

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

*Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones
triphases à cage*

Présenté par :

*MAGHRAOUI Abdelwahab
&
DEBOUCHA Abdelhakim*

Proposé et dirigé par :

Mr : BELHAMDI Saâd

Promotion: 2005 / 2006

Notation et symboles

N_s : nombre de spires statoriques par phase

N_r : nombre de barres rotorique

n : entier naturel

F.m.m: force magnétique

s,r : indices stator et rotor respectivement

e : l'épaisseur de l'entrefer [m]

f_s : fréquence d'alimentation [Hz]

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air

l : longueur active du circuit magnétique [m]

L_{sp} : inductance propre statorique [H]

L_{sf} : inductance de fuite rotorique [H]

L_b : inductance d'un barre rotorique [H]

L_e : inductance total de l'anneau de court-circuit [H]

L_{sc} : inductance cyclique [H]

I_e : courant dans l'anneau de court- circuit [A]

I_{bK} : courant de barre [A]

I_{rK} : courant dans la boucle rotorique [A]

I_{eK} : courant dans un portion d'anneau [A]

I_a, I_b, I_c : courants des phases statorique [A]

V_{abc} : les tensions statorique [V]

ϕ_{abc} : les flux statorique [wb]

ϕ_{rk} : le flux magnétique crée par une maille rotorique [Wb]

ϕ_s : flux magnétique par pole crée par le courant statorique [Wb]

M_s : mutuelle entre phase statorique [H]

θ_r : position du rotor [rd]

M_{sr} : mutuelle cyclique entre le stator [H]

a : angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]

B_s : induction magnétique crée dans l'entrefer par le courant statorique [T]

R : rayant moyen de l'entrefer

R_e : résistance totale de l'anneau de court-circuit [Ω]

R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω]

R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω]

r_s : résistance d'une phase statorique [Ω]

d, q : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement

C_e : couple électromagnétique [N.m]

J : moment d'inertie [Kg.m²]

K_0 : coefficient de frottement

w_r : vitesse de rotation mécanique

P : la puissance [W]

P : opérateur de Laplace

p : nombre de paires de pôles

θ : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator

g : glissement

Index des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Différents court circuits au stator.....	4
Figure I.2 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	5
Figure I-3 : Dimensions du roulement à bille.....	6

Chapitre II

Figure II.1 : Structure de la cage du rotor.....	13
Figure II.2 : Induction magnétique produite par une maille du rotor.....	14
Figure II-3 : Schéma équivalent des mailles rotorique.....	17
Figure II-4 Principe de la transformation de PARK.....	21
Figure II-5 : Schéma équivalent de la cage rotorique	
a : état sain.....	25
b : avec une barre rompue.....	25

Chapitre III

Figure III -1 : Simulation avec modèle global, en charge $C_r=3.5$ N.m machine saine	
a : Couple électromagnétique.....	28
b : Courant statorique état sain.....	28
c : Vitesse de rotation.....	29
d : Les courants des barres rotorique.....	29
e : Courant de la barre 1.....	30
f : Courant efficace rotorique.....	30
Figure III-2 : : Simulation avec modèle global, en charge $C_r=3.5$ N.m lors de rupture des barres 1 et 2	
a : Couple électromagnétique.....	31
b : Courant statorique.....	31
c : Vitesse de rotation lors de rupture de barres 1 et 2.....	32
d : Courants des barres lors de rupture des barres 1 et 2.....	32
e : Comparaisons entre les courant des barres 1,2 et 7,8.....	33
f : Courants des barres 1 et 2.....	34
g : courants efficace rotorique.....	34

Figure III – 3 : Simulation avec le modèle global, en charge $Cr=3.5$; avec rupture de 2 barre espacé

a : Couple électromagnétique.....	36
b : Courant statorique.....	36
c : Vitesse de rotation	37
d : Courants des barres rotorique.....	37
e : Comparaisons entre les courant des barres 1,2 et 7,8.....	38
f : Courants des barres 1 et 7.....	39
g : Courant efficace des barres rotoriques.....	39

Figure III –4 : Simulation avec le modèle global, en charge $Cr= 3.5$ N.m , avec rupture d’anneau

a : Couple électromagnétique.....	41
b : Courant statorique.....	41
c : Vitesse de rotation	42
d : Courants des barres rotorique.....	42
e : Courant de la barre 1.....	43
f : Courant de la barre 2.....	43
g : Courant de la barre 7.....	44
h : Courants efficace des barres rotorique.....	44

Chapitre IV

Figure IV – 1 : Spectre de fréquence du courant statorique en charge ($Cr = 3.5$ N.m)

a : etat sain.....	50
b : rupture de barre 1 « $R=11 \times R$ ».....	50
c : rupture de barre 1 « $R=30 \times Rb$ ».....	50
d : ruptures des barres 1et 2 « $R=11 \times Rb$ ».....	51
e : ruptures des barres 1et 2 « $R=30 \times Rb$ ».....	51
f : ruptures des barres 1et 7 « $R=11 \times Rb$ ».....	51
g : ruptures des barres 1et 7 « $R=30 \times Rb$ ».....	51
h : rupture d’une portion d’anneau.....	52

Figure IV-2 Spectre du couple électromagnétique

a : état sain.....	52
b : rupture de barre 1 « $R=30 \times Rb$ ».....	53
c : ruptures des barres 1et 2 « $R=30 \times Rb$ ».....	53
d : ruptures des barres 1et 7 « $R=30 \times Rb$ ».....	54

e : rupture d'une portion d'anneau.....	54
-----------------------------------------	----

Figure IV-3 spectre de vitesse

a : état sain.....	55
b : rupture de barre 1 « R=30×Rb ».....	55
c : ruptures des barres 1et 2 « R=30×Rb ».....	56
d : ruptures des barres 1et 7 « R=30×Rb ».....	56
e : rupture d'une portion d'anneau.....	57

Table des matières

Dédicaces	
Remerciement	
Notations et symboles	
Notation des figures	
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Les différents défauts dans la machine asynchrone

I-1 Introduction.....	3
I-2 Causes des défauts.....	3
I-3 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage.....	3
3-1 Défauts statorique.....	3
3-2 Défauts rotorique.....	4
3-2-1 Défaut de cassure de barre.....	4
3-2-2 Défaut d'excentricité.....	5
3-2-3 Défaut dû au palier.....	6
I-4 Conséquences des défauts.....	7
I-5 Méthodes de diagnostic.....	8
5-1 Méthodes externes.....	8
5-2 Méthodes internes.....	8
5-3 Méthodes inductives.....	9
5-4 Méthodes déductives.....	9
I-6 Modèle de la machine asynchrone à cage	9
6-1 Approche analytique.....	9
6-2 Approche numérique.....	10
I-7 Conclusion.....	10

Chapitre II

Modèle Multi enroulement de la machine asynchrone

II-1 Introduction	11
II-2 Modèle multi enroulements de la machine asynchrone	11
II-2-1 Calcul des inductances	12
2-1-1 Partie statorique.....	12
2-2-2 Partie rotorique.....	13
2 2-3 Mutuelles inductances entre stator et rotor	15
II-3 Mise en équations.....	16
3-1 Equations statorique.....	16
3-2 équations rotorique.....	17
3-3 Equations d'état de la machine	19
3-4 Transformation de PARK.....	20
3-5 Equation mécanique.....	24
II-4 Prise en compte du défaut dans le modèle.....	25
II-5 Conclusion.....	26

Chapitre III

Résultat de simulation de la machine multi enroulements

III-1 Introduction.....	27
III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone.....	27
III-2-1 Cas d'une machine saine.....	27
III-2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique.....	31
A) Cassure de deux barres adjacentes.....	31
B) Cassure de deux barres espacées	36
C) Rupture d'une portion d'anneau.....	41
III-3 Conclusion.....	46

Chapitre IV

Analyse spectrale

IV-1 Techniques d'analyses des défaut.....	47
IV-2 Analyse spectrale.....	47
2-1 Méthodes non-paramétrique.....	47

2-2 Méthodes paramétriques.....	48
IV-3 Analyse cepstrale.....	48
IV-4 Méthodes de détections de fréquence connues.....	48
IV-5 Méthodes temps- fréquence et temps –échelle.....	48
IV-6 Application de l'analyse spectrale.....	49
IV-7-1 Interprétations.....	57
IV-8 Conclusion.....	59
Conclusion générale	
Annexe	
Bibliographie	

Introduction générale

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations [CAS 92].

La machine à rotor à cage d'écureuil était pour sa part réservée aux entraînements à vitesse constante à cause de la difficulté de sa commande et de la difficulté du suivi de ses paramètres rotoriques. Cependant, ce moteur présente de nombreux atouts : sa puissance massique, sa robustesse, son coût de fabrication relativement faible et un entretien minimum [BOU 01].

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, obligeant les chercheurs de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter d'une façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence des défauts, tandis que la localisation a pour objet de trouver le type de défaut.

Malgré l'originalité de cette nouvelle approche, l'analyse des signaux fait toujours appel au même type d'outils mathématiques que l'analyse fréquentielle par la transformée de Fourier.

Une étude faite sur les pannes de machines asynchrones, a montré que près de 40 % sont liées aux roulements, 38 % sont concentrées au niveau du stator et 10 % au niveau du rotor, le reste (12 %) touche

d'autres parties de la machine. Les ruptures des barres ou d'anneaux de court-circuit ont fait l'objet de nombreux travaux [SAH 03].

Dans ce mémoire nous sommes intéressés au diagnostic des défauts au niveau du rotor dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil .

L'étude a été répartie en quatre chapitres :

◆ Dans le premier chapitre, on présente les causes et les natures des différents défauts et aussi les méthodes de diagnostic et le modèle de la machine asynchrone, dans un moteur à cage d'écureuil.

- ◆ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la formulation mathématique du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage.
- ◆ Pour le troisième chapitre on va présente les résultats de simulation du modèle multi enroulement (à l'état sain et avec cassure de barre et portion d'anneau).
- ◆ Dans le quatrième chapitre on va étudié l'analyse des défauts à travers de l'analyse spectrale du courant, de la vitesse et du couple en utilisant transformation de fourier rapide FFT. Et on termine par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Les différents défauts dans la machine asynchrone

I-1	Introduction.....	3
I-2	Causes des défauts.....	3
I-3	Différents défauts dans la machine asynchrone à cage.....	3
3-1	Défauts statorique.....	3
3-2	Défauts rotorique.....	4
3-2-1	Défaut de cassure de barre.....	4
3-2-2	Défaut d'excentricité.....	5
3-2-3	Défaut dû au palier.....	6
I-4	Conséquences des défauts.....	7
I-5	Méthodes de diagnostic.....	8
5-1	Méthodes externes.....	8
5-2	Méthodes internes.....	8
5-3	Méthodes inductives.....	9
5-4	Méthodes déductives.....	9
I-6	Modèle de la machine asynchrone à cage	9
6-1	Approche analytique.....	9
6-2	Approche numérique.....	10
I-7	Conclusion.....	10

I-1 Introduction

La sécurité des système présente une importance majeure dans les processus industriels, toute défaillance de l'instrumentation conduit à la génération d'information fausses, la machine asynchrone est très répandue dans le milieu industriel grâce à sa robustesse, malgré ses qualités la machine asynchrone à cage d'écureuil peut présenter des défauts structurels, parmi lesquels la rupture totale ou partielle de barre rotorique et portion d'anneau.

Dans ce chapitre on va présenter les différents défauts au niveau de la machine asynchrone.

I-2 Causes des défauts

Les origines des défauts sont souvent de nature différentes, mais sont généralement fortement liées les uns aux autres, on cite comme causes majeures [BEL 05] :

- a) Causes thermiques : balourds thermique, points chauds, températures ambiantes élevées.
- b) Entourage du moteur (tension transitoire d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement, mauvais courant de charge, sur charge, corrosion humidité...)
- c) Causes mécaniques et mauvais emploi du moteur (résonance avec la commande de la vitesse, chocs en service, vibrations, jeu excessifs, balourds mécaniques....)
- d) Les vices de fabrication.
- e) Erreurs pendant la réparation (taille et type impropriété d'enroulement, roulement inadéquat).
- f) Equissement de la durée de vie du moteur.

I-3 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage

I-3-1 Défauts statoriques

A partir des études théorique, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator, les fréquences additionnelles sont données par la relation suivante [BEL 05] [HUB 02] :

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1-g) \pm k \right\} \quad (1-1)$$

Où f_{cc} : fréquence de court-circuit
 n : entier naturel

Les différents courts-circuits sont représentés dans la figure ci-dessous :

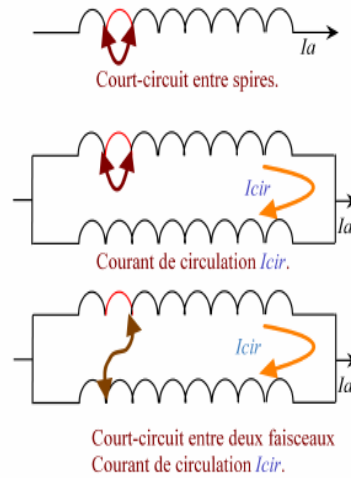


Figure I.1 : Différents court circuits au stator

Dans ces deux derniers cas, il peut y avoir existence d'un courant de circulation (I_{cir}) dans ces deux faisceaux car la différence de potentiel est différente entre les extrémités de ceux-ci, il y'a aussi autres défauts statorique

- coupure d'une phase,
- défaut d'isolation,
- défauts du circuit magnétique (rupture de tôle).

I-3-2 Défauts rotorique

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotorique telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer [BEL 05] [HUB 02].

I-3-2-1 Défaut de cassure de barre

La cassure de barre rotorique provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant de sens opposé a celui génère par le stator, et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura création d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique, la relation de la fréquence est donnée sous la forme :

$$f_{bc} = (1 \pm 2k g) f_s \quad (1-2)$$

f_{bc} : fréquence de barre cassé .

I-3-2-2 Défaut d'excentricité [HUB 02]

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles celles ci relèvent de trois catégories qui sont pour l'essentiel :

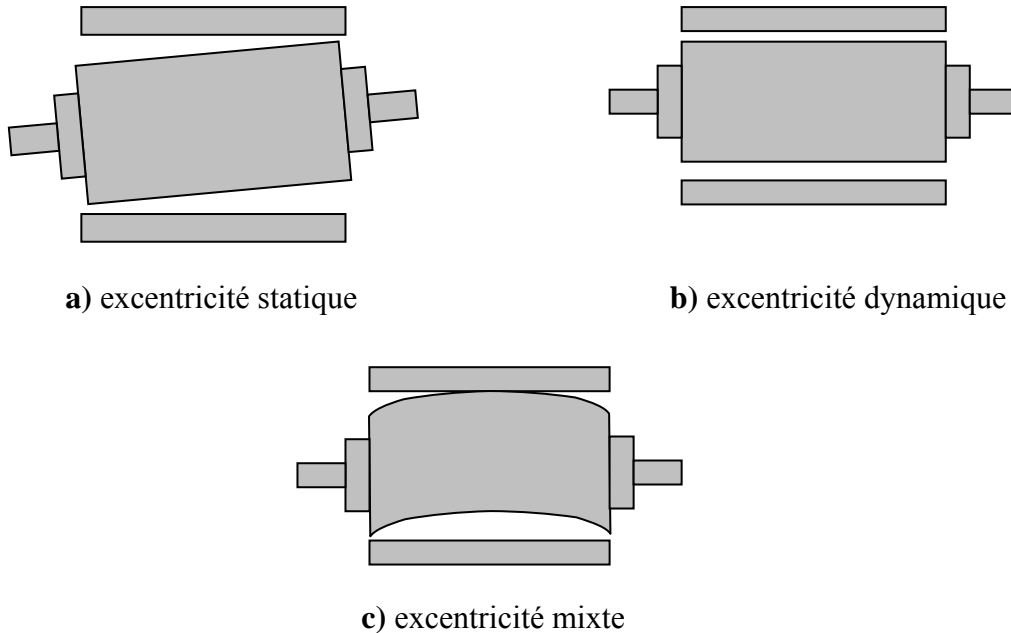


Figure I.2 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

- a) L'excentricité statique correspond au cas le centre de rotation du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator.
- b) L'excentricité dynamique correspond, elle a un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.
- c) L'excentricité mixte est la somme des deux cas présentés ci-avant

Les fréquences induites proche, du fondamental, sont données par [HUB 02] :

$$f_{exe} = \left[1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] f_s \quad (1-3)$$

f_{exe} : Fréquence d'excentricité

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre casée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor. C'est ainsi qu'une équation sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles.

Les causes de l'excentricité peuvent être dues au positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des paliers ou à la torsion de l'arbre.

