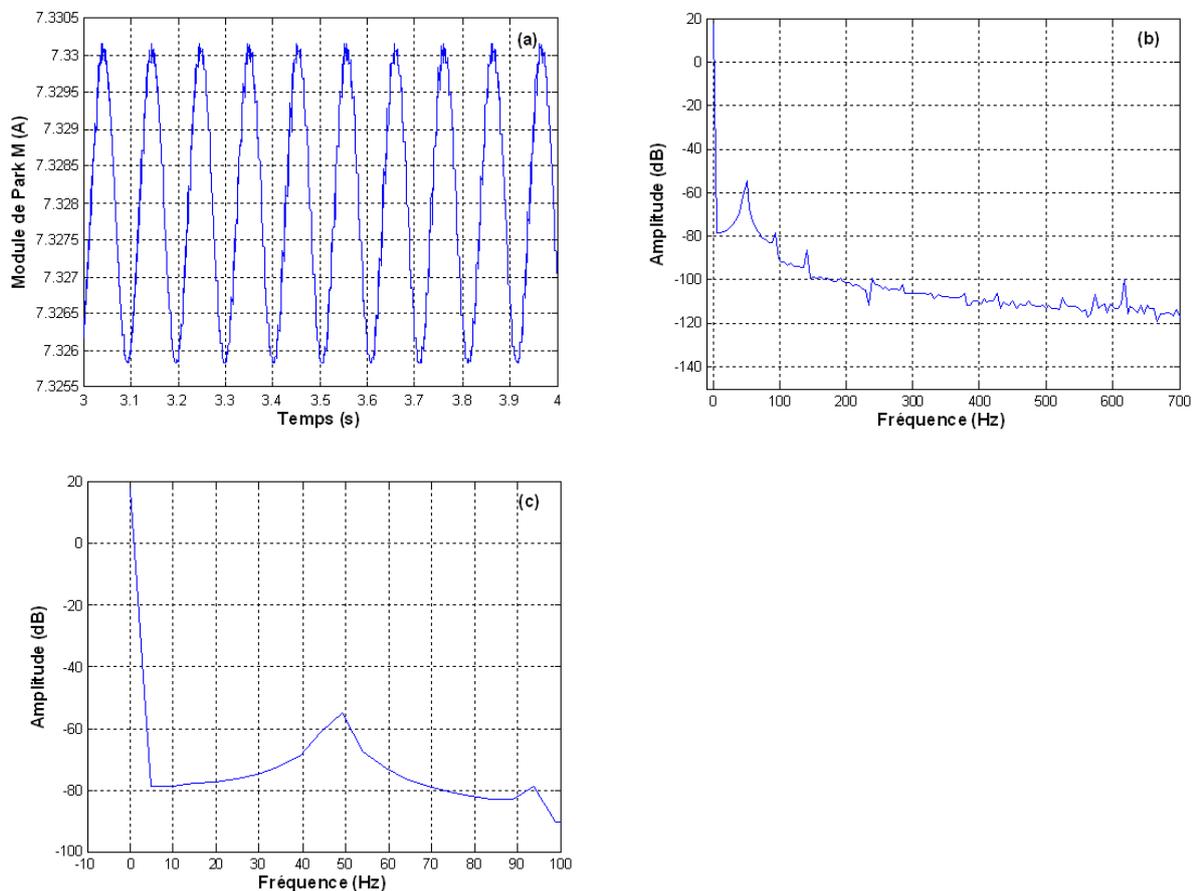


Figure III.16 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(a) Module des courants de Park, (b) et (c) son spectre : Cas de cassure d'une barre.

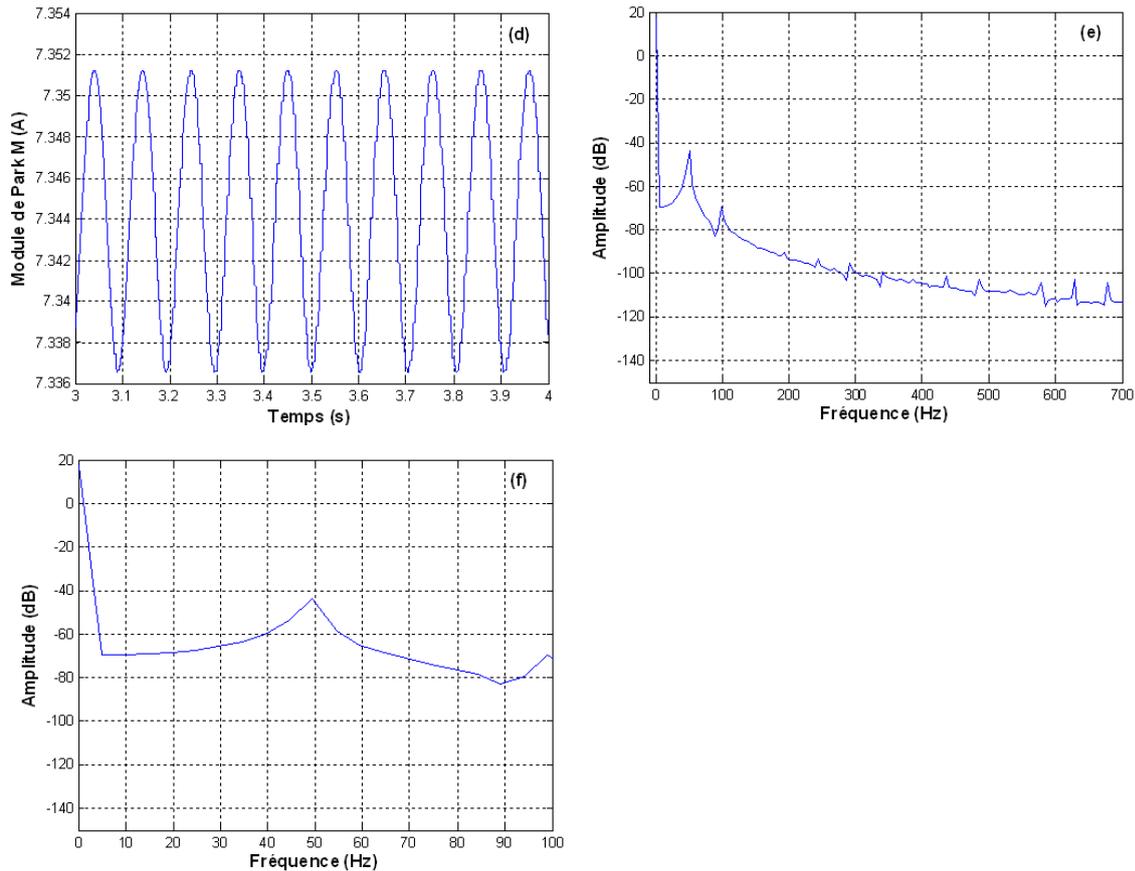


Figure III.17 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(d) Module des courants de Park, (e) et (f) son spectre : Cas de cassure de 02 barres.

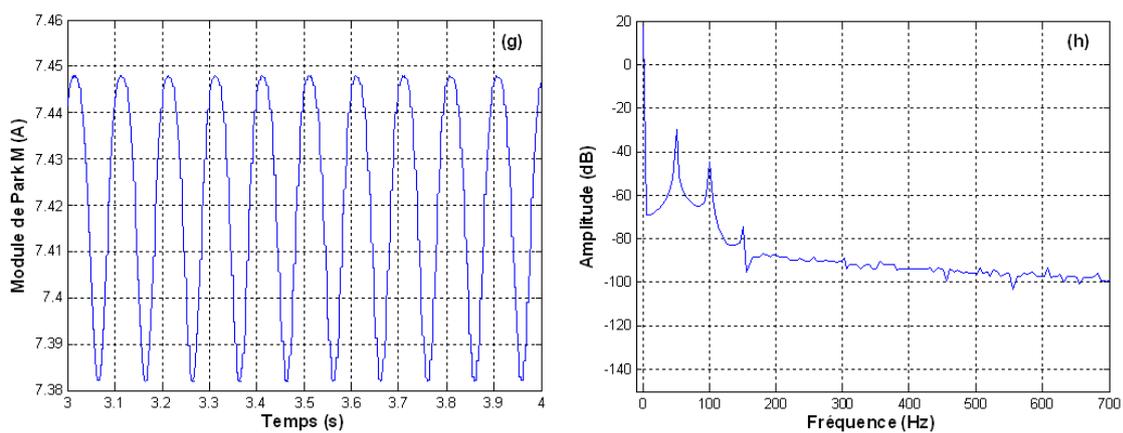


Figure III.18 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(g) Module des courants de Park, (h) son spectre : Cas de cassure de 04 barres.

### III.3.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

Les figures (III.19 –a,-b,-c ; III.20 –d,-e,-f ; III.21 –g,-h,-i ) représentent respectivement le module des courants de Park, son spectre autour de la composante continue et son spectre autour des harmoniques d'encoches rotoriques dans les trois cas : cassure d'une barres, de deux barres, et quatre barres.

On remarque que le module des vecteurs des courants de Park contient des battements plus importants que ceux obtenus dans le cas d'un le cas d'un moteur sain, qui sont dus aux harmoniques de temps et au défaut de barres.

Le spectre du module des courants de Park contient en plus de la composante continu les harmoniques caractéristiques du défaut de cassure de barres, qui se manifeste aux fréquences

et .