I-3-2-3 Défaut dû au palier [SAH 03]

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricité interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone, pour cela les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être d'écrits par l'expression [SAH 03] :

$$f_{roul} = f_s \pm k f_v \quad (1-4)$$

D'où $k=1, 2, 3 \dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations

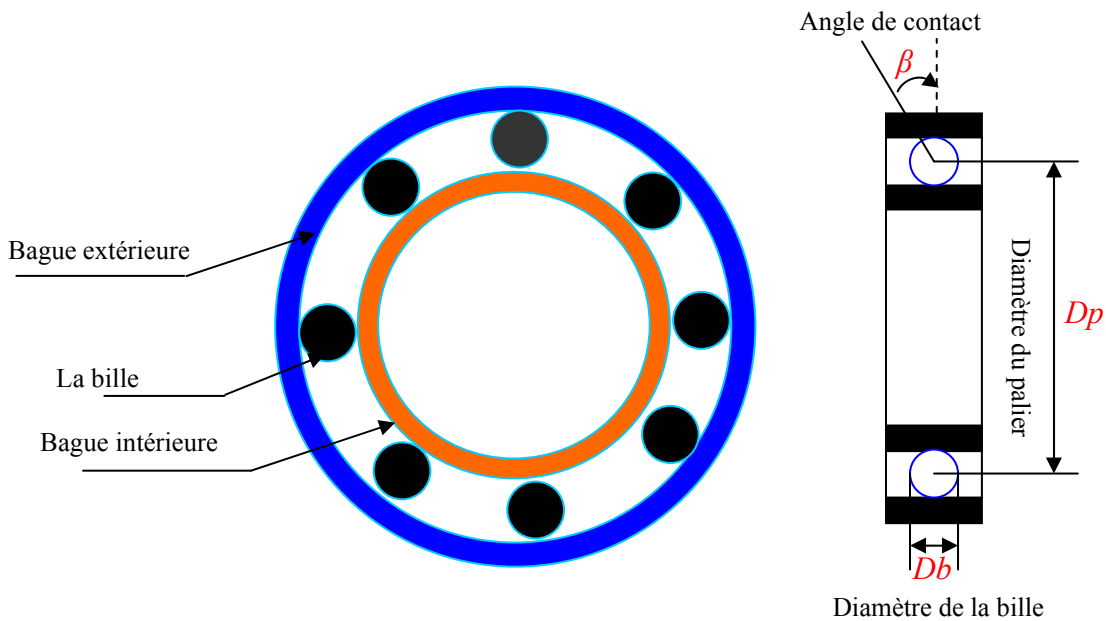


Figure I-3 : Dimensions du roulement à bille

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques du roulement.

Selon [SAH 03], les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{Dp}{Db} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (1-5)$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right] \quad (1-6)$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right] \quad (1-7)$$

Où : f_{rot} : fréquence de rotation du rotor

Pour des dimensions courantes où le nombre de billes comprises entre 6 et 12, pour cela, il est usuel d'appliquer les deux relations suivantes :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (1-8)$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (1-9)$$

I-4 Conséquences des défauts

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

- Effectuations au niveau du couple et de la vitesse
- Appel supplémentaire de courant
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global.

I-5- Méthodes de diagnostic [BEL 05] [ABE 02]

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

- les méthodes internes et externes.
- les méthodes inductives et déductives

I-5-1 Méthodes externes

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

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

I-5-2 Méthodes internes

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

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé.

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

I-5-3 Méthodes inductives

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut.

I-5-4 Méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système

Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement appelé mixte ou avant arrière.

I-6- Modèle de la machine asynchrone à cage

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défaut et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, on cite [BEL 05] [ABE 02]:

I-6-1 Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par une relation linéaire entre le flux et le courant

Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, la théorie des circuits permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine [BEL 05] [BAG 02].

I-6-2 Approche numérique

On cite deux méthodes :

- **La méthode des réseaux de perméance**

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux caractérisés par des perméance. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette tient en compte aussi la saturation. [SAH 03].

- **La méthode des éléments finis**

Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de MAXWELL, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de telles méthodes en simulation des algorithmes de détection des défauts.

I-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts pouvant affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs conséquences, ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic. Notre travail est consacré à l'étude et à la détection des cassures de barres et d'anneaux de court-circuit dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle mathématique, décrivant le comportement dans l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II

Modèle Multi enroulement de la machine asynchrone

II-1 Introduction	11
II-2 Modèle multi enroulements de la machine asynchrone	11
II-2-1 Calcul des inductances	12
2-1-1 Partie statorique.....	12
2-2-2 Partie rotorique.....	13
2 2-3 Mutuelles inductances entre stator et rotor	15
II-3 Mise en Equations.....	16
3-1 Equations statorique.....	16
3-2 équations rotorique.....	17
3-3 Equations d'état de la machine	19
3-4 Transformation de PARK.....	20
3-5 Equation mécanique.....	23
II-4 Prise en compte du défaut dans le modèle.....	25
II-5 Conclusion.....	26

II-1 Introduction

La mise en point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant complètement de la machine non pas d'une façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte et plus fine en intégrant certains paramètres de la machine.

Les modèles simples (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes, ses modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe. Donc, il a fallu s'orienter vers le modèle multi enroulement pour une description adaptée aux défauts.

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de représenter les barres ou les anneaux de court circuit pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, nous avons développé un modèle basé sur un circuit maille représentant la cage rotorique, nous avons privilégié l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calcul complexe.

II-2 Modèle multi enroulement d'une machine asynchrone

L'objectif est de procéder à un développement d'un modèle de la machine asynchrone qui mette en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine est permet de simuler son fonctionnement en régime des défauts .La seconde approche retenue ici consiste a interprété la machine du point de vue de la théorie des circuits pour faciliter la simulation et la mise au point les problèmes de rupture de barres et d'anneaux de court circuit [BEL 05][REZ 03].

II-2-1 Calcul des inductances

II-2-1-1 Partie Statorique [BEL 05]

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périmètre de l'entrefer de telle sorte que l'induction résultante puisse être sinusoïdale, dans ce cas l'expression de la FMM sera :

$$F(\theta) = \frac{2N_s}{\pi \cdot p} I_s \cos(\theta) \quad (2-1)$$

D'après le théorème d'Ampère on peut écrire :

$$F(\theta) = \oint H dl = \frac{N_s \cdot I_s}{p} \quad (2-2)$$

la décomposition de l'induction sera :

$$B(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos(p\theta) \quad (2-3)$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression (2-3) on écrit :

$$\Phi_s = \iint_s B_s ds = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R l d\theta$$

On obtient :

$$\Phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e \cdot p^2} R l I_s \quad (2-4)$$

Le flux total traversant l'enroulement de la phase « a » est :

$$\Psi_{sa} = N_s \Phi_s = N_s I_s \frac{2\mu_0 N_s R l}{e \cdot p \cdot \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(p\theta) d\theta \quad (2-5)$$

Donc :

$$\Psi_{as} = L_{sp} I_s$$

L'inductance principale de la phase « a » statorique d'après (2-5) est donnée par :

$$L_{sp} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e p^2 \pi} R l \quad (2-6)$$

Le flux de fuite est donné par :

$$\Phi_{fs} = L_{fs} \cdot I_s \tag{2-7}$$

L'inductance totale de la phase "a" est égale a la somme de l'inductance de magnétisation et la l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{fs} \tag{2-8}$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont considérées égaux ($L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$)

II-2-1-2 Partie Rotorique

La figure II-1 illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent, le rotor a était décomposer en circuit élémentaire (mailles) constituer de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneau[BEL 05].

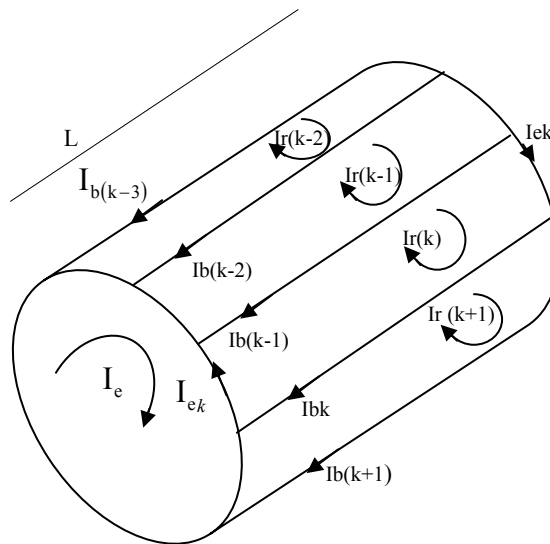


Figure II.1 : Structure de la cage du rotor

La figure II-2- représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique supposée radiale produite par une maille rotorique dans l'entrefer en remarque que contrairement au stator ,elle ne peut se ramener au fondamental de sa décomposition en série de Fourier [BEL 05] [BAG 99].

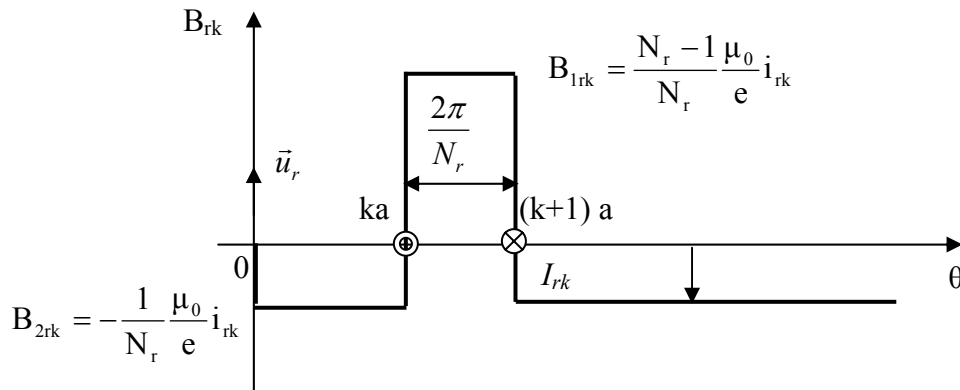


Figure II.2: induction magnétique produite par une maille du rotor

La distribution spatial du champ dû à la k^{eme} boucle de courant rotorique, est considérée comme étant rectangulaire, l'inductance principale et l'inductance mutuelle d'une maille rotorique sont données par l'expression du flux propre de la maille k.

On a donc :

$$\Phi_{rpk} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{1rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rpk} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} I_{rk} \tag{2-10}$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} \tag{2-11}$$

L'inductance totale de la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuites de deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille k .

$$L_{rr} = L_{rp} + 2 L_b + 2 L_e \quad (2-12)$$

Les mailles rotoriques sont magnétique ment couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer, le flux traversant la $j^{\text{ème}}$ maille produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donné par :

$$\Phi_{rjrk} = \int_{ja}^{(j+1)a} B_{2rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rjrk} = \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R l I_{rk} \right) d\theta \quad (2-13)$$

D'après l'équation (2-13) on obtint l'inductance mutuelle :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2 \pi l R \quad (2-14)$$

II-2-1-3-Mutuelle inductances entre stator et rotor

L'induction produite par la bobine de la phase « n » dans la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est donnée par :

$$B_{msr} = \frac{2 \mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2-15)$$

avec $n = (1, 2, 3)$

Le flux traversant la maille k , est donné par :

$$\Phi_{rka} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{msr} R l d\theta$$

On obtient :

$$\Phi_{rka} = \frac{2 \mu_0}{\pi e p} N_s R l I_s \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{ka}^{(k+1)a} \quad (2-16)$$

L'inductance mutuelle entre la phase « a » du stator et la maille rotorique est :

$$M_{rk a} = -M_{sr} \cos\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3} + ka\right) \quad (2-17)$$

$$\text{avec } M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right), \quad a = p \frac{2\pi}{N_r}$$

II-3 Mise en équation

L'objectif de cette étape est de trouver un modèle adéquat de la machine asynchrone pour la simulation.

II-3 –1 Equations statorique

Les équations de la tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s] [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \\ [\Phi_{abc}] = [L_s] [I_{abc}] + [M_{sr}] [I_{rk}] \end{cases} \quad (2-18)$$

avec :

$$[V_{abc}] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$$

$$[I_{abc}] = [I_a \ I_b \ I_c]^t$$

$$[I_{rK}] = [I_{r0} \ I_{r1} \ \dots \ I_{r(N_r-1)}]^t$$

$$[\Phi_{abc}] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^t$$

La matrice des résistances statopriques est :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

La matrice d'inductance statorique s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix}$$

Les inductances mutuelles entre phases statorique et maille rotorique s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Avec $k=0, 1, 2, \dots, Nr-1$

II-3 -2 Equations rotorique

La figure (II-3) présente une boucle k du rotor, et montre les conventions choisies pour les courants.

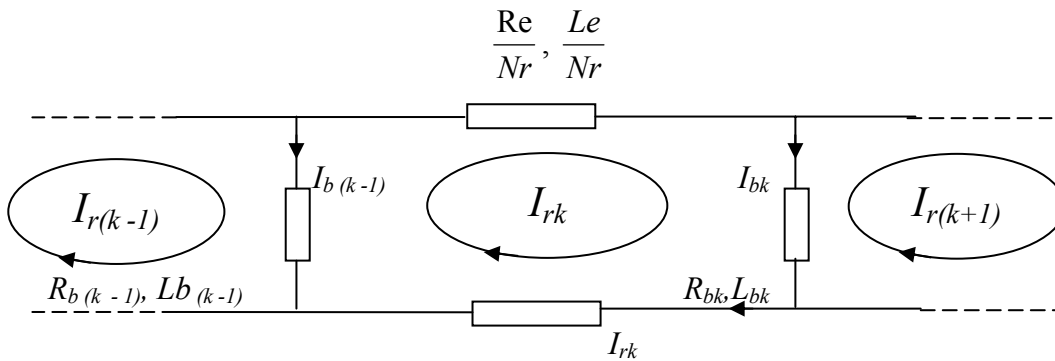


Figure II-3 schéma équivalent des mailles rotorique

Sachant que :

$$\begin{cases} I_{ek} = I_{rk} - I_e \\ I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k-1)} \end{cases}$$

L'équation électrique relative à la maille k est donnée par :

$$\frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} \cdot I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} I_{ek} + R_{bk} I_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} \quad (2-19)$$

Le flux totalisé Φ_{rK} pour un circuit élémentaire k est la somme des termes suivantes :

♦ le flux principal :

$$\Phi_{rp} = L_{rp} \cdot I_{rk}$$

♦ le flux mutuel avec les autres circuits du rotor :

$$\Phi_{rr} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 0}}^{N_r-1} I_{rj}$$

♦ Le flux mutuel avec le stator est :

$$\Phi_{sr} = M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \quad \vdots \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \vdots \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix}$$

L'équation (2-19) devient donc :

$$0 = \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{r(k-1)} - R_{bk} I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d\Phi_{rk}}{dt}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \Phi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_b \right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} I_e \\ & - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-20)$$

Avec $k=0,1,2,\dots,N_r-1$

L'équation relative à l'anneau de court-circuit est :

$$\frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - \left(R_e I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \right) = 0$$

de même façon on utilise les équations de $I_{e(k)}$ et $I_{b(k)}$ et on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r} I_{r(k)} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{d}{dt} I_{r(k)} - L_e \frac{d}{dt} I_e - R_e I_e = 0 \quad (2-$$

21)

II-3 –3 Equation d'état de la machine

Le système est mis sous la forme suivant :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \frac{d[L]}{dt} [I] \tag{2-22}$$

Avec :

$[V] = [V_a \ V_b \ V_c \ ; \ 0 \ 0 \dots 0 \ ; \ 0]^t$: le vecteur global des tension ((N_r+4)x1)il contient les trois tensions statorique et les N_r tensions des mailles rotoriques , ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit .

$[I] = [I_a \ I_b \ I_c \ ; \ I_{r0} \ I_{r1} \dots I_{rk} \dots I_{r(N_r-1)} \ ; \ I_e]^t$: le vecteur global des courants ((N_r+4)x1), il contient les courants statorique et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

La matrice globale des résistances est :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s]_{3 \times 3} & : & [0]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]_{(N_r+1) \times 3} & : & [R_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_r-1)} & : & \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ 0 & \dots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & \dots & 0 & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ -R_{b(N_r-1)} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & : & \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ \frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} & : & R_e \end{bmatrix}$$

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s]_{3 \times 3} & : & [M_{sr}]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{rs}]_{(N_r+1) \times 3} & : & [L_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \dots & \dots & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & : & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & : & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & : & L_e \end{bmatrix}$$

La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[M]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} & [0] \end{bmatrix}$$

II-3 -4 Transformation de PARK

Pour obtenir un système des équations à coefficients constants, il est usuel de faire appel à une transformation de PARK elle permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c)

Au repère d'axe (h, d, q) .

Le système des grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q) [BEL 05].

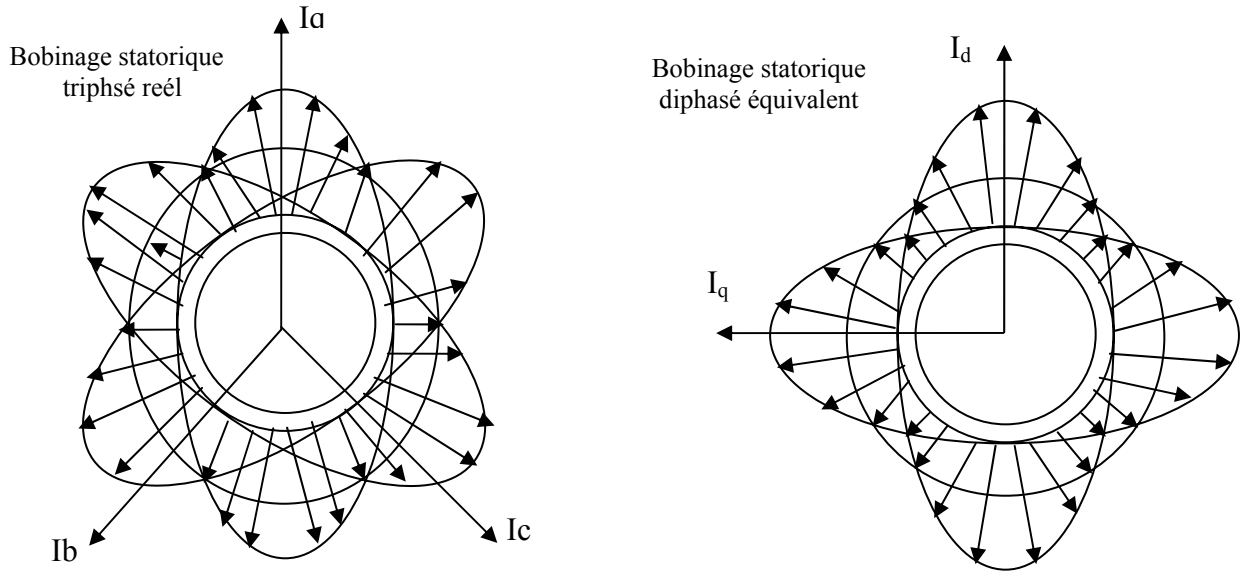


Figure II-4 Principe de la transformation de PARK

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d}{dt} [P(\theta)] = -\omega \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

On définit la matrice globale de Park de dimension $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$ comme :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^t & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

L'inverse de la matrice globale de Park est :

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^t & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

Sachant que :

$$[V] = [T] [V_{tr}], \quad \text{avec : } [V_{tr}] = [V_{os} \quad V_{ds} \quad V_{qs} \quad : 0 \quad 0 \dots 0 : 0]^t$$

$$[I] = [T] [I_{tr}], \quad \text{avec : } [I_{tr}] = [I_{os} \quad I_{ds} \quad I_{qs} \quad : I_{r0} \dots I_{r1} \dots I_{r(N_r-1)} \quad : I_e]^t$$

A partir de l'équation (2-22) :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + \frac{d[L]}{dt}[T][I_{tr}] + [L]\frac{d[T]}{dt}[I_{tr}] + [L][T]\frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

$$[V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}\frac{d[L]}{dt}[T]}_B + \underbrace{[T]^{-1}[L]\frac{d[T]}{dt}}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

$$[V_{tr}] = (A + B + C)[I_{tr}] + D \frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

avec les termes A, B, C, D donnés par :

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & : & [R_r] \end{bmatrix}$$

$$B = [T]^{-1}\frac{d[L]}{dt}[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s]\frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}]\frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \end{bmatrix}$$

$$C = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & : & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & & \dots \\ [P(\theta)] \frac{d[M_{sr}]}{dt} & : & [0] \end{bmatrix}$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & : & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & & \dots \\ [M_{sr}]^t [P(\theta)] & : & [L_r] \end{bmatrix}$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension N_r+4 ;

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{tr}] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ \dots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} + [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ \dots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park.

A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques (2-26) (2-27) afin d'avoir la vitesse électrique et la position électrique θ_r du rotor.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_r) \quad (2-26)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2-27)$$

II-3 -5 Equation mécanique

La puissance absorbée de la machine asynchrone s'écrit :

$$P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} + V_{os} I_{os}$$

On posant :

$$[X_{dqo}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [X_{abc}] = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Avec $X = (i, v, \Phi)$ et Φ est le flux d'induction totalisé dans l'enroulement

Soit $[P]$ la matrice de transformation directe, de telle sorte que : $[X_{dqo}] = [P][X_{abc}]$

Dans ces conditions la puissance instantanée a pour expression :

$$P_e = [V_{abc}]^t [I_{abc}] = [V_{dqo}]^t [I_{dqo}] \quad (2-28)$$

$$[V_{dqo}] = [R_s] [I_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}] + [P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} [\Phi_{dqo}] \quad (2-29)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} \\ V_{os} = R_s I_{os} + \frac{d}{dt} \Phi_{os} \end{cases}$$

$$P_e = \left(R_s I_{ds}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{ds} \right) I_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} I_{ds} \right) + \left(R_s I_{qs}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{qs} \right) I_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} I_{qs} \right) + \left(R_s I_{os}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{os} \right) I_{os} \right)$$

$$P_e = (R_s \cdot I_{ds}^2 + R_s \cdot I_{qs}^2) + I_{ds} \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + I_{qs} \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right) + \omega_{er} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})$$

♦ $P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$: La puissance dissipée en pertes joules.

♦ $P_v = I_{ds} \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + I_{qs} \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$: La puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique.

♦ $P_m = \omega_{er} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})$: La puissance mécanique.

Or la puissance mécanique égale à $(C_e \cdot \Omega)$ ou à $C_e \frac{\omega_r}{p}$, en tire l'expression scalaire du couple :

$$C_e = p |\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}| \quad (2-30)$$

On remplace Φ_{ds} et Φ_{qs} par ces expressions et on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} p \cdot M_{sr} \left(I_{ds} \sum_{K=0}^{N_r-1} I_{r(K)} \sin(k.a) - I_{qs} \sum_{K=0}^{N_r-1} I_{r(K)} \cos(k.a) \right) \quad (2-31)$$

II-4 Prise en compte du défaut dans le modèle

Il est assez difficile de décrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre.

On peut modéliser la cassure d'une barre par l'annulation du courant qui traverse cette barre. Les matrices des inductance et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rupture, le courant I_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille (k-1) devient égal au courant dans la maille (k), c'est-à-dire, ($I_{r(k-1)} = I_{rk}$) figure (II-4). Ceci est traduit dans les matrices des inductances et les matrices des résistances par l'addition des deux colonne et des deux lignes liés aux courant $I_{r(k-1)}$ et I_{rk} , ou d'autre terme l'ordre du système est réduit [BEL 05] [SAH 03].

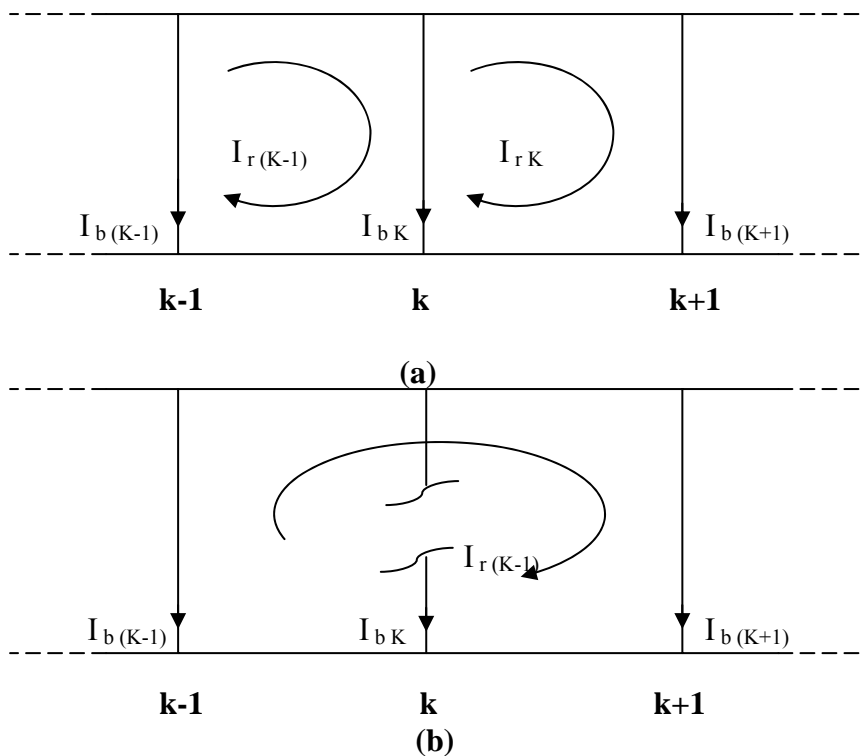


Figure II-5 : schéma équivalent de la cage rotorique
 (a). état sain (b). avec une barre rompue

A comparé entre les résultats de simulation, lorsqu'on modélise la cassure d'une barre par la méthode décrite ci-dessus, et les résultats expérimentaux, il a trouvé que cette méthode est limitée ceci est dû aux hypothèses simplificatrices, puisque dans le modèle

Mathématique on a négligé les courants de fuite entre les barres. En réalité le courant dans une barre rompue n'est jamais nul, il existe toujours un courant qui passe tangentiellement à travers les tôles du rotor vers les barres adjacentes.

Il est possible de modéliser ce phénomène par l'addition d'une résistance de grande valeur par rapport à la résistance de la barre rotorique rompue.

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le développement d'un modèle mathématique multi enroulement qui prend en considération la structure du rotor, le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou d'anneau au rotor, ce type de défaut est modélisé par l'augmentation de la résistance de l'élément défectueux. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de la simulation obtenus à l'aide de ce modèle.

Chapitre III

Résultat de simulation de la machine multi enroulements

III-1 Introduction.....	27
III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone.....	27
III-2-1 Cas d'une machine saine.....	27
III-2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique.....	31
A) Cassure de deux barres adjacentes	31
B) Cassure de deux barres espacées.....	36
C) Rupture d'une portion d'anneau.....	41
III-3 Conclusion.....	46

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotorique, le couple et la vitesse de rotation ainsi que les valeurs efficaces des courants des barres et les courants des barres cassées. La modulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. En suite, on présente une analyse détaillée des différents défauts rotorique. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur .

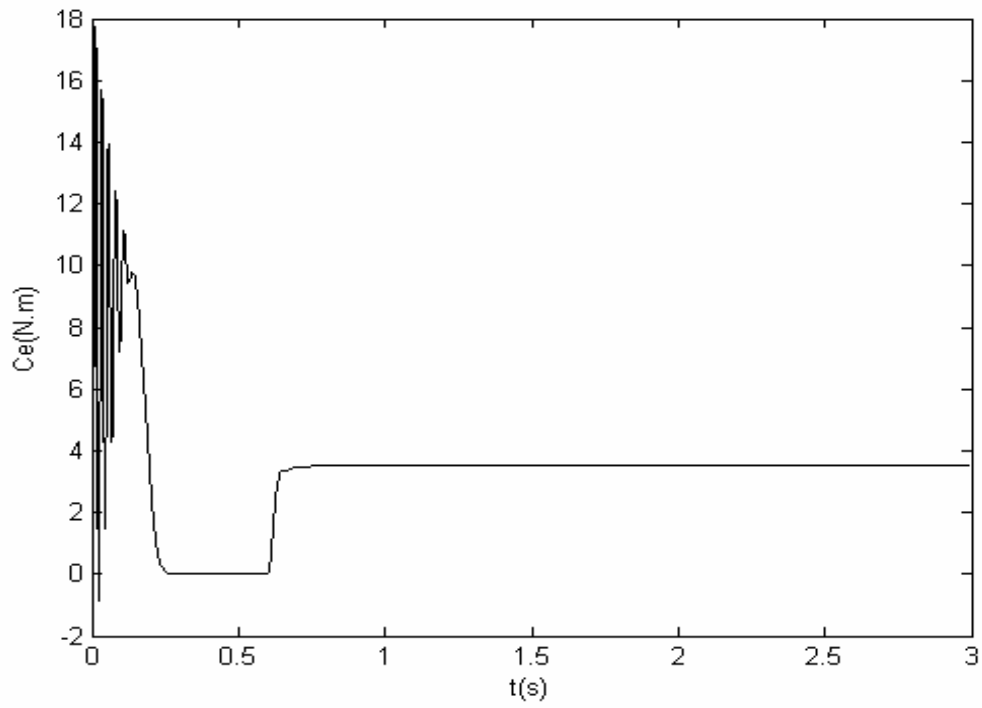
La valeur de la résistance doit être bien déterminé, d'après les chercheurs on prend la valeur de la résistance de la barre cassée comme suit ($R_{bc}=11*R_b$) .

III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone

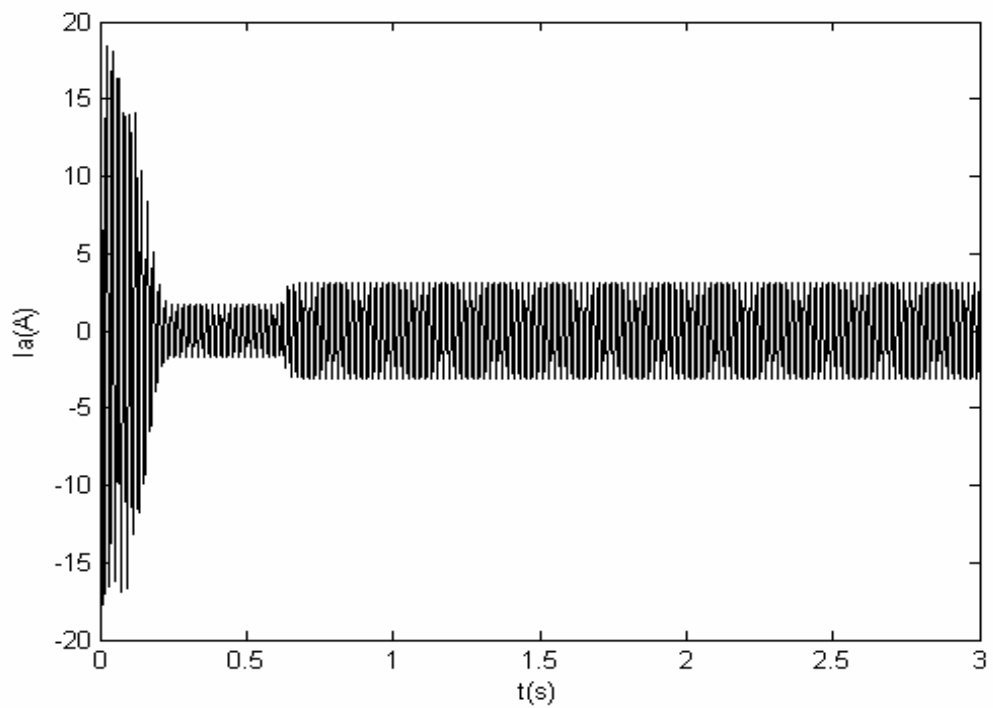
A l'aide d'un logiciel mathématique en utilisant MATLAB 6.5 qui permet de mettre en évidence le comportement de la machine asynchrone, MATLAB est un système de très grandes performances pour plusieurs domaines de recherche, le secret de ce pouvoir réside dans ces multiples applications et ces outils efficaces qu'il offre fonction et visualisation. La résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

III-2-1 Cas d'une machine saine

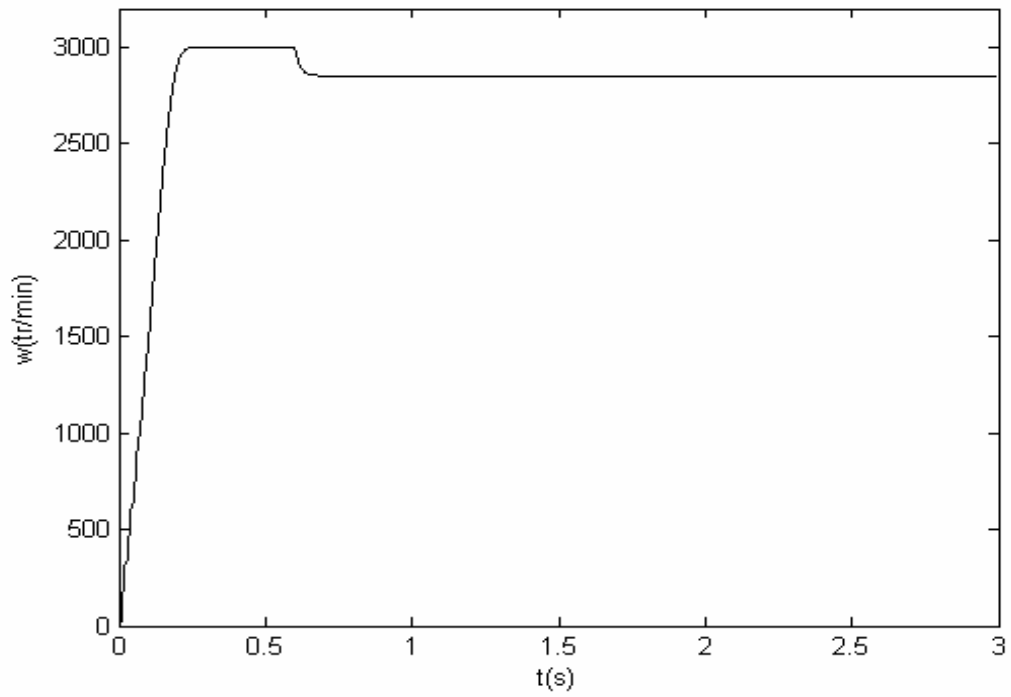
La figure III -1 montrent respectivement, l'évolution du couple électromagnétique, le courant statorique, la vitesse de rotation ainsi que les courants des barres rotorique, le courant de barre 1 et la valeur efficace des courants rotorique. Dans ce cas on va simuler le modèle global de la machine à l'état sain, à partir de $t=0.6s$ on applique une charge de 3.5 Nm.