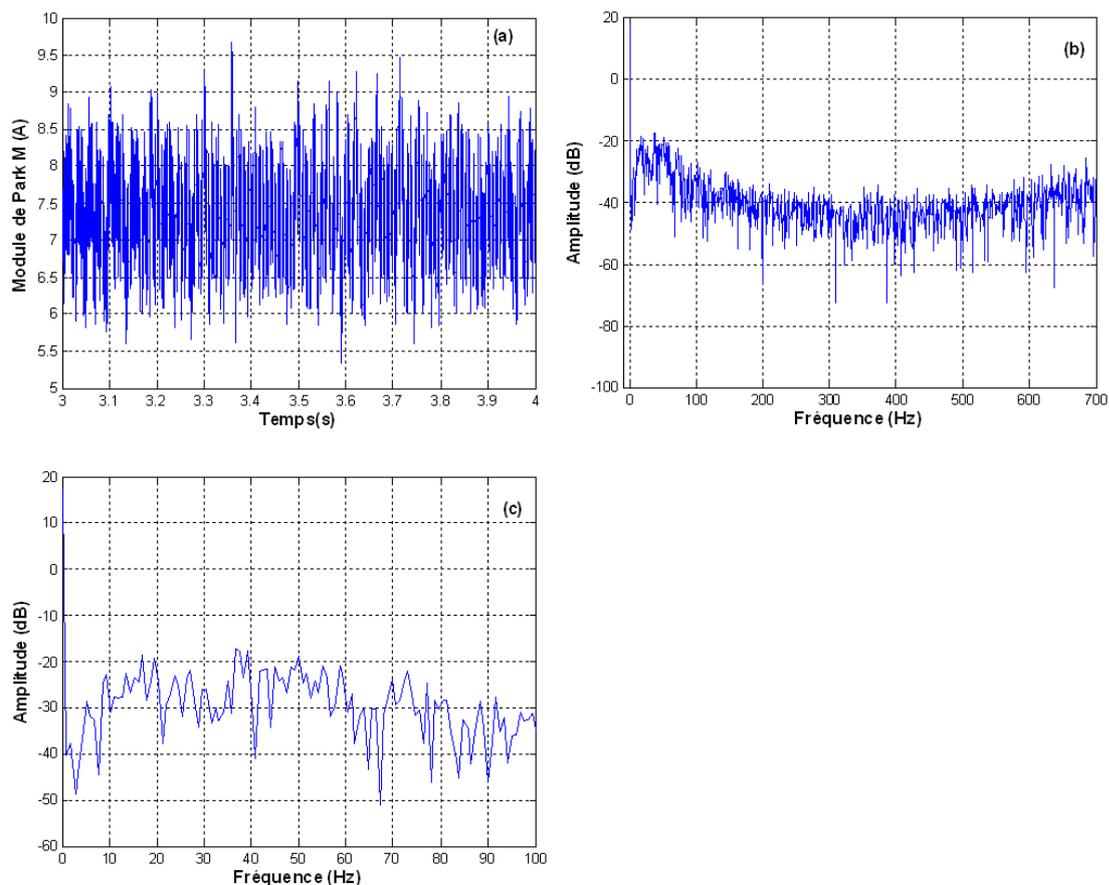


Figure III.19 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(a) Module des courants de Park, (b) et (c) son spectre : Cas de cassure d'une barre

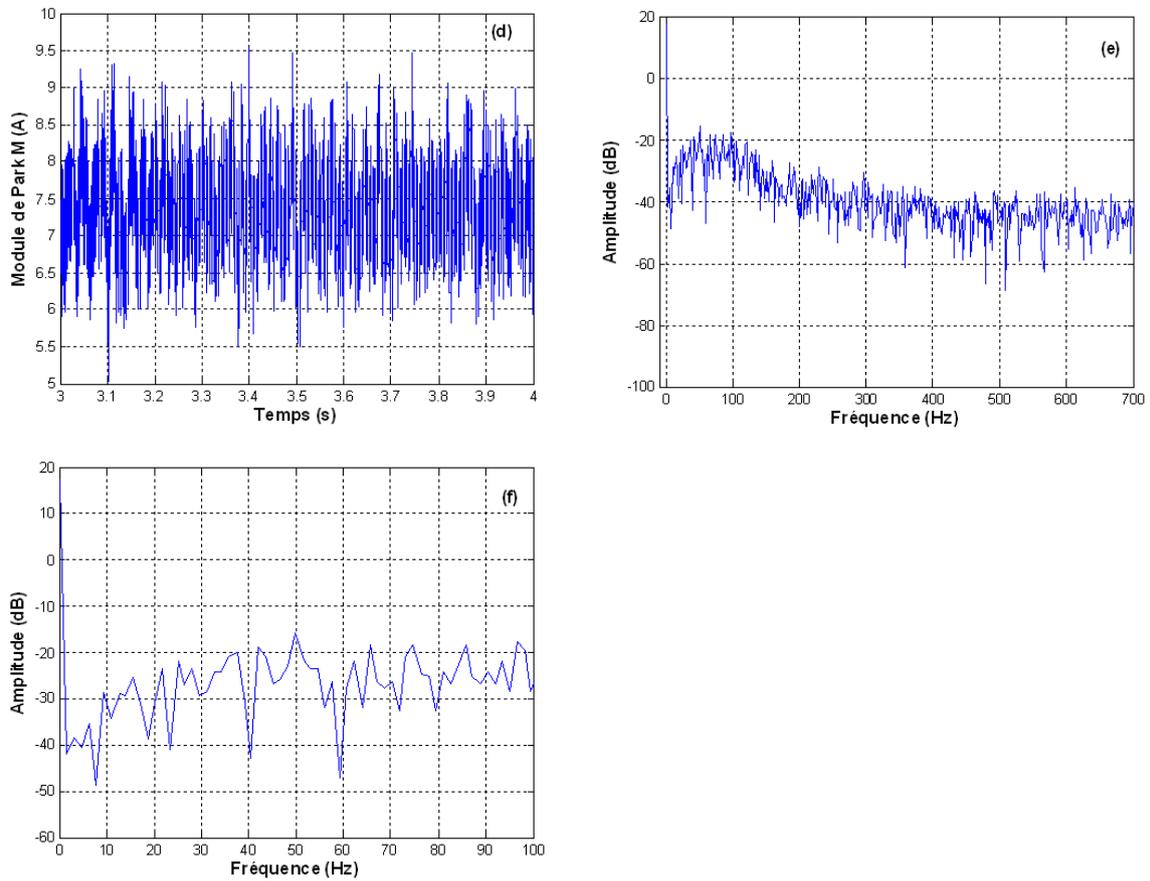


Figure III.20 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

(d) Module des courants de Park, (e) et (f) son spectre : Cas de cassure de 02 barres.

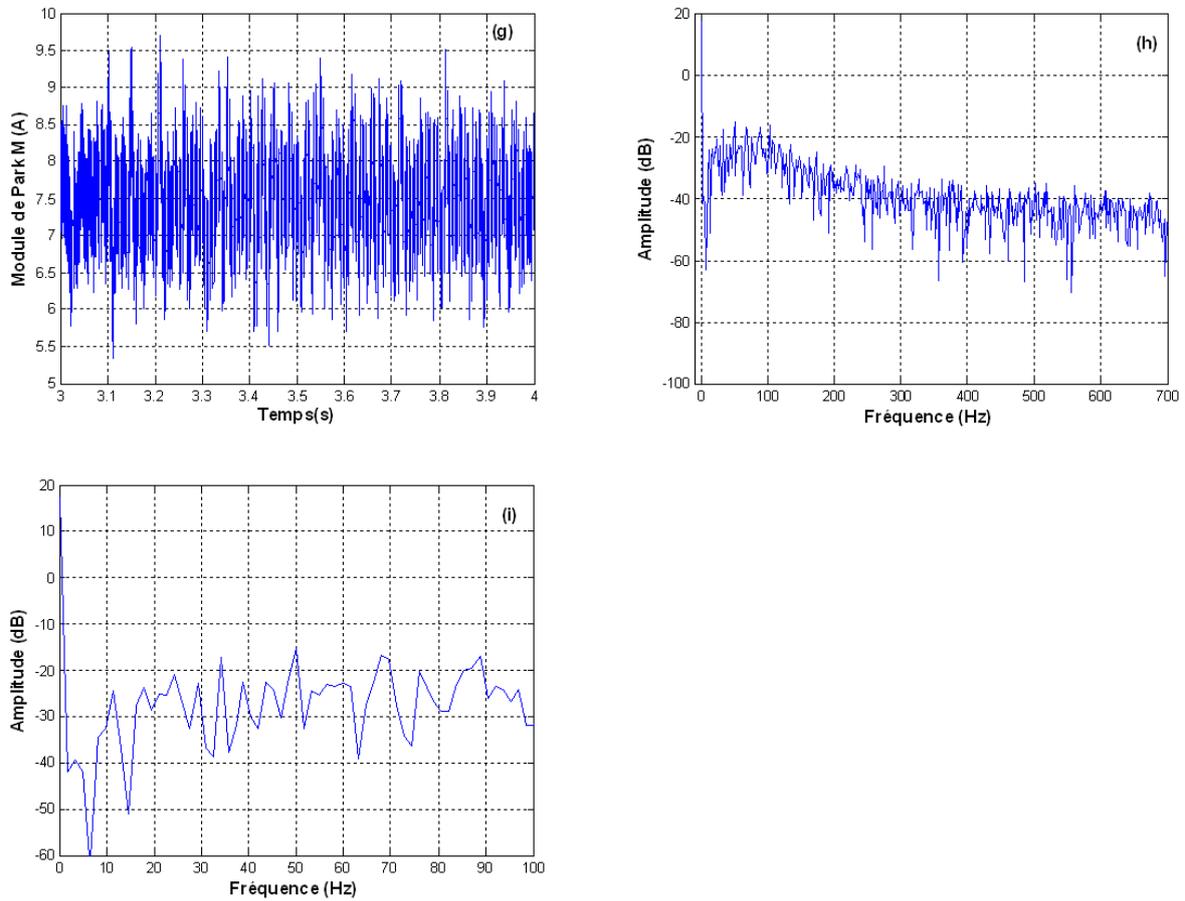


Figure III.21 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 04Nm.

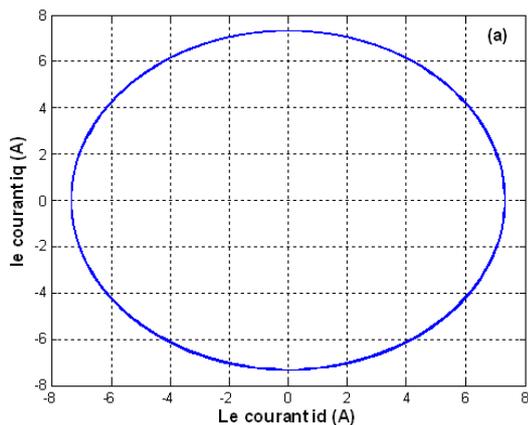
(g) Module des courants de Park, (h) et (i) son spectre : Cas de cassure de 04 barres.

### III.3.2-2 Forme de Lissajous

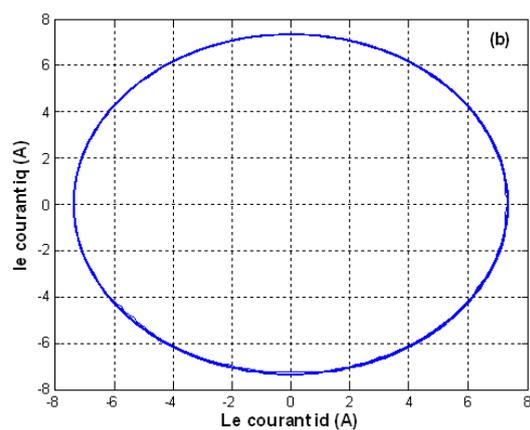
#### III.3.2.2-1 Alimentation sinusoïdale

Les figures III.22 –a,-b et -c illustre la forme de Lissajous dans le cas de défaut de barres avec une charge de 04 Nm.