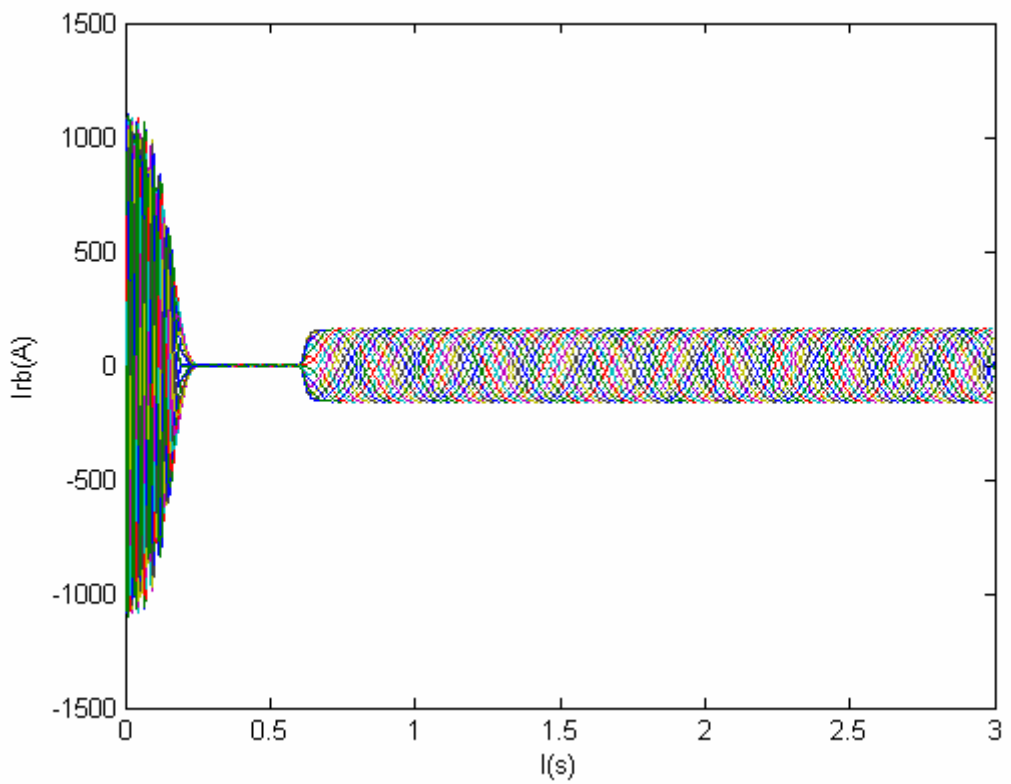
a : Couple électromagnétique



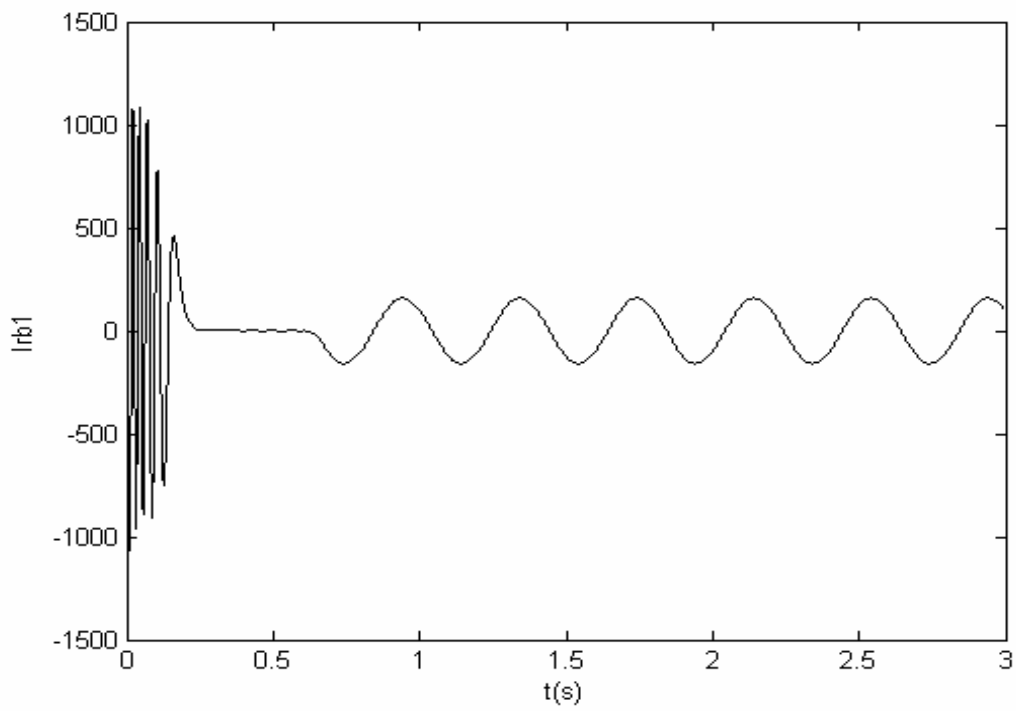
b : Courant statorique état sain



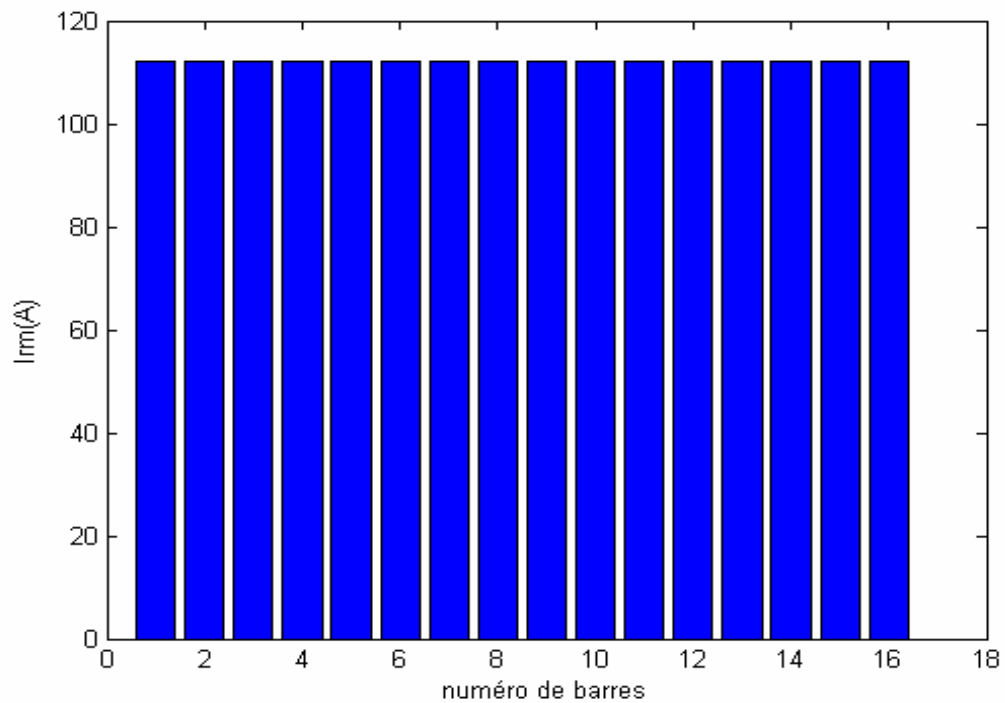
c : Vitesse de rotation



d : Les courants des barres rotorique



e : Courant de la barre 1



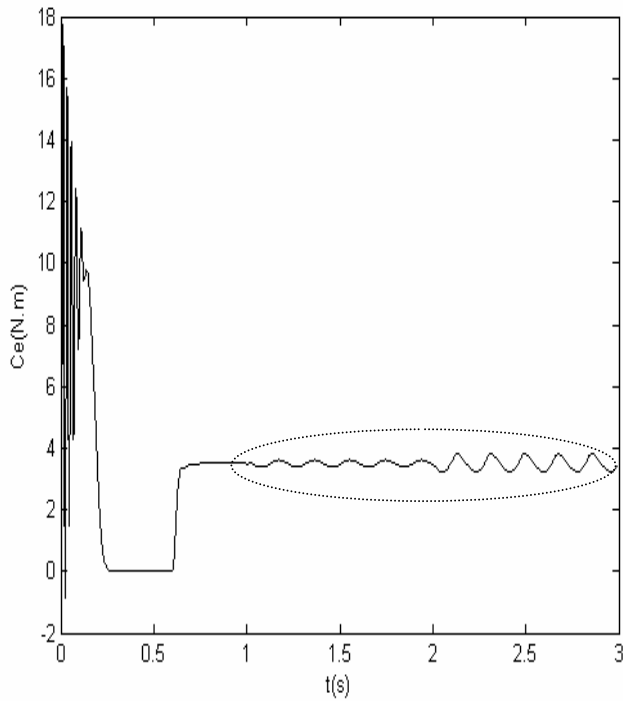
f : Courant efficace rotorique

figure III –1 : Simulation avec modèle global, en charge à $t=0.6s$ $C_r=3.5$ N.m machine saine

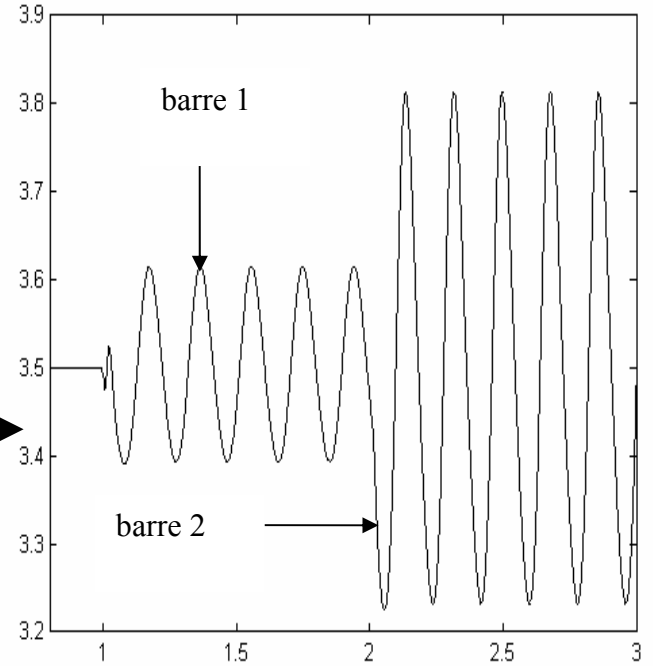
III-2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique

A) Cassure de deux barres adjacentes

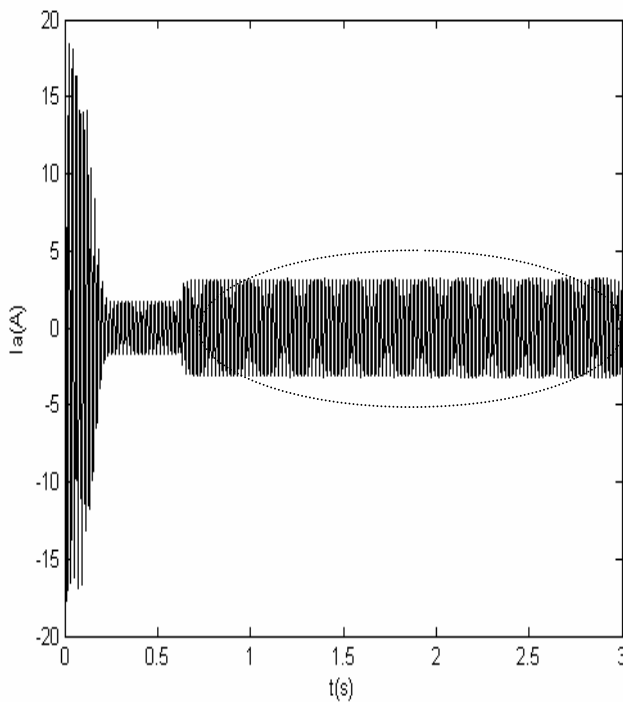
A partir de $t=0.6s$, on va appliqué une charge de $3.5 Nm$, et à $t=1s$ on simule la rupture de la barre 1, on va augmente la résistance de la barre à $11 \cdot R_b$, à $t=2s$ on simule la rupture de la barre adjacente 2.



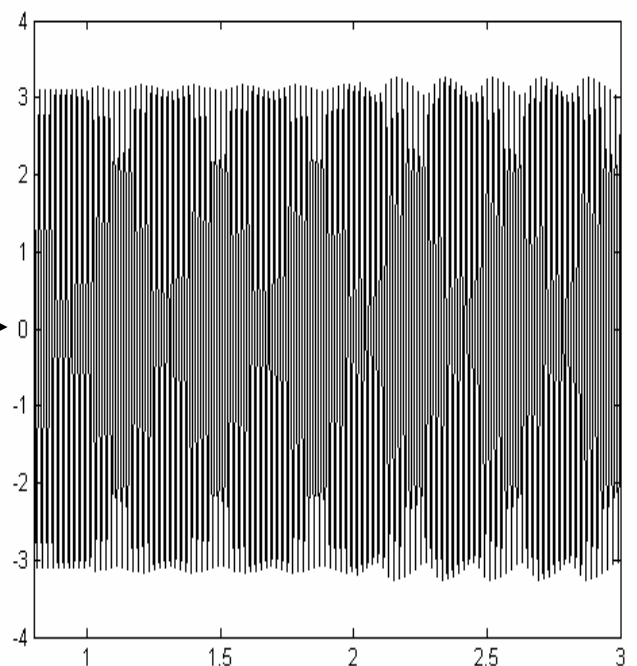
a: Couple électromagnétique



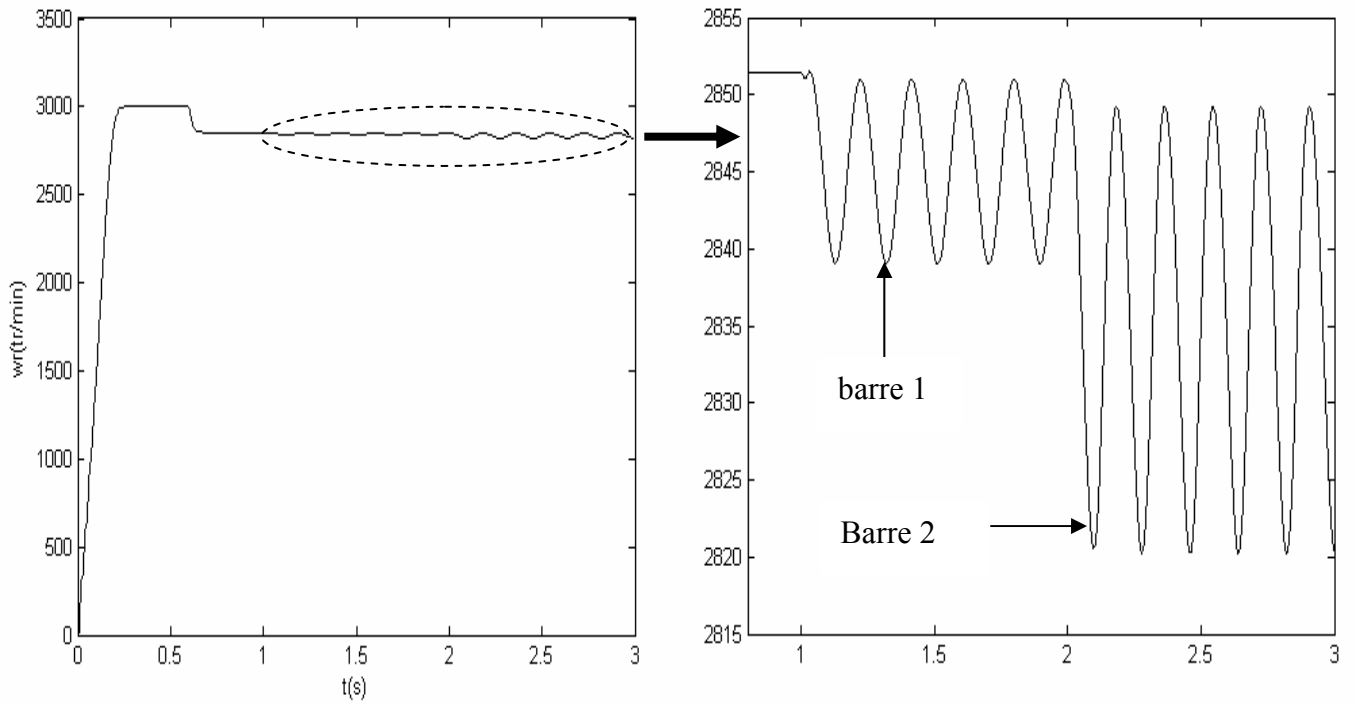
Agrandissement du couple



b : Courant statorique

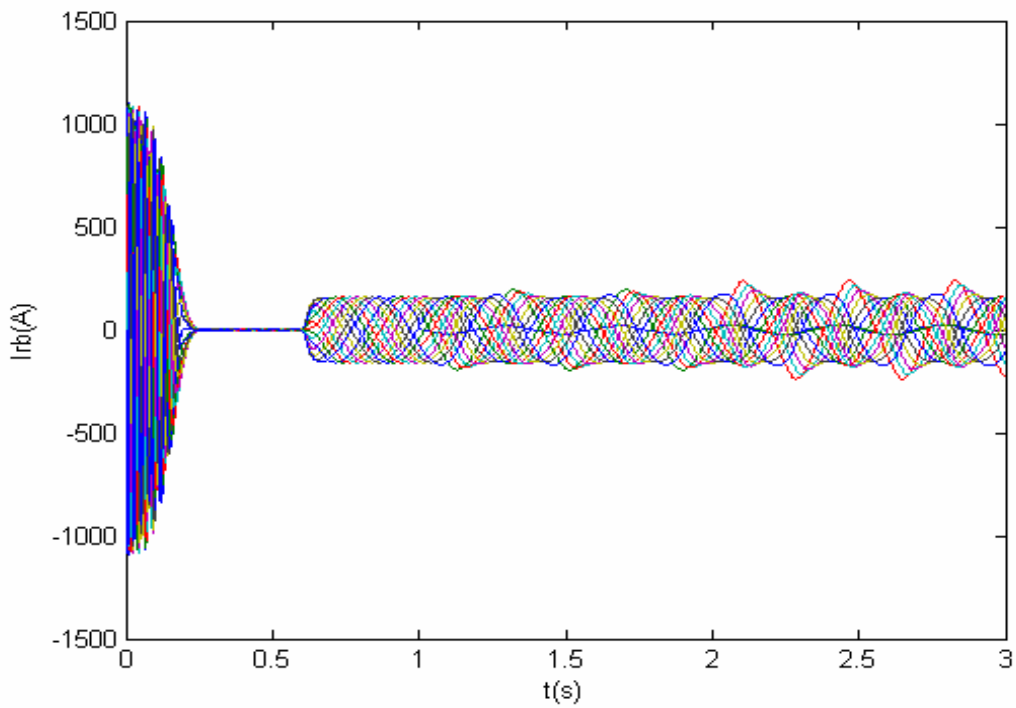


Agrandissement du courant statorique

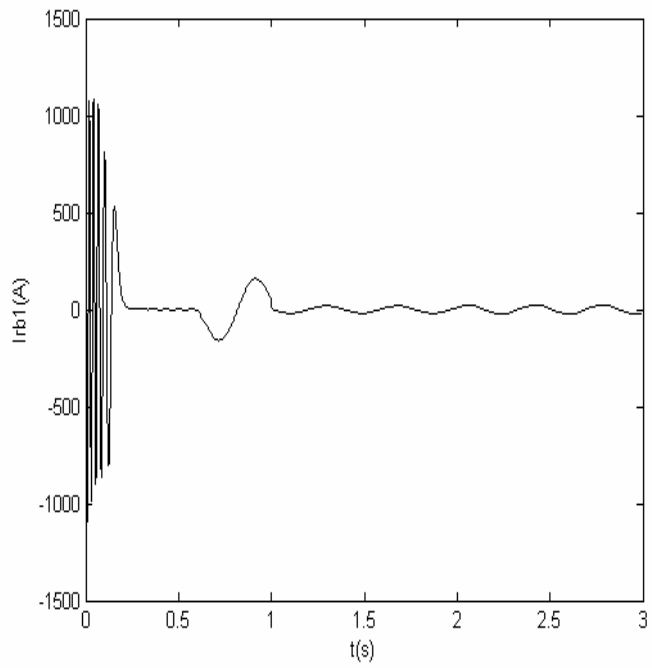


c : Vitesse de rotation

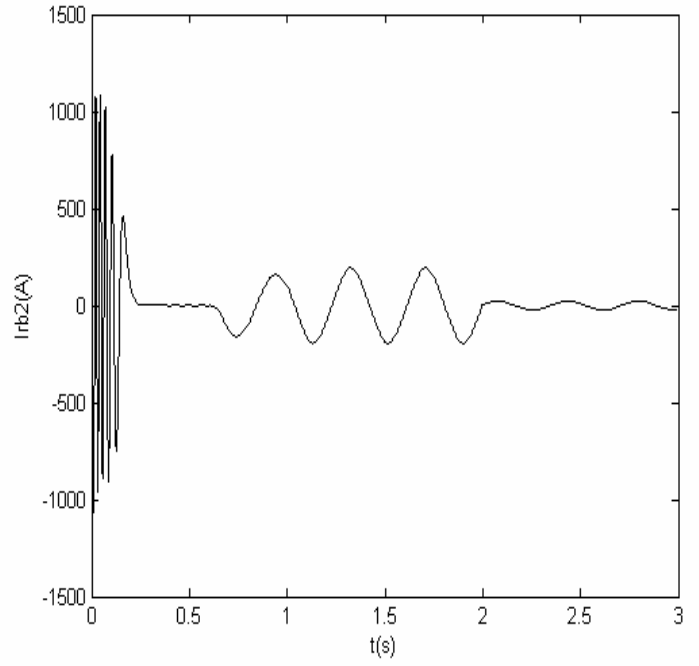
Agrandissement de la vitesse



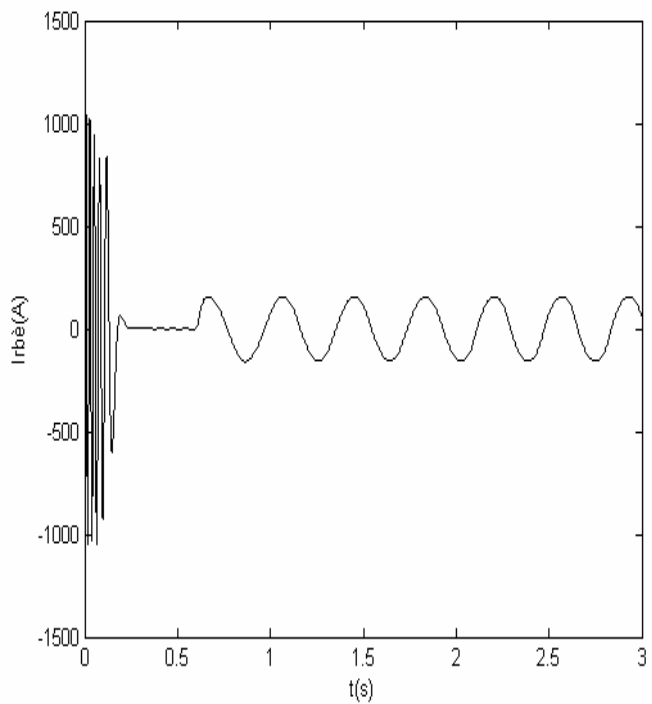
d: Courants des barres rotoriques



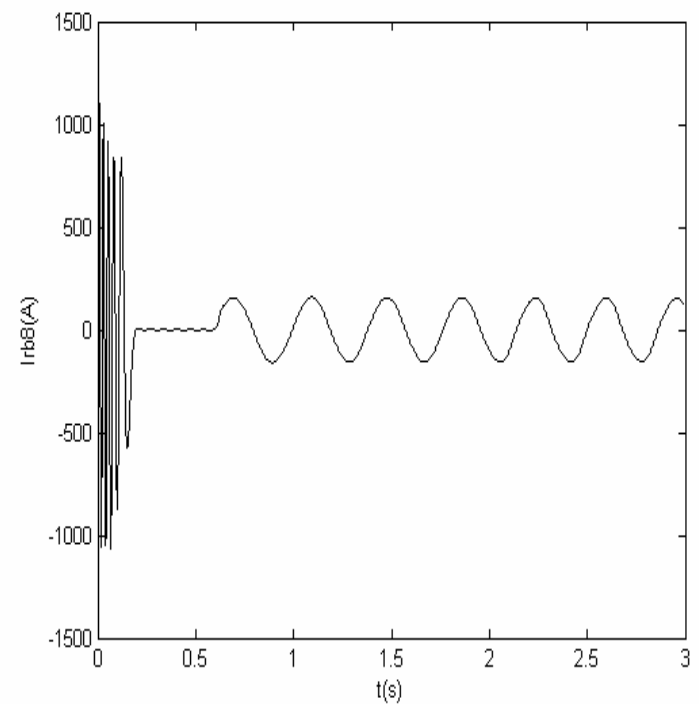
Courant de la barre 1



Courant de la barre 2

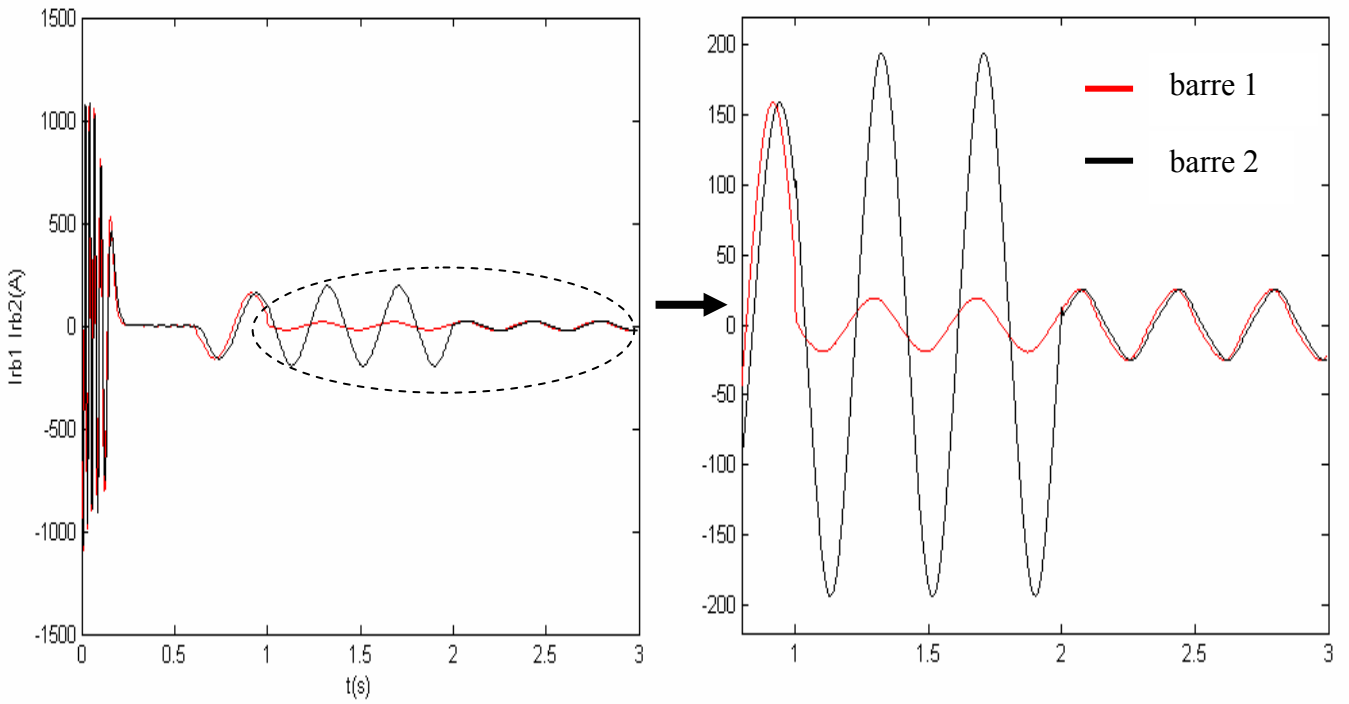


Courant de la barre 7



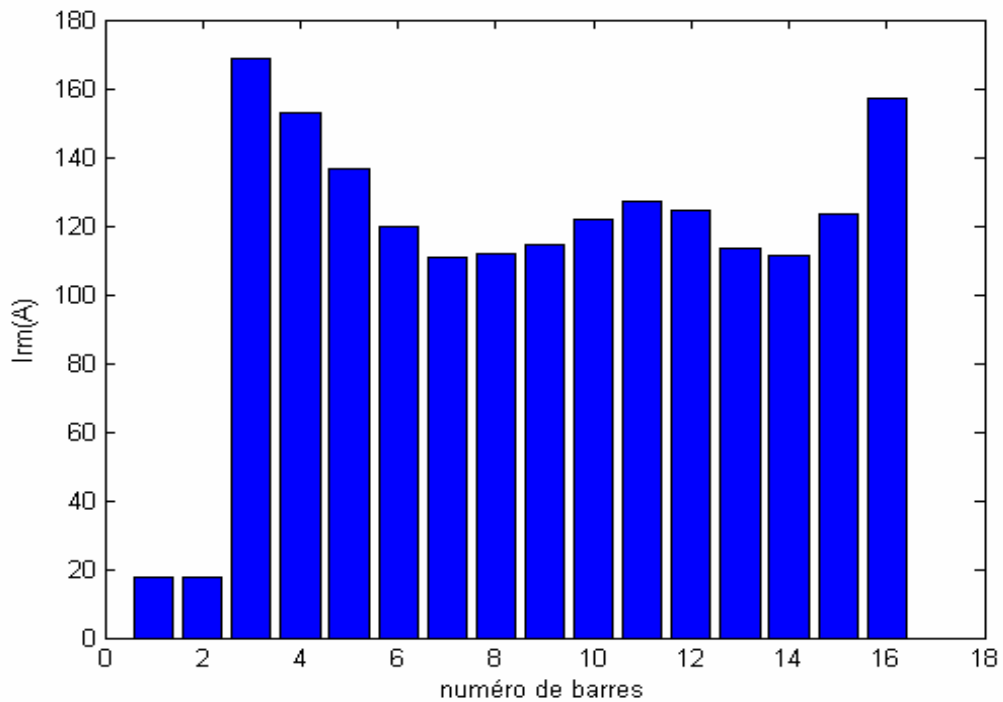
Courant de la barre 8

e : Comparaisons entre les courants des barres 1,2 et 7,8



f: Courants des barres 1 et 2

Agrandissement



g: Courant efficace rototique

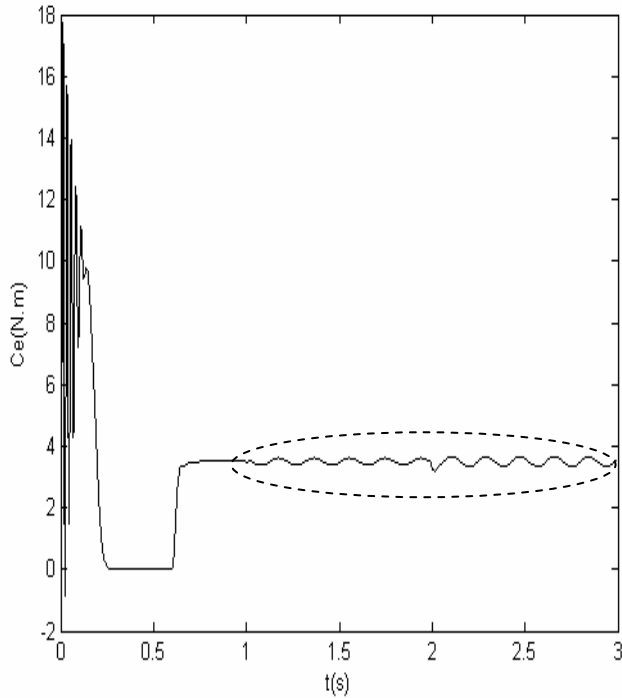
figure III -2 : Simulation avec le modèle global, en charge $C_r=3.5$ N.m avec rupture de deux barres adjacentes (1 et 2), à partir de $t=1s$