La présence de défaut de barres se manifeste par l'augmentation de l'épaisseur de la forme de Lissajous, (figures III.22 –a,-b et -c), correspondant à la cassure d'une barre, de deux barres et



d  
e  
q  
u  
a  
t  
r  
e  
b  
a  
r  
r  
e



s respectivement.

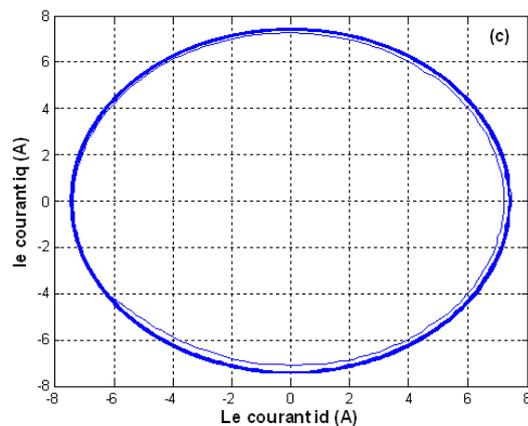


Figure III.22 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre sous une charge de 4 Nm

- (a) : Cas de cassure d'une barre.
- (b) : Cas de cassure de 02 barres.
- (c) : Cas de cassure de 04 barres

### **Alimentation par onduleur à MLI**

Afin de voir l'influence de l'onduleur sur le comportement de la machine avec défaut de barres, on a effectué une simulation sur un moteur avec cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres, sous une charge de 04 Nm.

La forme de Lissajous obtenu (figures III.22 –a,-b et -c) contient des ondulations qui sont dues à l'influence des harmoniques de temps.

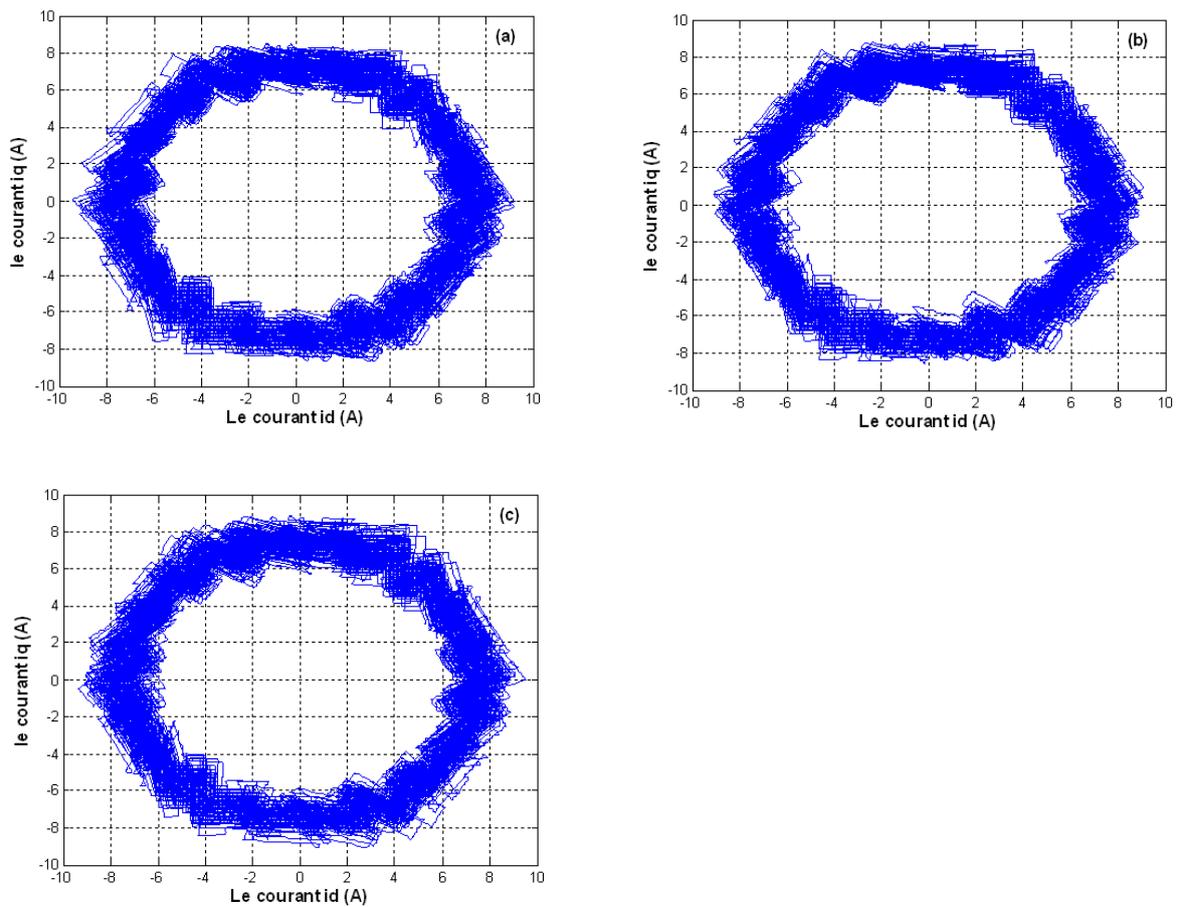


Figure III.23 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI avec défaut de cassure de barre, sous une charge de 4 Nm

- (a) : Cas de cassure d'une barre.
- (b) : Cas de cassure de 02 barres.
- (c) : Cas de cassure de 04 barres

### III.4 Fonctionnement de la machine avec défaut de barres en tenant compte des harmoniques

#### III.4-1 Analyse spectrale du courant statorique

##### III.4.1-1 Alimentation sinusoïdale

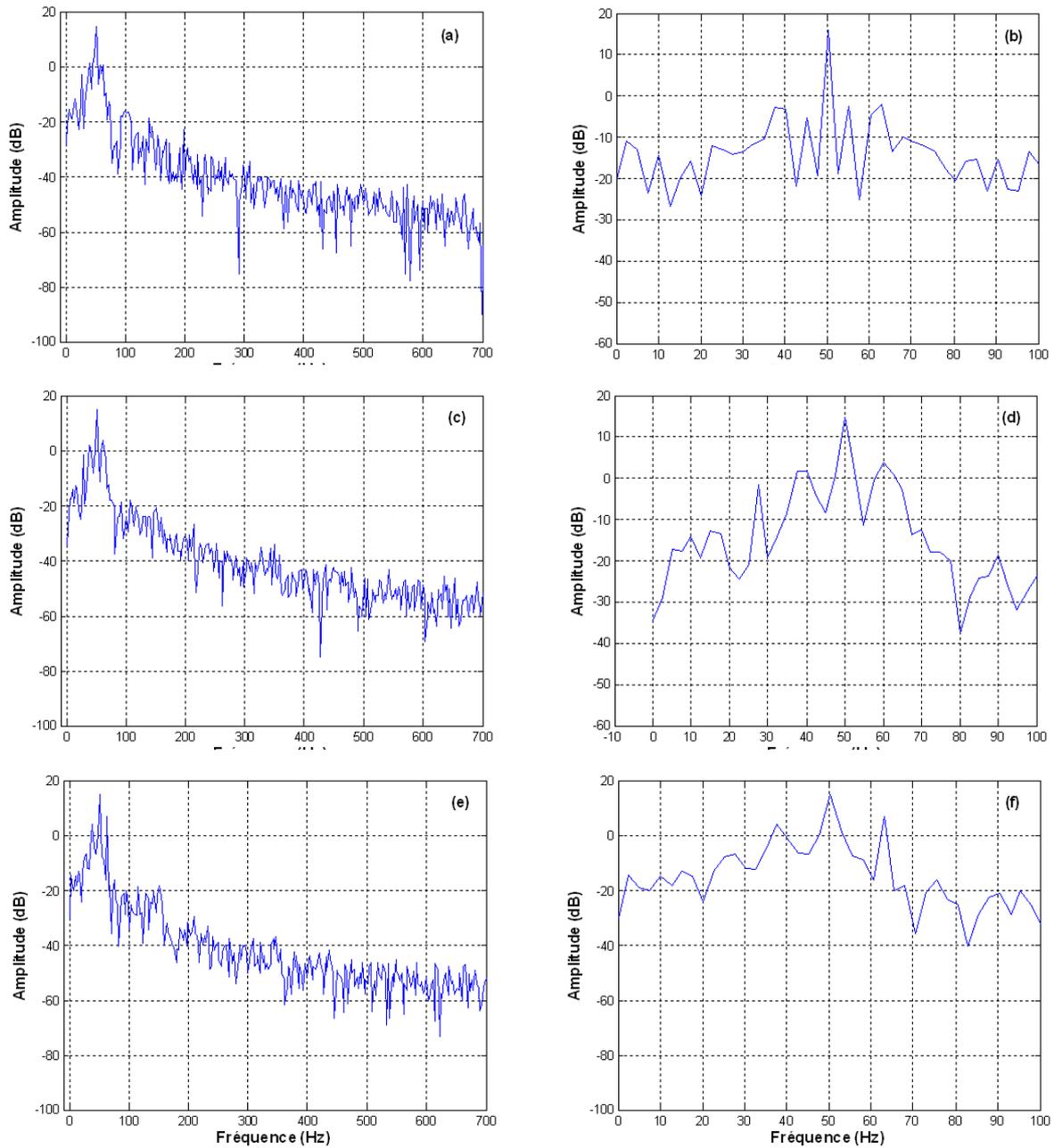


Figure III.24 : Cas d'un moteur avec défaut de barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm

(a) et (b) spectres du courant statorique : Cas de cassure d'une barre.

(c) et (d) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 02 barres.

(e) et (f) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 04 barres.