► Interprétation des résultats

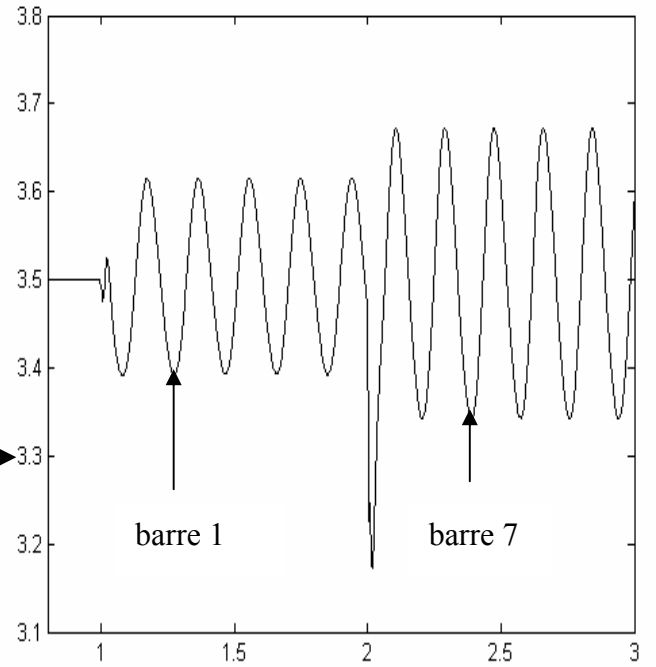
- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (a) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
- La figure (b) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une barre puis de deux barres (1 et 2). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.
- La figure (c) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2. on remarque des oscillations après la rupture de la barre 1 et la rupture de la barre 2, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.
- La figure (d) illustre les courants de toutes les barres rotorique, on peut remarquer que la cassure des barres 1 et 2 affecte sur les ondulations des courants, et la configuration des courants 7 et 8 dans la figure (e) ne change pas par rapport à l'état sain .
- La figure (f) montre les courants des barres cassées on constate que l'amplitude du courant diminue juste après la cassure de la barre.
- Sur la figure (g) on a représenté les valeurs efficaces des courants dans les barres du rotor. On remarque que les barres adjacentes au défaut conduisent plus de courant (environ de 170 A), ce qui entraîne une surchauffe de ces barres et provoque un vieillissement accéléré du moteur.

B) Cassure de deux barres espacées

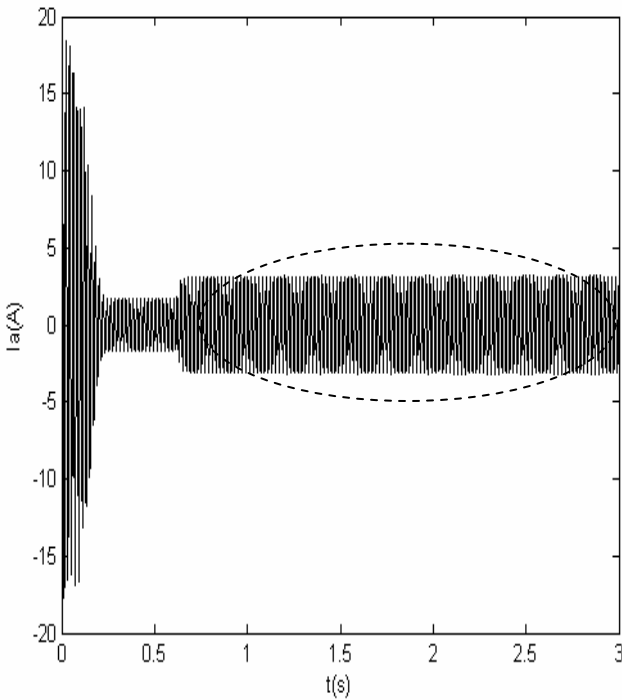
De même manière que la précédente, à partir de $t=1s$ on simule la rupture de la première barre et à l'instant $t=2s$ on simule la rupture de la septième barre.



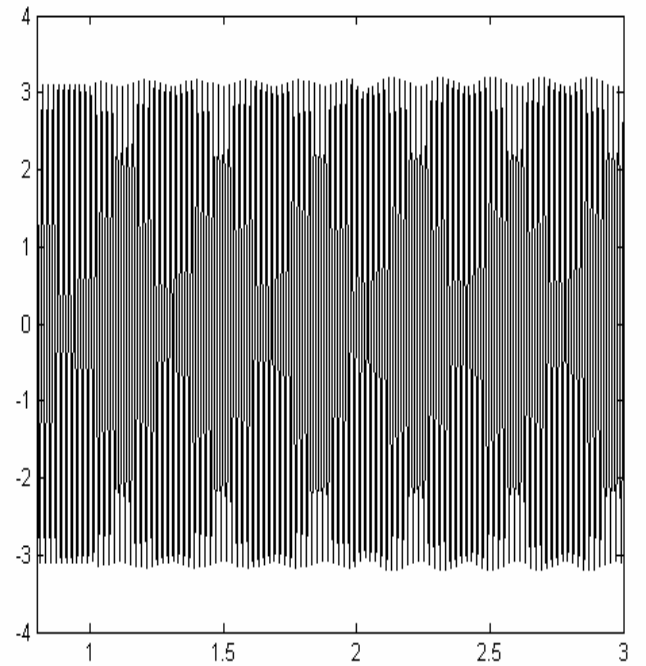
a : Couple électromagnétique



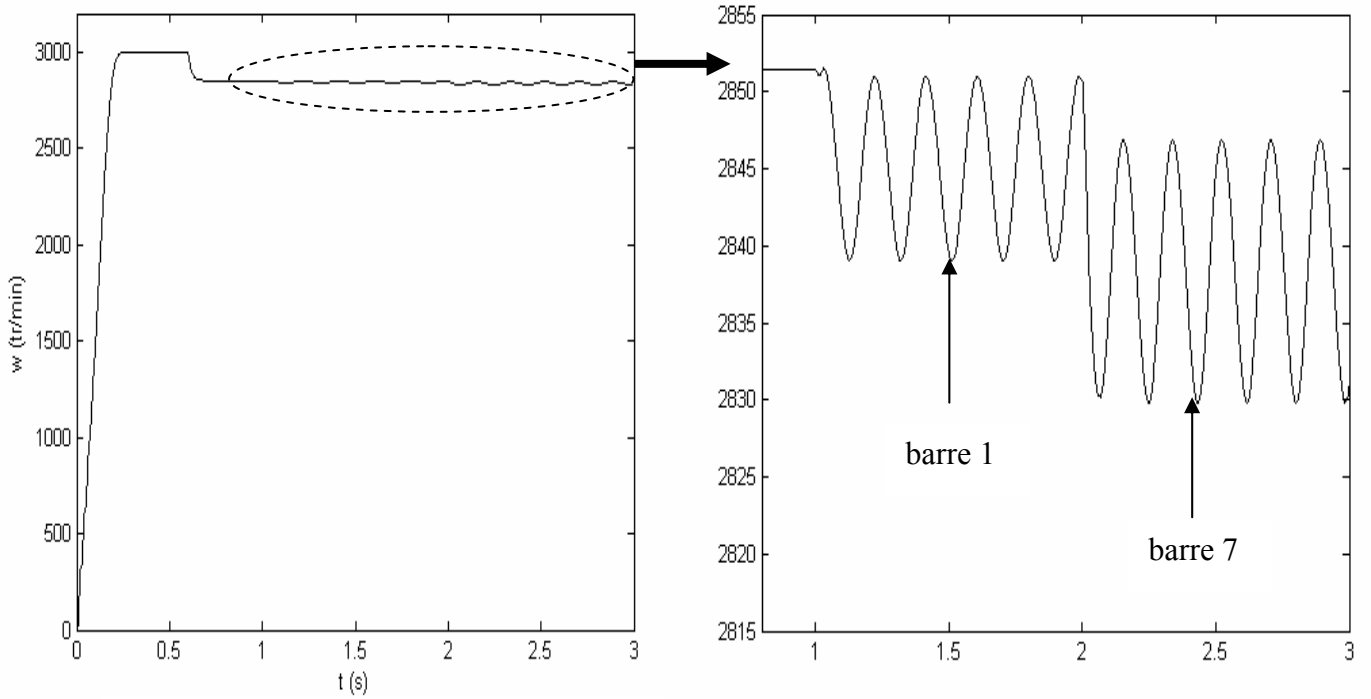
Agrandissement du couple



b : Courant statorique

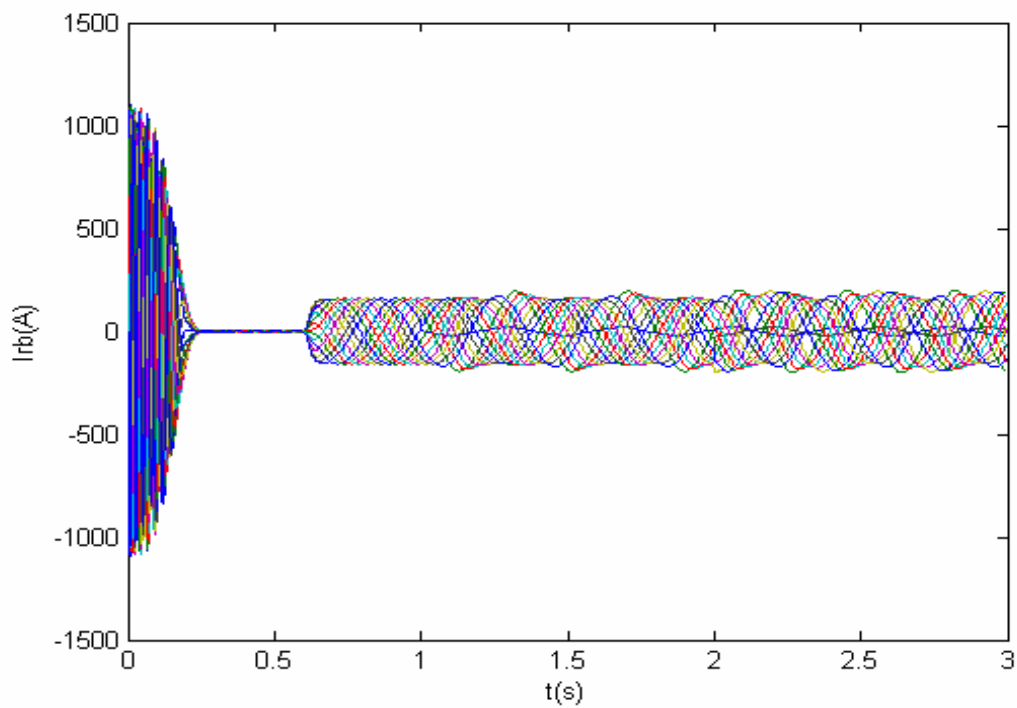


Agrandissement du courant statorique

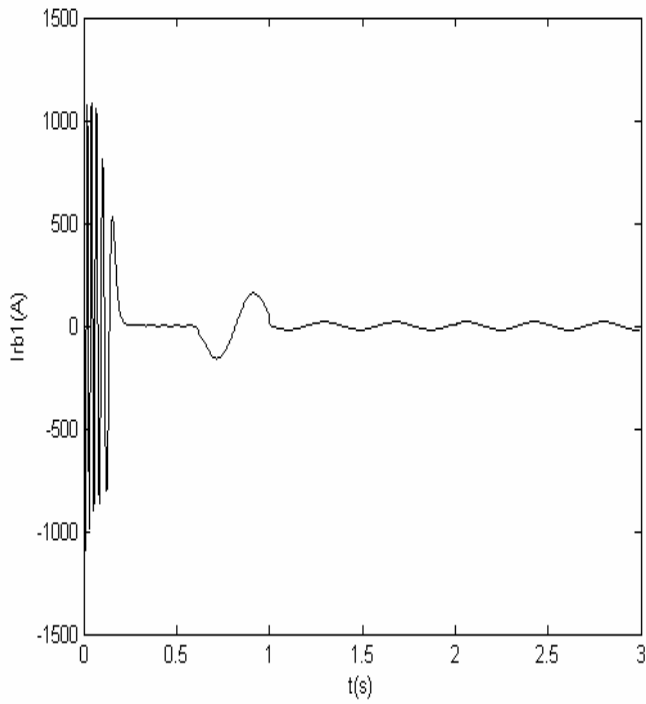


c : Vitesse de rotation

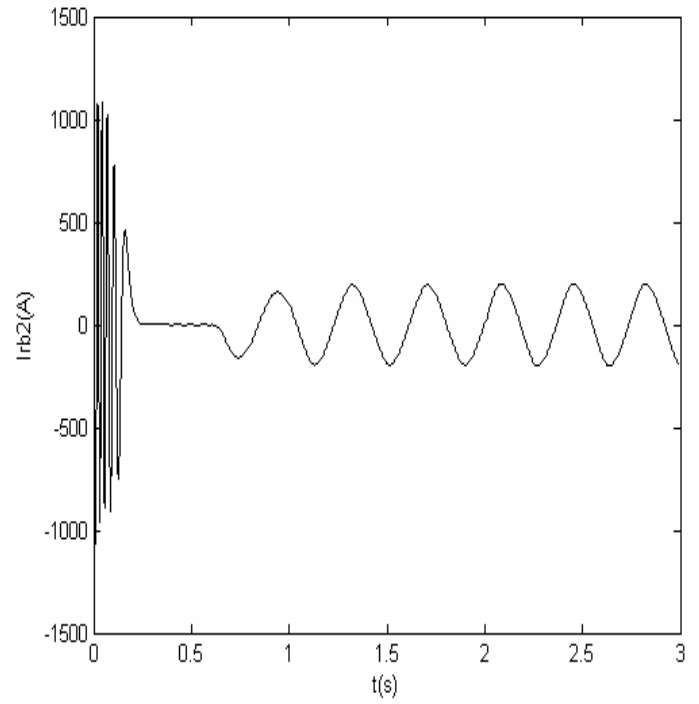
Agrandissement de la vitesse



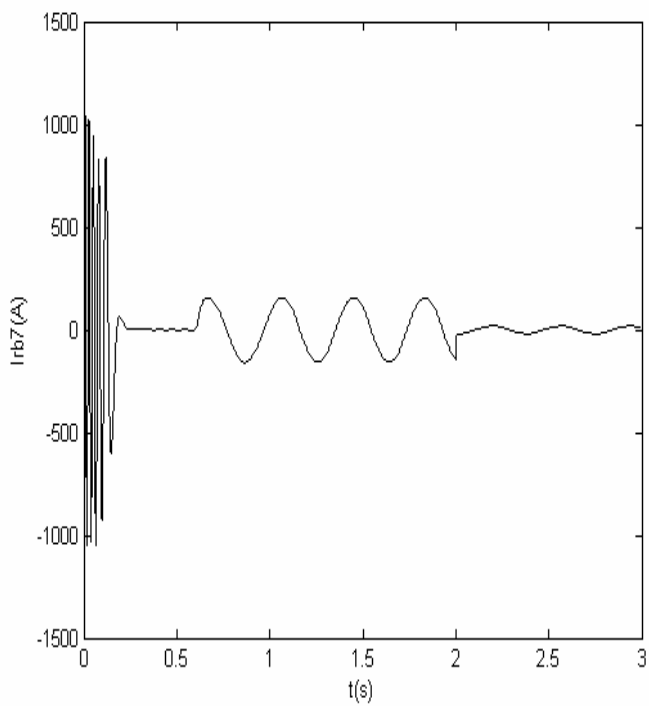
d : Courants des barres rotoriques



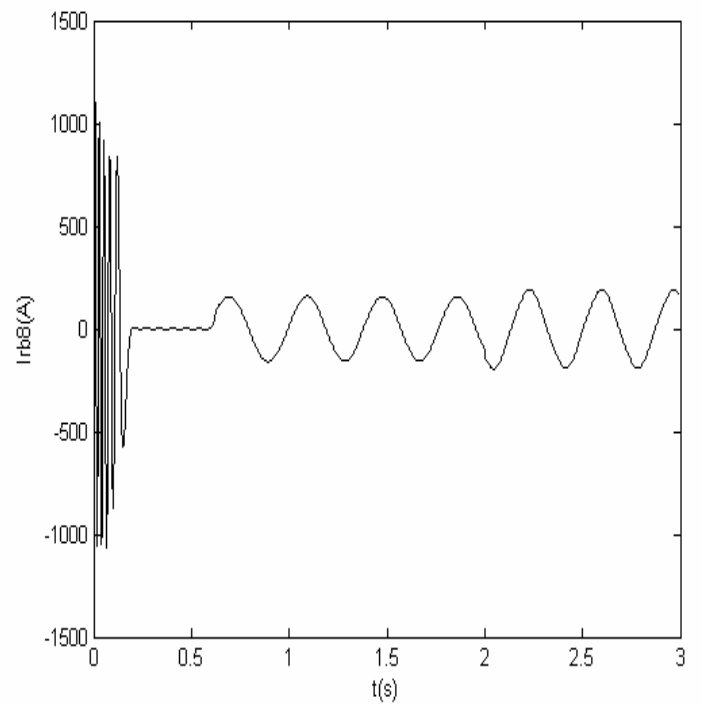
Courant de la barre 1



Courant de la barre 2

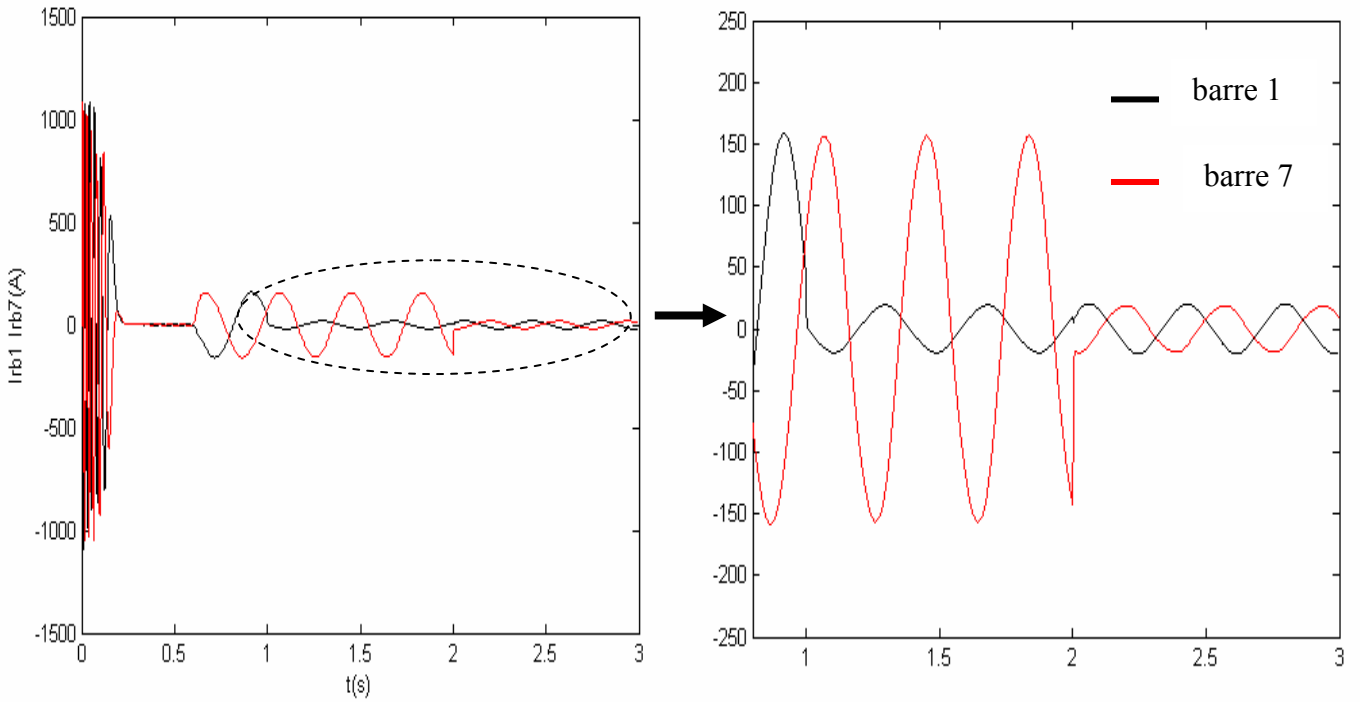


Courant de la barre 7



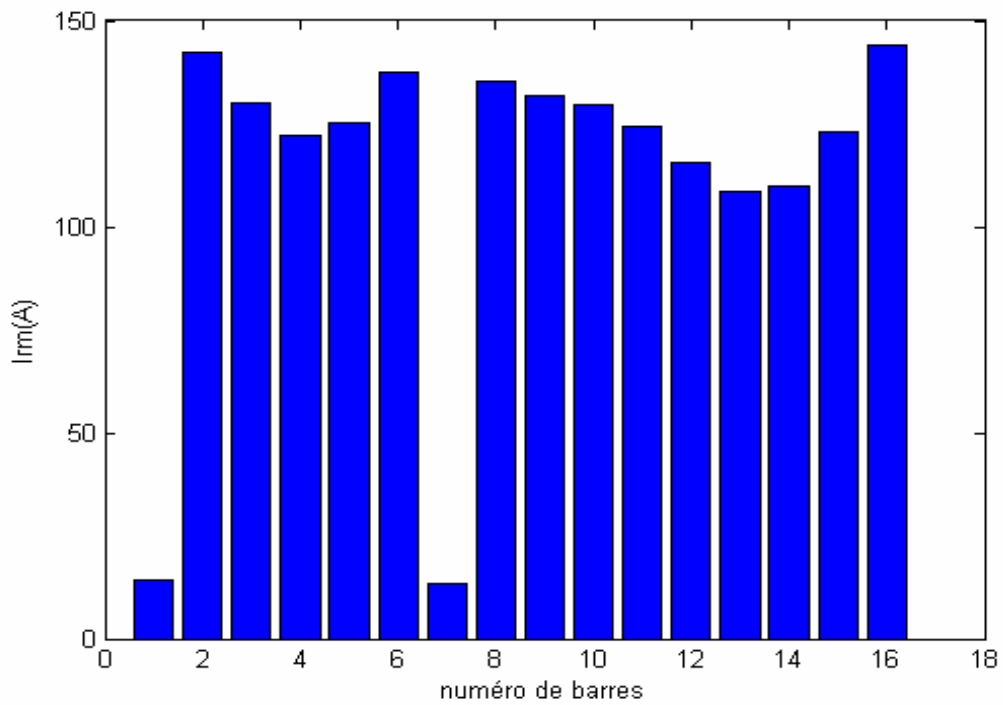
Courant de la barre 8

e : Comparaisons entre les courant des barres 1,2 et 7,8



f : Courants des barres 1 et 7

Agrandissement de courants



g : Courant efficace des barres rotoriques

Figure III – 2 : Simulation avec le modèle global, en charge $Cr=3.5$, avec rupture de deux barres espacés (1 et 7), à partir de $t=1s$

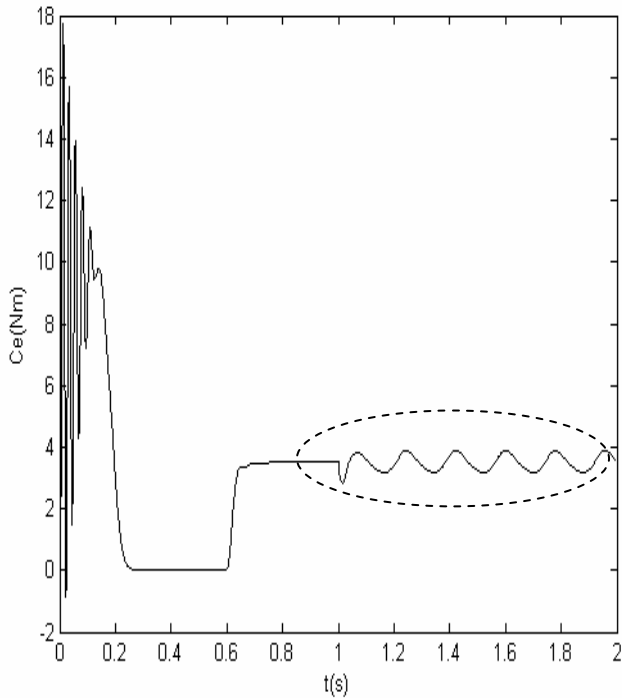
► Interprétation des résultats

D'après la figure(III- 2) on constate que :

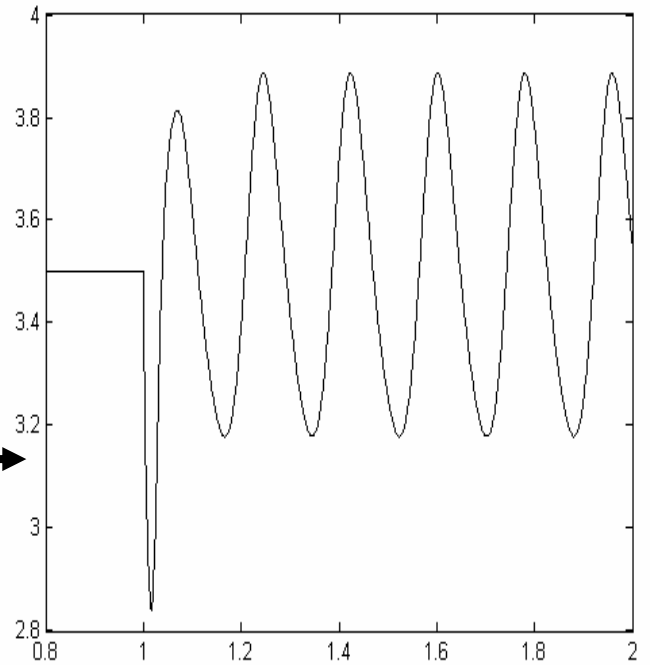
- Des oscillations apparaissent sur le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ainsi que d'une modulation d'amplitude sur la courbe du courant statorique , ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées et leurs position (espacées ou adjacentes), la valeur moyenne de la vitesse est diminué fortement , mais le couple maintient sa valeur moyenne.
- L'amplitude des courants des barres cassées diminues à cause de leurs cassure, on vois bien que la cassure des barres rotorique déséquilibre leurs amplitude des courants.

C) Rupture d'une portion d'anneau

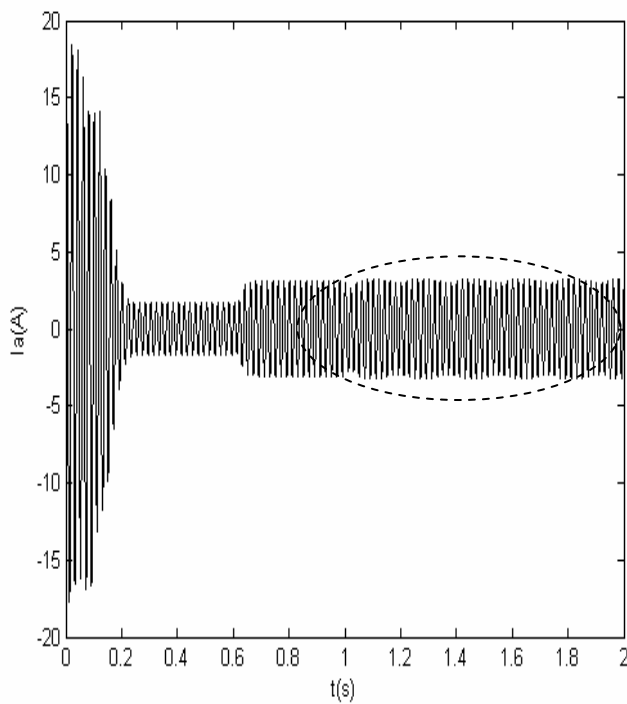
A $t=1s$ on simule la rupture de portion d'anneau