Les figures III.24 ((a), (b)) et ((c), (d)) et ((e), (f)) illustrent le spectre du courant autour du fondamental, le spectre du courant autour des harmoniques caractérisant le défaut en tenant compte des harmoniques d'espace ( ) correspondant à la cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres respectivement

### III.4.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

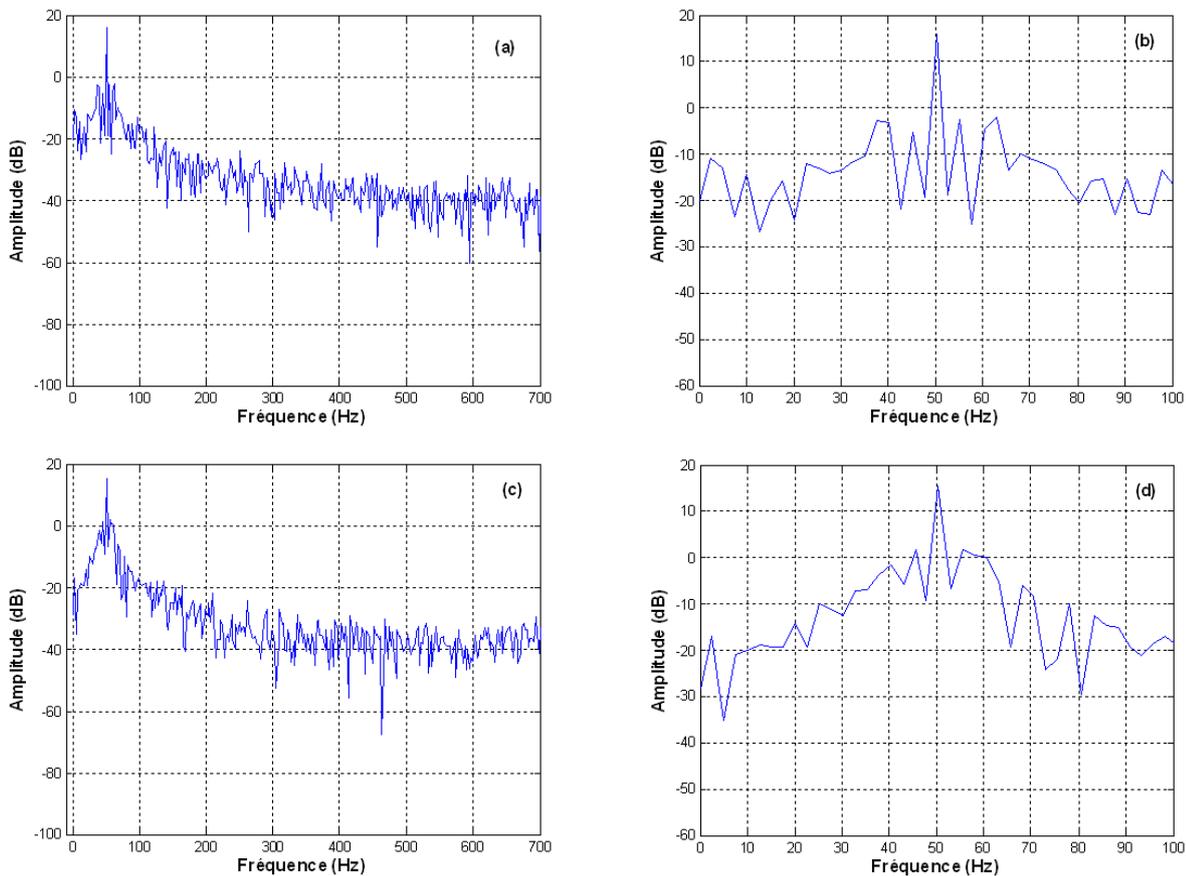


Figure III.25 : Cas d'un moteur avec défaut de barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm

(a) et (b) spectres du courant statorique : Cas de cassure d'une barre.

(c) et (d) spectres du courant statorique : Cas de cassure de 02 barres.

Les figures III.25 ((a), (b)) et ((c), (d)) et ((e), (f)) illustrent le spectre du courant autour du fondamental, le spectre du courant autour des harmoniques caractérisant le défaut en tenant compte des harmoniques d'espace ( ) correspondant à la cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres respectivement avec un alimentation par onduleur à MLI.

## III.4-2 Approche de des vecteurs des courants de Park

### III.4.2-1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park

#### III.4.2.1-1 Alimentation sinusoïdale

Les figures (III.26 –a,-b,-c ; III.27 –d,-e,-f ; III.28 –g,-h,-i) représentent respectivement le module des courants de Park, son spectre autour de la composante continue et son spectre autour des harmoniques d'encoches rotoriques dans les trois cas : cassure d'une barres, de deux barres, et quatre barres en tenant compte des harmoniques d'espace .

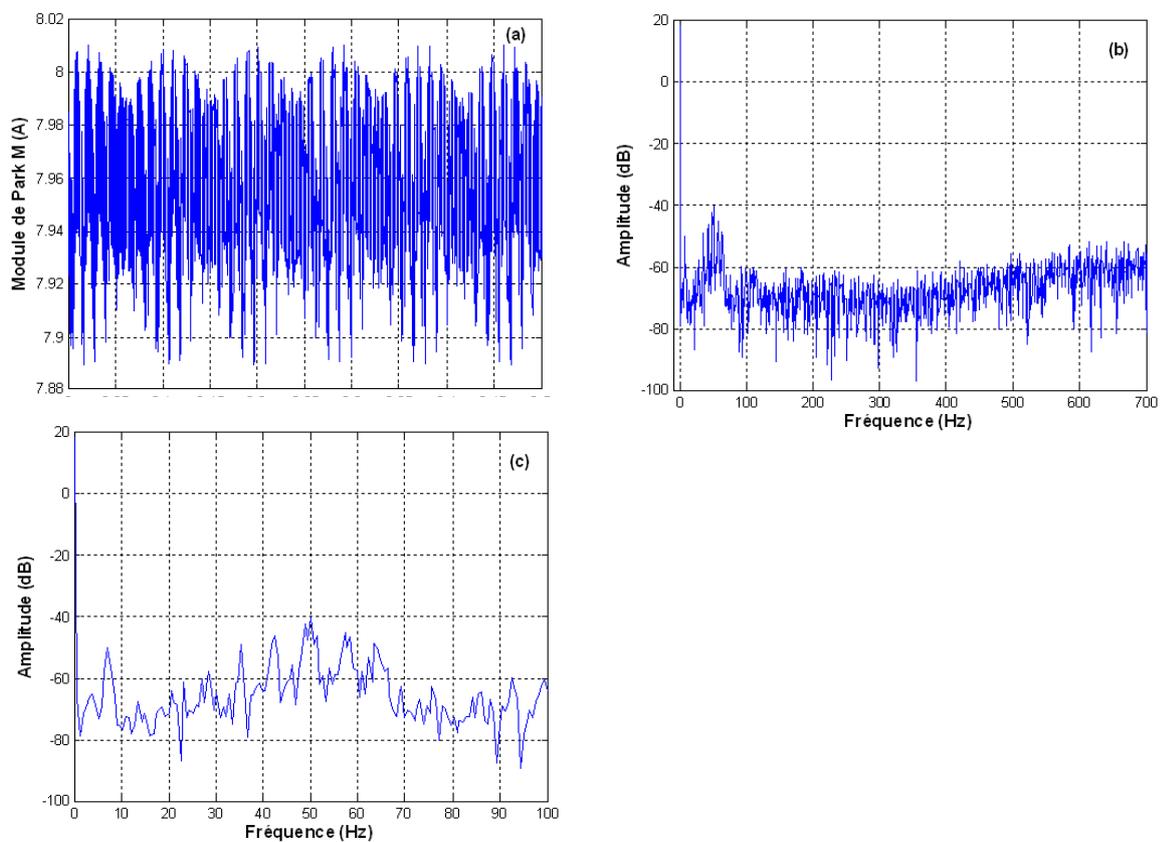


Figure III.26 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure d'une barre et 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm (a) Module des courants de Park et (b) et (c) son spectre

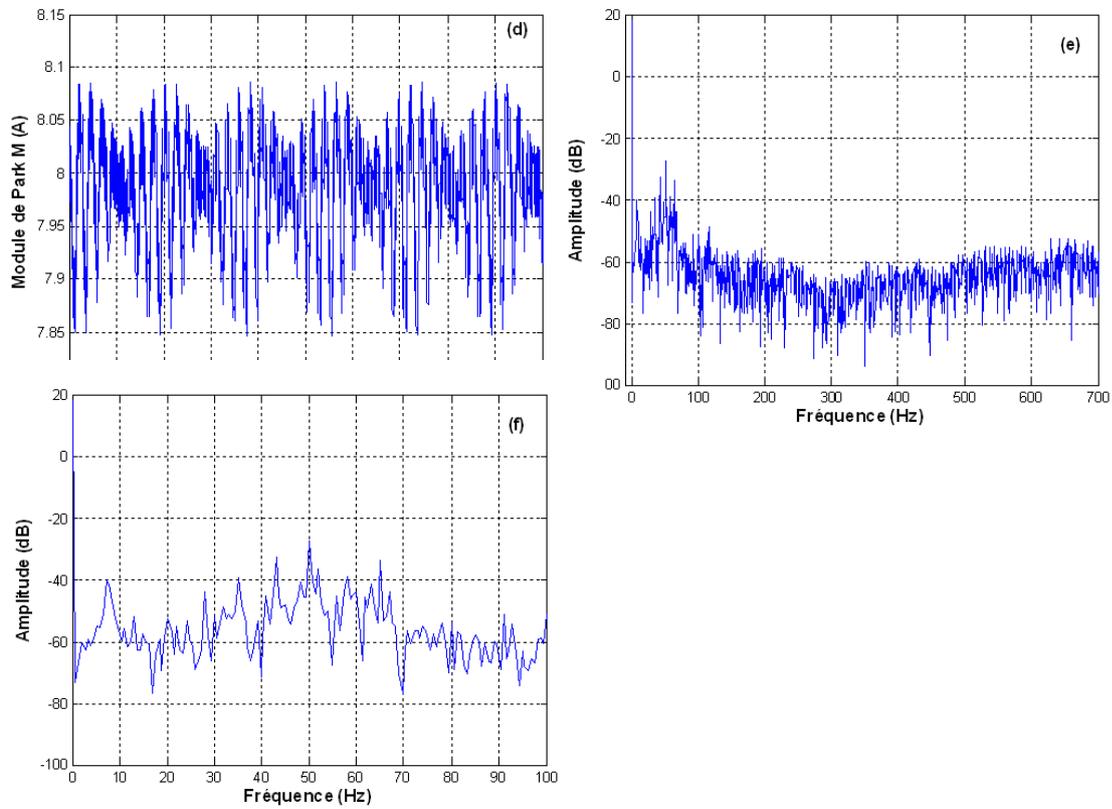


Figure III.27 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure de 02 barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm (d) Module des courants de Park et (e) et (f) son spectre

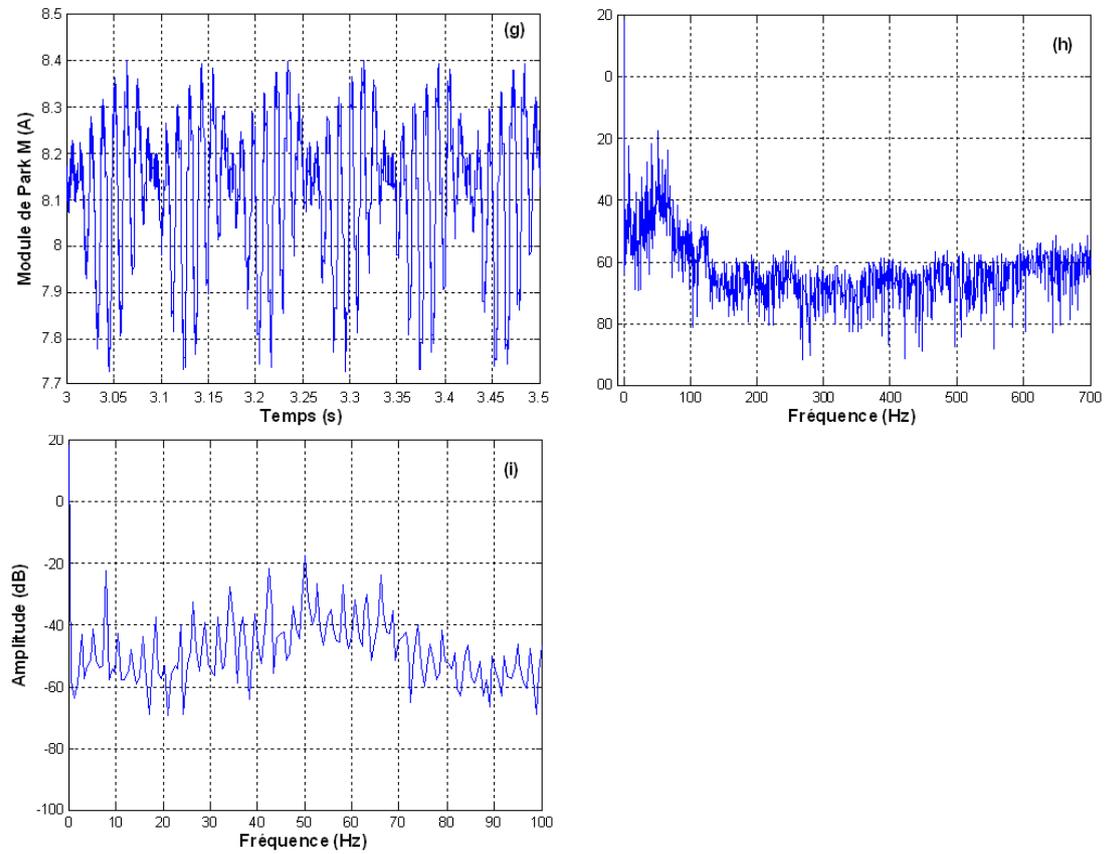


Figure III.28 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure de 04 barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par une source sinusoïdale, sous une charge de 4Nm (g) Module des courants de Park et (h) et (i) son spectre.

### III.4.2.1.2 Alimentation par onduleur à MLI

Les figures (III.29 –a,-b,-c ; III.30 –d,-e,-f ; III.31 –g,-h,-i) représentent respectivement le module des courants de Park, son spectre autour de la composante continue et son spectre autour des harmoniques d'encoches rotoriques dans les trois cas : cassure d'une barres, de deux barres, et quatre barres en tenant compte des harmoniques d'espace avec l'alimentation par onduleur à MLI.

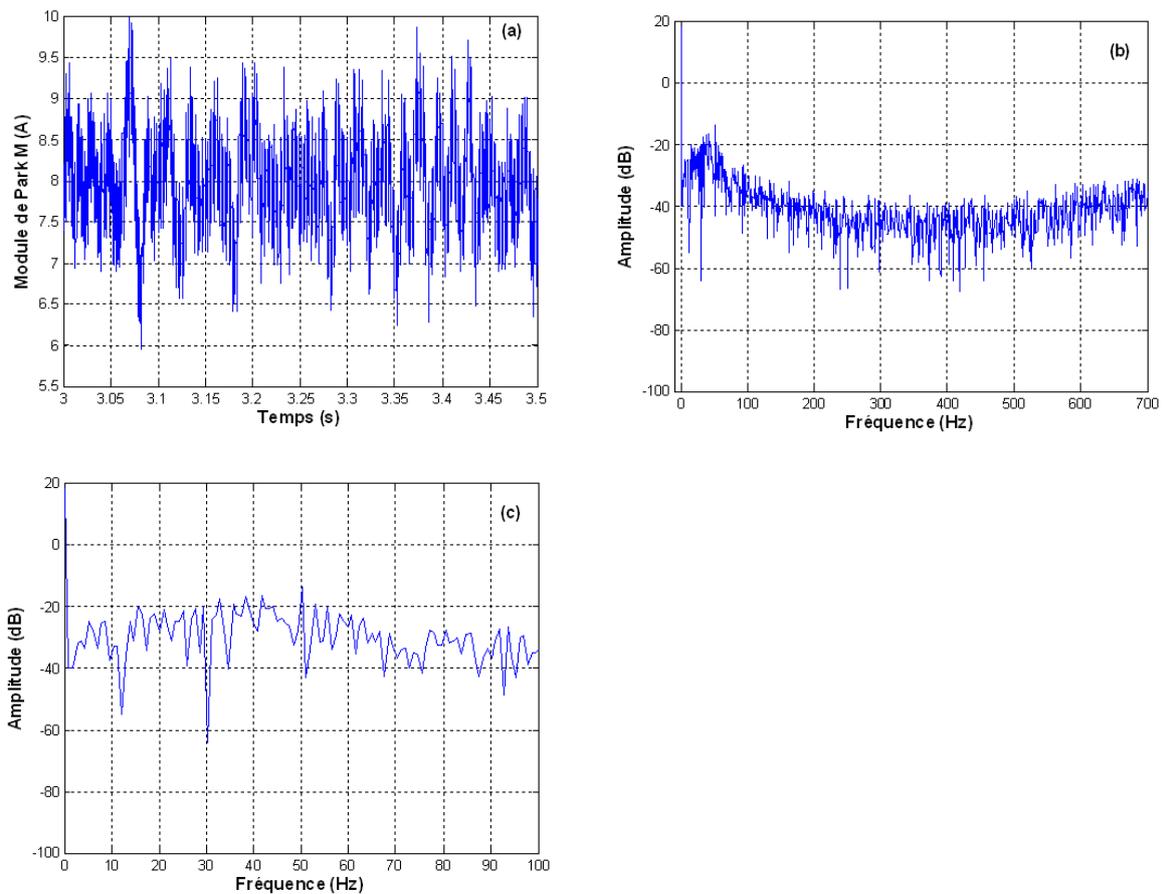


Figure III.29 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure d'une barre et 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm (a) Module des courants de Park et (b) et (c) son spectre

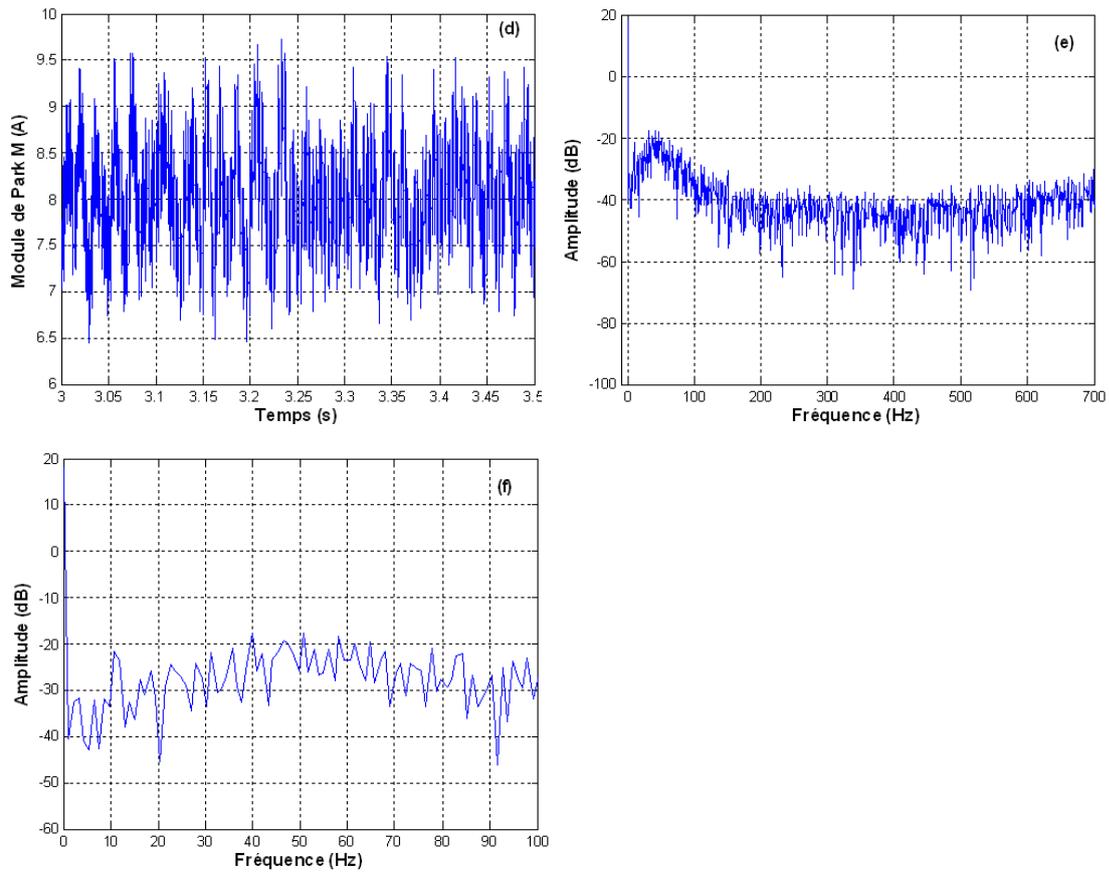


Figure III.30 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure de 02 barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm (d) Module des courants de Park et (e) et (f) son spectre

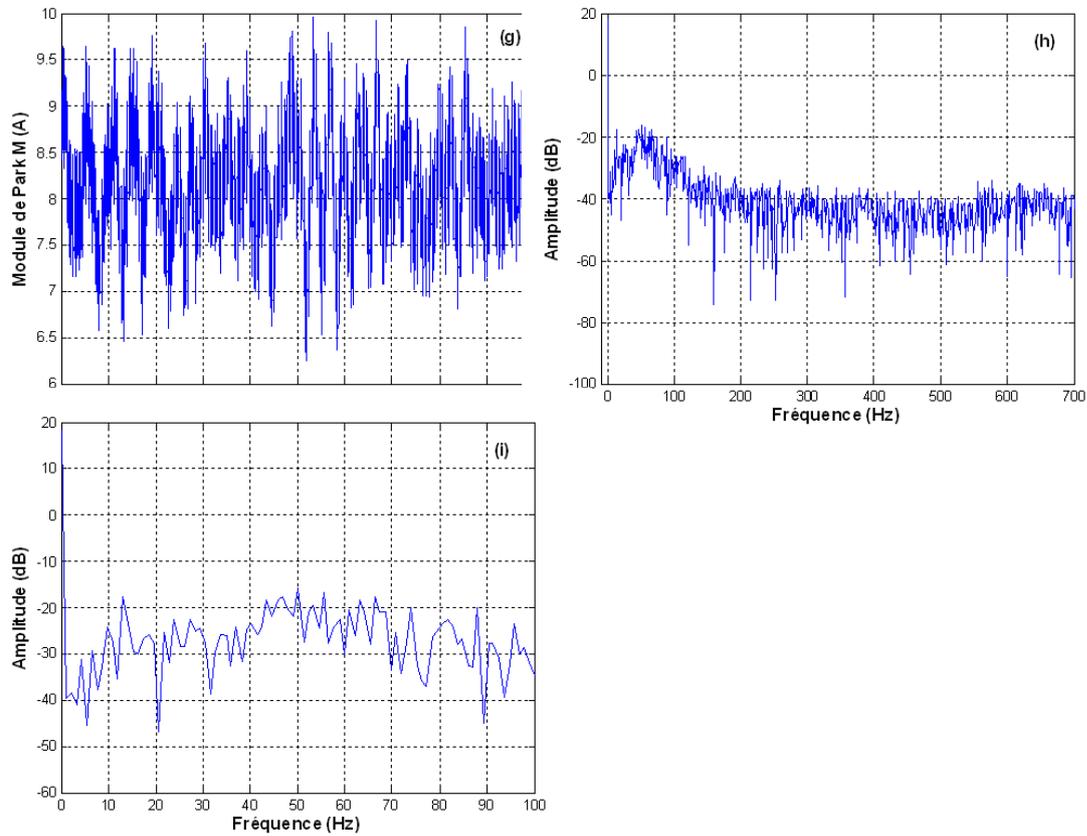


Figure III.31 : Cas d'un moteur avec défaut de cassure de 04 barres et 15 harmoniques d'espace alimenté par onduleur à MLI, sous une charge de 4Nm (g) Module des courants de Park et (h) et (i) son spectre.

### III.4.2-2 Forme de Lissajous

#### III.4.2.2-1 Alimentation sinusoïdale

On remarque que l'épaisseur de la forme de Lissajous augmente dans le cas de cassure d'une barre, de deux barres et de quatre barres par rapport à celle obtenue dans le cas du moteur sain, ce changement nous permet de détecter une anomalie dans le comportement du fonctionnement de la machine.

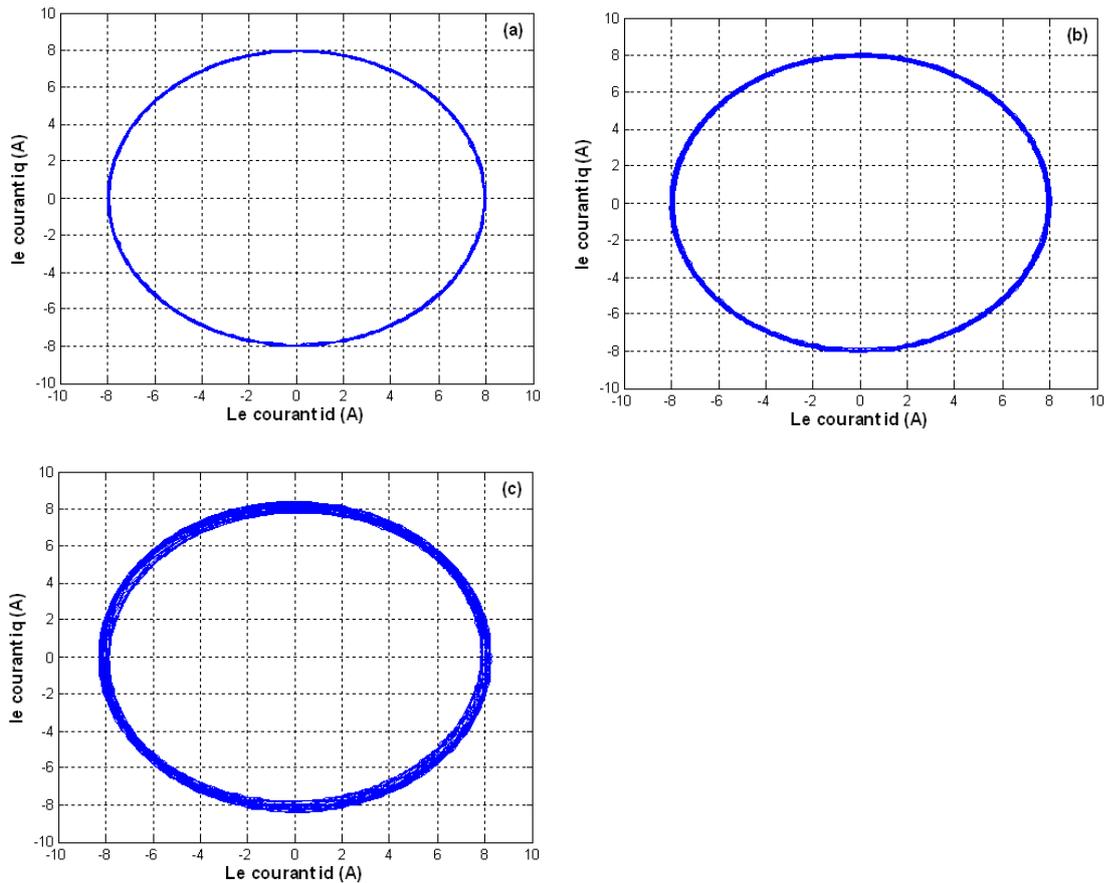


Figure III.32 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec défaut de cassure de barre et 15 harmonique d'espace sous une charge de 4 Nm

- (a) : Cas de cassure d'une barre.
- (b) : Cas de cassure de 02 barres.
- (c) : Cas de cassure de 04 barres

### III.4.2.2-2 Alimentation par onduleur à MLI

La forme de Lissajous obtenue (figure III.32) contient des ondulations qui sont dues à l'influence des harmoniques de temps et d'espace.

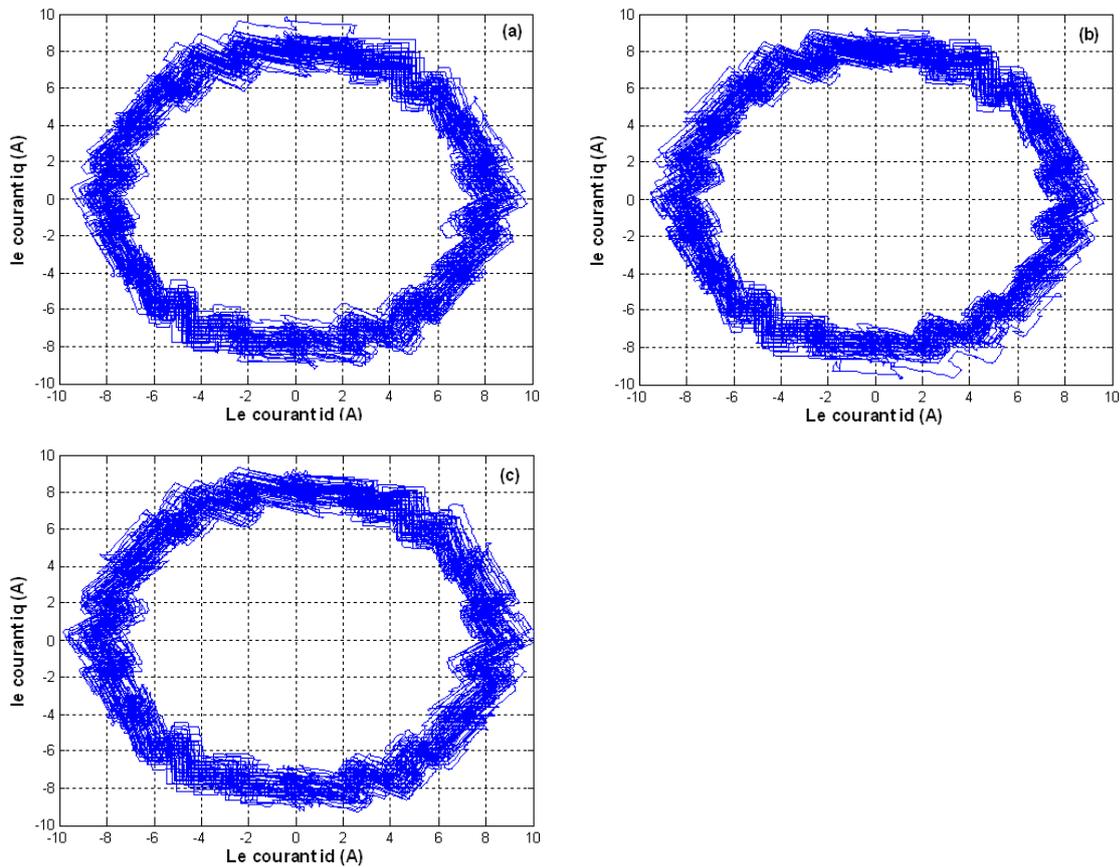


Figure III.32 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec défaut de cassure de barre et 15 harmonique d'espace sous une charge de 4 Nm

- (a) : Cas de cassure d'une barre.
- (b) : Cas de cassure de 02 barres.
- (c) : Cas de cassure de 04 barres

### III.5 Fonctionnement de la machine avec défaut d'excentricité

#### III.5-1 Fonctionnement de la machine avec excentricité mixte

La simulation du fonctionnement avec défaut d'excentricité mixte est réalisée avec la prise en considération simultanément de l'excentricité statique et dynamique. Pour ce faire nous faisons varier le degré d'excentricité statique ( ) et le degré d'excentricité dynamique ( ).

#### III.5.1-1 Analyse spectrale du courant statorique

##### III.5.1.1-1 Alimentation sinusoïdale

Les figures III.34 –a et –b présentent le spectre du courant statorique.

On remarque l'apparition des harmoniques caractéristiques de l'excentricité mixte dans le spectre du courant statorique aux fréquences : Avec  $k=1,2,3\dots$

et

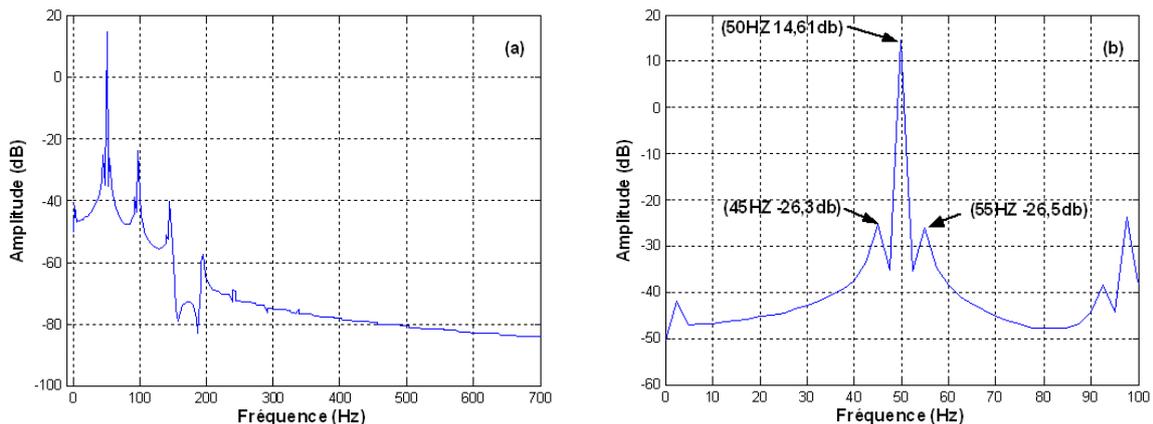


Figure III.34 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec 40% d'excentricité statique et 40% d'excentricité dynamique sous une charge de 04Nm, (a) et (b) son spectre du courant statorique .

### III.5.1.1-2 Alimentation par onduleur à MLI

Les figures III.35–a et –b pressentent le courant statorique en régime permanent et son spectre. L'onduleur influe aussi sur le courant statorique par la création des ondulations plus importantes que celles obtenues avec le moteur avec un alimentation sinusoidale et aussi par la creation des harmoniques de temps .

L'excentricité mixte se manifeste par la création de deux harmoniques d'amplitudes importantes de part et d'autre part du fondamental dont leurs fréquences sont donnés par l'équation suivante :

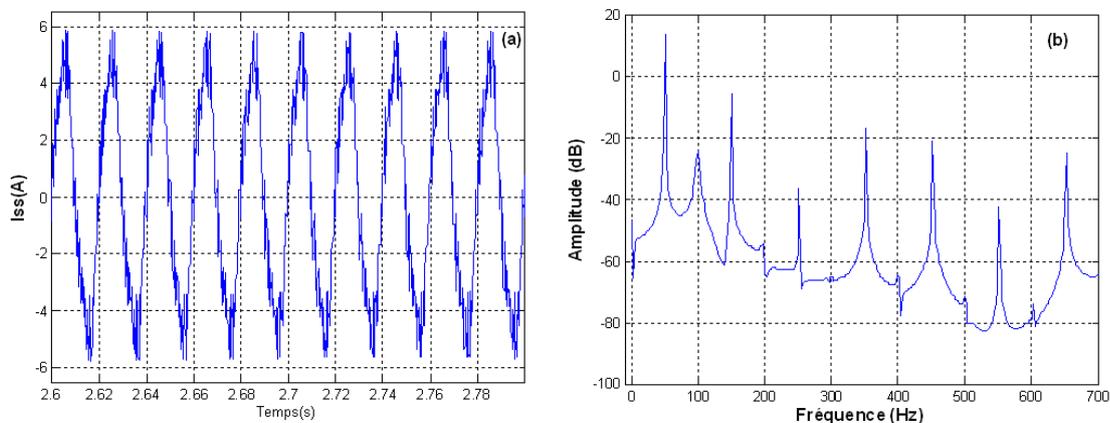


Figure III.35 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec 40% d'excentricité statique et 40% d'excentricité dynamique sous une charge de 04Nm, (a) courant statorique en régime permanent et (b) spectre du courant statorique .

### III.5.1-2 Approche de des vecteurs des courants de Park

#### III.5.1.2-1 Analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park

##### III.5.1.2.1.1 Alimentation sinusoidale

La figure III.36-a illustre le régime permanent du module des courants de Park, et la figure III.36-b représente le spectre du module des courants de Park.

L'excentricité mixte contient en plus de la composante continue deux harmoniques d'amplitudes importantes de part et d'autre du fondamental.

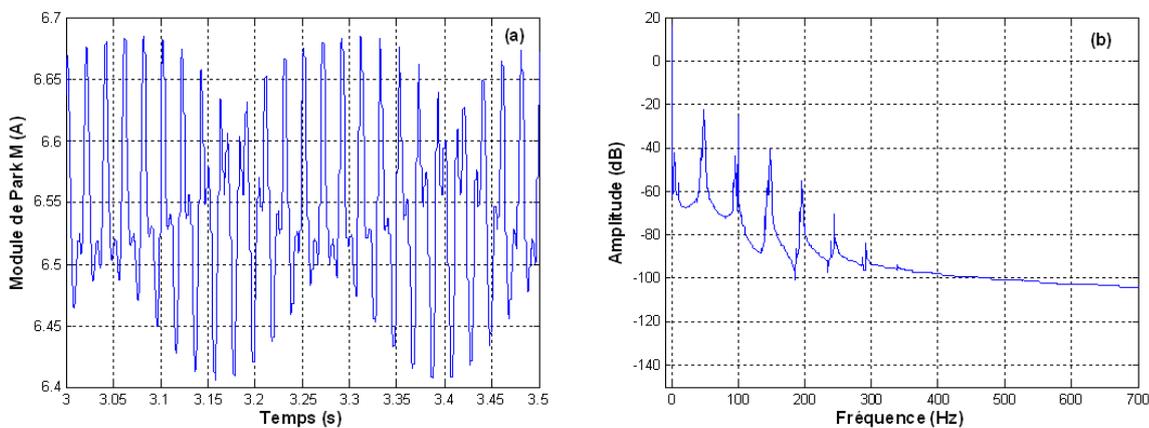


Figure III.36 : Cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale avec 40% d'excentricité statique et 40% d'excentricité dynamique sous une charge de 04Nm (a) Module des courants de Park et (b) son spectre.

#### III.5.1.2.1.2 Alimentation par onduleur à MLI

La forme temporelle du module des courants de Park est illustrée par la figure III.37-a et la forme spectrale par la figure III.37-b.

On remarque que l'effet des harmoniques de temps se traduit par la création des ondulations dans le module des courants de park. Et aussi par la création des harmoniques dans son spectre

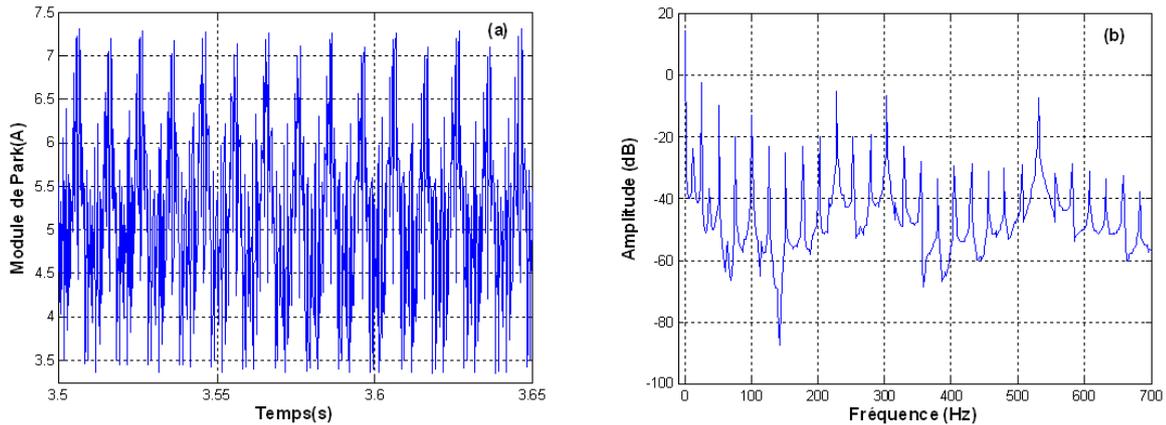


Figure III.37 : Cas d'un moteur alimenté par onduleur à MLI avec 40% d'excentricité statique et 40% d'excentricité dynamique sous une charge de 04Nm (a) Module des courants de Park et (b) son spectre

### III.5.1.2.1-2 Forme de Lissajous

#### III.5.1.2.1.2-1 Alimentation sinusoïdale

La figure III.38 illustre la forme de Lissajous dans le cas d'un fonctionnement avec défaut d'excentricité mixte, sous une charge de 4Nm

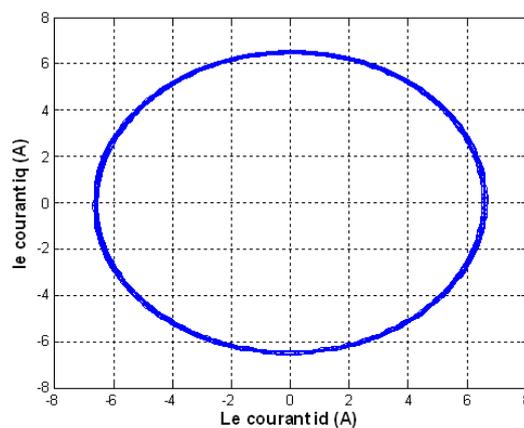


Figure III.38 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté par une source sinusoïdale avec 40% excentricité et 40% excentricité dynamique, sous une charge de 4Nm sous une charge de 4 Nm

#### III.5.1.2.1.2-2 Alimentation par onduleur à MLI

La figure III.39 illustre la forme de Lissajous dans le cas du fonctionnement du moteur alimenté avec onduleur à MLI.

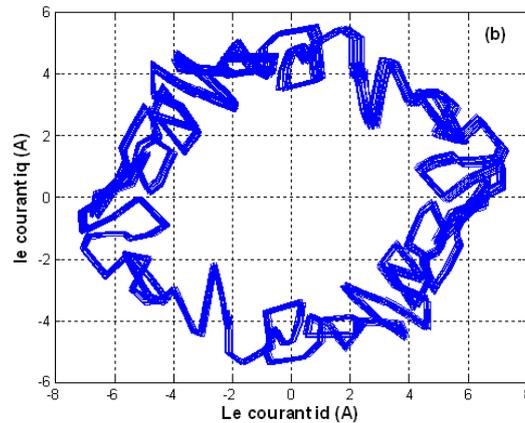


Figure III.39 : La forme de Lissajous dans le cas d'un moteur sain alimenté par onduleur à MLI avec 40% excentricité et 40% excentricité dynamique, sous une charge de 4Nm sous une charge de 4 Nm

La forme de la figure III.39 contient des ondulations et se diffère de la forme circulaire obtenue dans le cas d'un moteur alimenté par une source sinusoïdale, ceci est dus à l'introduction de l'onduleur et à l'effet des harmoniques de temps et aussi l'influence du défaut sur le comportement du fonctionnement de la machine.

Le travail qui a été présenté tout au long de ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'analyse de l'effet de l'alimentation par onduleur à commande en MLI d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sur le diagnostic des défauts rotoriques, plus précisément les défauts de barres et l'excentricité. Pour ce faire, plusieurs techniques de diagnostic de défauts ont été adoptées, telles que :

1. Analyse spectrale du courant statorique.
2. Analyse par l'approche des vecteurs des courants de Park à partir de :
  - a. L'analyse spectrale du module des vecteurs des courants de Park.
  - b. La forme de Lissajous.

La procédure du diagnostic a porté à la fois sur la localisation des harmoniques générées par les défauts et ceux générés par les harmoniques de temps et d'espace, et à constater aussi l'effets de ces derniers sur l'apparition des harmoniques caractéristiques du défaut et qu'avec l'utilisation de ces différentes techniques de diagnostic.

Une partie importante de notre travail a concerné l'élaboration d'un modèle de référence fiable et précis, représentant le plus fidèlement possible le comportement réel du moteur, et permettant la simulation des différents cas de fonctionnement (moteur sain et défaillant). Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle mathématique du moteur à cage basé sur l'approche des fonctions d'enroulements et qui tient en compte des harmoniques d'espace de la machine.

Un programme de simulation a été développé dans ce travail. Les résultats sur les signaux obtenus (courants statoriques, module des vecteurs des courants de Park) étant fonction de temps, une analyse spectrale est nécessaire, afin de connaître le continu spectral de chaque signal. Pour ce faire, nous avons utilisé le programme de la Transformée de Fourier Rapide (TFR).

Les simulations ont porté sur les fonctionnements suivants :

- 1 Alimentation par un système sinusoïdale équilibré :

En effet, nous avons mis en évidence plusieurs cas de fonctionnement :

- Fonctionnement de la machine sans défaut.
- Fonctionnement de la machine en tenant compte des harmoniques d'espace.
- Fonctionnement de la machine avec défaut de barres.
- Fonctionnement de la machine avec défaut de barres en tenant compte des harmoniques.
- Fonctionnement de la machine avec défaut d'excentricité.

## 2 Alimentation avec onduleur de tension à commande à MLI

Le mêmes cas de fonctionnement a été évoqué.

- L'analyse spectrale de courant statorique a permis de détecter et de quantifier la valeur du défaut survenue sur la partie rotorique grâce à l'analyse de l'amplitude des raies présentes sur le spectre du courant autour du fondamental dont les fréquences correspondent à la relation mathématique :  $(1 \pm 2.k.s) f_s$  .

- Dans le cas du moteur avec excentricité mixte nous avons montré que :

En plus des harmoniques caractéristiques de ce type de défaut, on a la manifestation simultanée des harmoniques caractéristiques des deux types d'excentricité (dynamique et statique).

- La détection des défauts de barres peut être facilement obtenue par l'observation de l'épaisseur de la courbe de Lissajous. Cela est possible même dans le cas de cassure d'une seule barre rotorique d'un moteur en charge.

## PRESENTATION DU PROCEDE

Le procédé d'étude est un moteur asynchrone triphasé (rotor à cage) à 1 paires de pôle, alimenté par le réseau, et est caractérisé par :

### Caractéristiques principales de la machine asynchrone

Puissance nominale	1.5 kW
Couple de charge nominale	6 N.m
Tension nominale	220V
Fréquence statorique nominale	50Hz ;
Nombre de paires de pôles	$p = 1$

### Paramètres électriques

Résistance d'une phase du stator	$R_s = 9.203$
Résistance d'une barre rotorique	$R_b = 68.358e-6$
Résistance d'un segment d'anneau rotorique	$R_a = 1.26e-6$
Inductance de fuite statorique	$l_{fs} = 0.0138H$
Inductance de fuite rotorique	$L_{rb} = 0.174e-6H$
Inductance d'un segment d'anneau rotorique	$L_{fa} = 0.0375e-6H$

### Paramètres mécaniques

Moment d'inertie des masses tournantes	$J = 0.0054H \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.000015$
Nbr de barre rotorique	$N_r = 16$
Longueur active du circuit magnétique	$L = 0.1m$
Rayon moyen à l'entrefer	$R = 27.35e-3m$
Nbr de spire par phase statorique	$N_s = 236 \text{ spire/phase}$
Longueur moyenne de l'entrefer	$e = 3 e-4 \text{ m}$

- [Alg 70] P. Alger « The induction machine their Behavior and uses», Oxford Press 1970.
- [Aus 87] H. Austin and George «Analysis of Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors », IEEE 1987
- [Bac 93] S. Bachir «Contribution au diagnostic de la machine Asynchrone par Estimation Paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de poitiers, France 1999.
- [Ben 00] M.Benbouzid « A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 47, N°5 October 2000.
- [Ben 06] N. Benouza «Approche des vecteurs de Park appliqué à la détection des défauts dans les moteurs asynchrone à cage d'écureuil », Thèse de Doctorat, Université USTO 2006
- [Bol 02] I. Boldea, S. A. Naser. « The Induction Machine Hand book », CRC Press LLC, Chapter 1, 2002.
- [Did 04] G. Didier. « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en présence de Défaillances », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I. Oct. 2004.
- [Dri 04] M.Drif « Diagnostic des Défauts dans les Machines électriques et leurs Surveillance Par Emploi De L'intelligence artificielle », Mémoire de Magister USTO Oran 2004.
- [Emm 99] S. Emmanuel « Diagnostic Des machines Asynchrones : Modèle et Outils Paramétriques Dédies à la Simulation et à la Détection de Défauts »Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France 1999.
- [Gou 92] T. B Gourare Cherche De Signature « Electromagnétique des Défauts dans Une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateurs en vue du Diagnostic » l'école doctoral ELT, ELC-AT de Lyon 1992.
- [Jar 04] W.Jarzyna « Diagnostic Characteristics of Axial Flux an Induction Machine, department of Electrical Drive System's », Technical University of Lublin, Poland 2004.
- [Khe 05] B. Khadîdja « Diagnostic automatique des défauts dans les moteurs a induction par la méthode neurone floue ». Mémoire de Magister USTO Oran 2005.
- [Kli 90] G.B Kliman and J.Stein « Induction Motor Fault detection Via Passive Current Monitoring » International Conference In Electrical Machines, Cambridge, MA.PP13-17, August 1990.
- [Lar 05] S. Laribi « Synthèse des Méthodes de diagnostic Appliquées à la détection des Défauts dans les Machines Asynchrones », Thèse Magister USTO 2005.
- [Pen 94] J.Penman, J. Sedding, H.G, Lioyd, B.A, Fink, W.T « Detection and location of Inter-turn Short Circuits in the Stator windings of operating Motors » IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994, PP.652-658.

- [Raz 93]** H. Razik « Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art » GREEN-UHP Faculté des Sciences 1993.
- [Raz 01]** H. Razik et G.Dédier. « La Détection d'un Défaut au Rotor Des Moteurs Asynchrones », IEEE. N°27. Décembre 2001.
- [Raz 05]** H. Razik et G.Dédier. « Notes de Cours Sur le Diagnostic de la Machine Asynchrone », Université Henri Poincaré, Nancy 2005.
- [Sad 07]** M. Saddek, H. Djaafar « Diagnostic de Défauts de la Machine Asynchrone à Cage D'écureuil Par la Méthode de Reconnaissance des Forme » PFE ENP Alger 2007
- [Sch 95]** R.R.Schoen, B.k.Lin, T.G.Habetler, J.H.Sclag and Samir Farag « An Unsupervised, On-Line for Induction Motor Fault detection Using stator Current Monitoring », IEEE Transactions on Industry applications Vol31, N°6 November/December 1995.
- [Tar 09]** K.Tariq, Y.A.Mohamed «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone triphasé à cage en tenant compte des harmoniques d'espace», PFE UHBC 2009.
- [Tav 86]** P.J. Tavner, B.G. Gaydon and D.M.Ward «Monitoring Generators and Large Motors »IEEE Proceedings, Vol 133, Pt, BN°4 May 1986.
- [Tou 01]** D.Toumi, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah, et A.Benyettou « Emploi de L'analyse spectrale du courant de ligne pour La Détection des Défauts d'Excentricité dans les Moteurs Asynchrones à cage d'écureuil » Proceession of SNGE 2001 Séminaire National en génie Elictrique 29-30 Octobre 2001 Université Mohamed Khider de bisakra.
- [Tou 01]** D.Toumi, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah, et A.Benyettou « Emploi de L'analyse spectrale du courant de ligne pour La Détection des Défauts d'Excentricité dans les Moteurs Asynchrones à cage d'écureuil » Conf. Magrébine en Génie Electrique CMGE 01 Université Mentouri de Constantine 2001.
- [Tou 02]** Dj. Toumi «Détection des défauts rotoriques dans la machine Asynchrone», Mémoire De Magister USTO 2002.
- [Vas 93]** P.Vas «Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machine », Clarendron Press, Oxford 1993.
- [Yan 00]** D.Yang and J. Penman « Intelligent Detection of induction motor bearing Faults Using Current and vibration Monitoring Pages 461-470, Proceedings of COMADEM 2000, 3-8 December 2000.