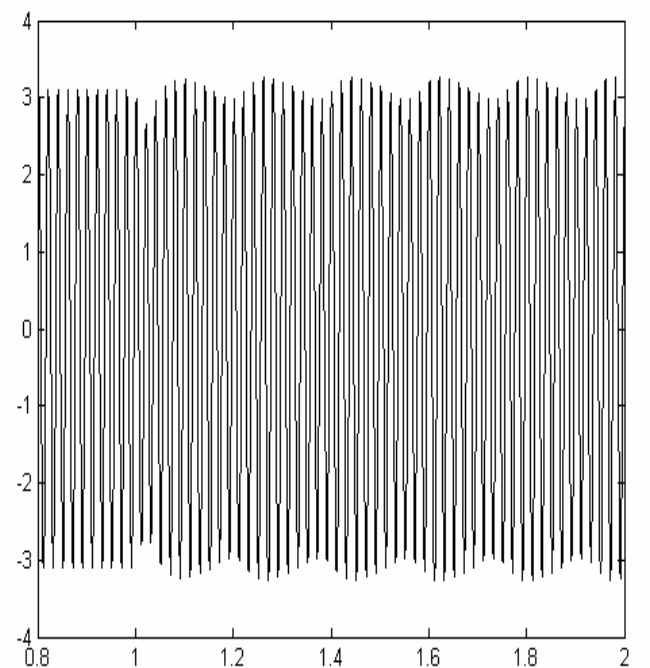
a: Couple électromagnétique



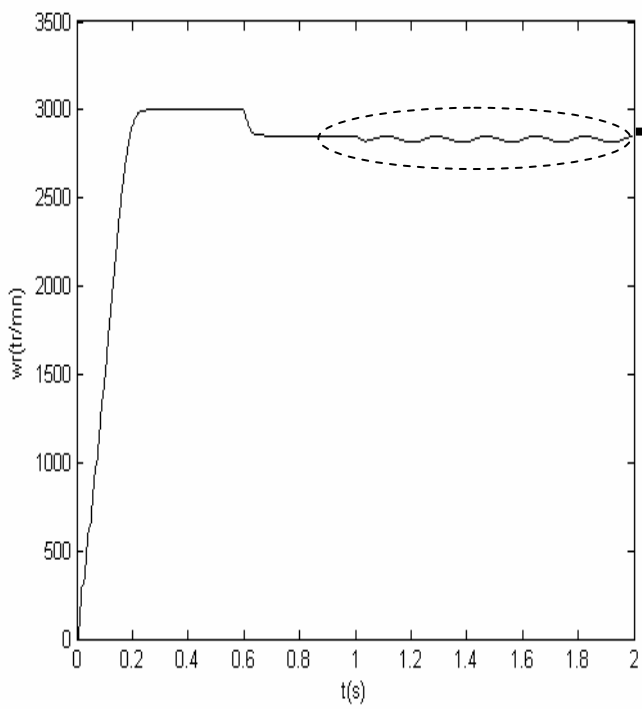
Agrandissement du couple



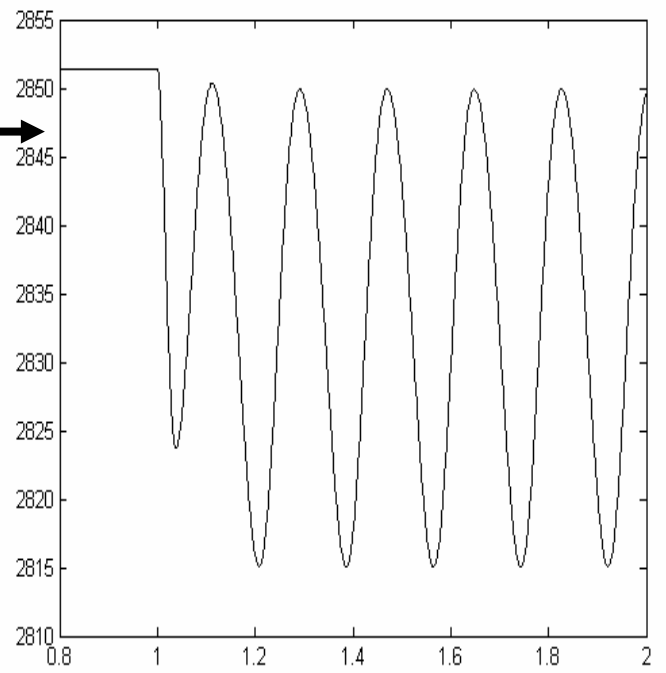
b: Courant statorique



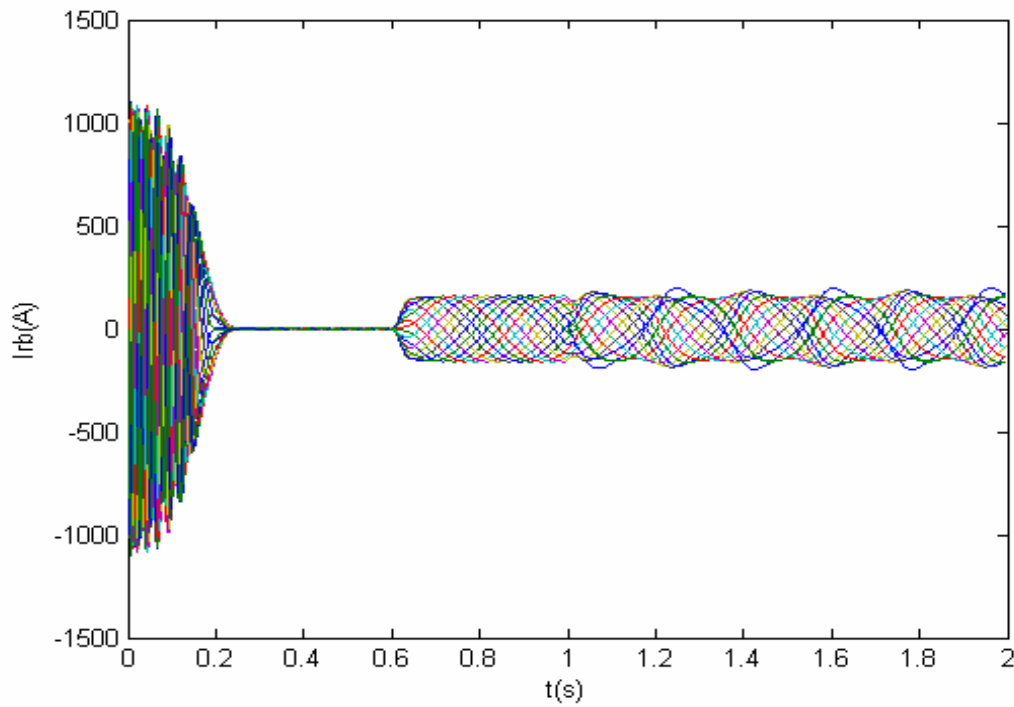
Agrandissement du courant statorique



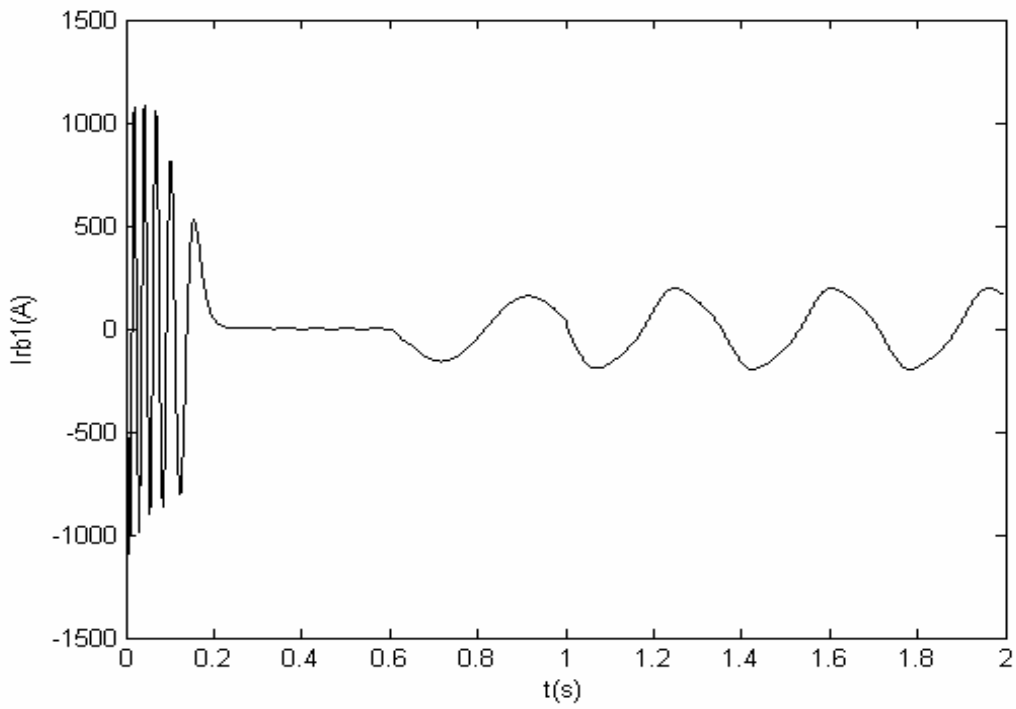
c: Vitesse de rotation



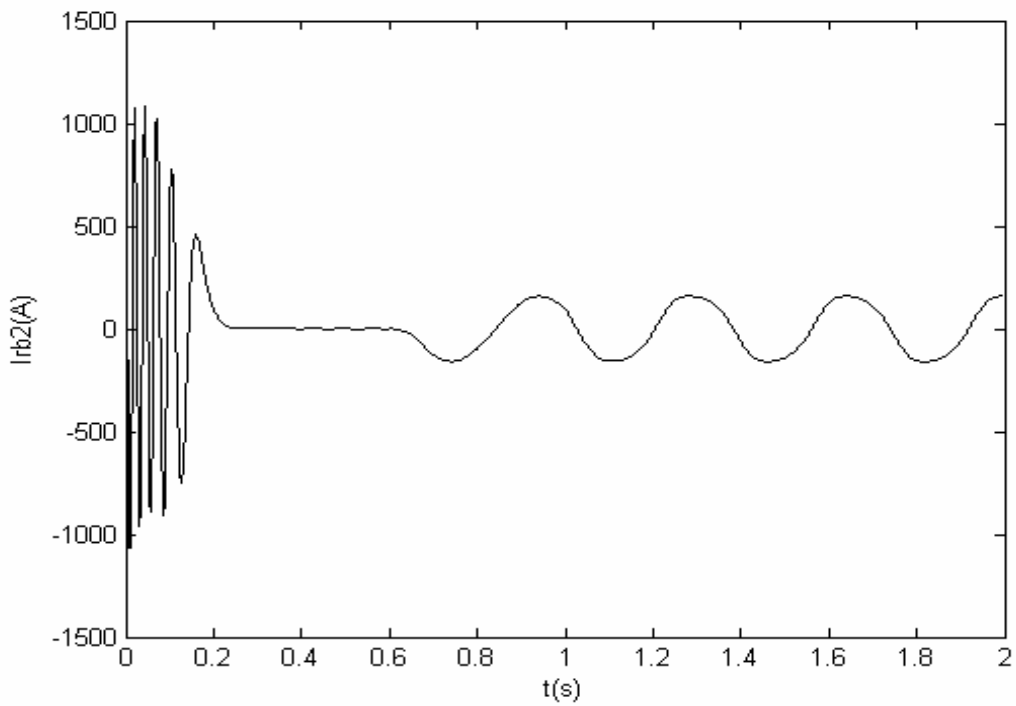
Agrandissement de la vitesse



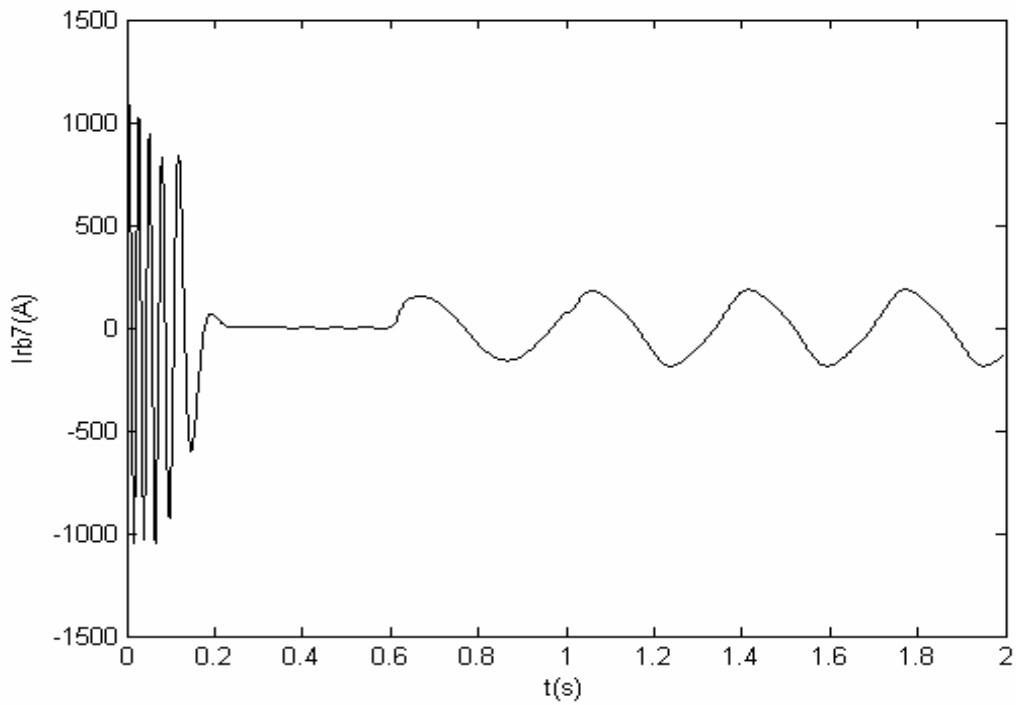
d: Courant des barres rotorique



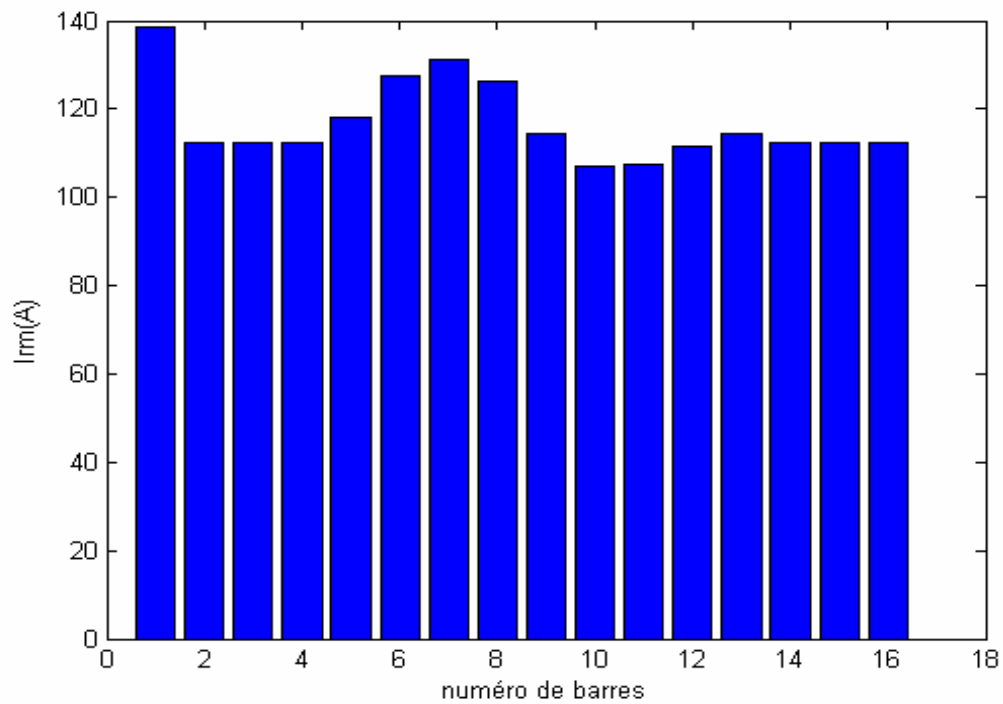
e: Courant de la barre 1



f: Courant de la barre 2



g : Courant de la barre 7



h : Courants efficace des barres rotorique

Figure III –3 : Simulation avec le modèle global, en charge $C_r= 3.5 \text{ N.m}$, avec rupture d’anneau

► Interprétation des résultats

La figure III-3 illustre l'effet de la cassure de portion d'anneau sur les performances de la machine.

- des oscillations apparaissent sur le couple et la vitesse de rotation et nous remarquons que leur comportement est globalement analogue à celui qui apparaît dans les cas de la cassure de barre.
- On remarque sur la figure (b) qui représente le courant d'une phase statorique pour la rupture d'une portion d'anneau, la modulation d'amplitude qui s'accroît selon la position de portion.
- La rupture de la portion influe sur les courants efficaces des barres du rotor c'est à dire provoque un déséquilibre, on remarque que le courant dans la barre 1 atteint une valeur importante (environ de 140 A) ce qui traduit par des pertes Joule plus importantes.

III-3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pendant les différentes conditions de fonctionnement (en charge, variations de rupture de barres et portion d'anneau). la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique, on peut constater que ces oscillations sont proportionnelle avec le nombre de barres cassées. on vois bien que l'amplitude du couple, la vitesse de rotation et le courant statorique dans le cas de cassure de deux barres adjacentes est plus grande par rapport à deux barres espacées. on remarque aussi que le temps du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barre.

On mesure toutes les difficultés à exploiter directement les résultats pour détecter un défaut, et tout particulièrement quand il s'agit de la première barre cassée, seules méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux, issus de la machine, offrent une porte de sortie pour le diagnostic de ce type de défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Analyse spectrale

IV-1 techniques d'analyses des défauts.....	47
IV-2 analyse spectrale.....	47
2-1 méthodes non-paramétriques.....	47
2-2 méthodes paramétriques.....	48
IV-3 analyse cepstrale.....	48
IV-4 Méthodes de détections de fréquence connues.....	48
IV-5 Méthodes temps- fréquence et temps –échelle.....	48
IV-6 Application de l'analyse spectrale.....	49
IV-7 Interprétations.....	57
IV-8 Conclusion.....	59

IV.1 Techniques d'analyses des défauts

Pour effectuer le diagnostic dans une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de paramètres, tel que la température, le bruit, les vibrations...

En s'appuyant sur leur expérience, ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

L'analyse spectrale du signal, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent [BEL 05] [ABE 02]

Toutes les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans quatre groupes différents : l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale, l'analyse temporelle, l'analyse temps -fréquence ou temps- échelle. Dans ce qui suit, on présente quelques méthodes qui sont utilisées dans le diagnostic des ruptures de barres.

IV-2 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence[DED 04].

Pour obtenir le spectre en fréquence, il existe plusieurs méthodes. On distingue principalement deux approches :

- les méthodes non –paramétriques,
- les méthodes paramétriques.

IV-2-1 Méthodes non- paramétriques

Pour ces méthodes, on trouve tous les estimateurs à base d'analyse de Fourier.

Les spectres basés sur l'utilisation de la transformation de Fourier sont obtenus :

- soit par le calcul direct sur des segments d'échantillons temporels, puis au moyen de la transformée de Fourier, des segments pondérés par une fenêtre d'apodisation
- soit par le calcul du spectre sur la fonction d'auto corrélation [BEL 05] [ABE 02].

IV-2-2 Méthodes paramétriques

Les méthodes d'analyse fréquentielles paramétriques sont basées sur la détermination d'un modèle représentant le signal à analyser et pour lequel les paramètres sont utilisés pour estimer le spectre de puissance. L'estimation du spectre nécessite trois étapes. La première consiste à sélectionner un type de modèle. Ensuite, on estime les paramètres du modèle retenu en utilisant les échantillons du signal. La dernière étape enfin, concerne l'estimation spectrale à partir des paramètres du modèle estimé [BEL 05]

IV-3 Analyse cepstrale

Cette méthode est utilisée en analyse vibratoire et dans le cas du diagnostic de réducteurs. Il a été prouvé qu'en calculant le cepstre, on identifie clairement la présence des raies.

IV-4 Méthodes de détections de fréquence connues

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

IV-5 Méthodes temps- fréquence et temps –échelle

► Temps - fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires [BEL 05]. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle, il faut réaliser une analyse spectrale évolutive, d'où les méthodes temps fréquence. Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner –Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée [BOU 01].

Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettent de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps. Le temps de calcul d'une représentation temps- fréquence peut être prohibitif. De plus l'interprétation d'une image est souvent difficile [DED 04].

► Temps- échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrés dans un signal. La transformation en ondelette a été formalisée par Grossman et Morle.

IV-6 Application de l'analyse spectrale

Il existe de nombreux types de fenêtres qui privilégient des aspects particuliers par rapport aux autres. Il convient donc de choisir la fenêtre adéquate pour le signal en fonction du problème particulier que l'on doit résoudre.

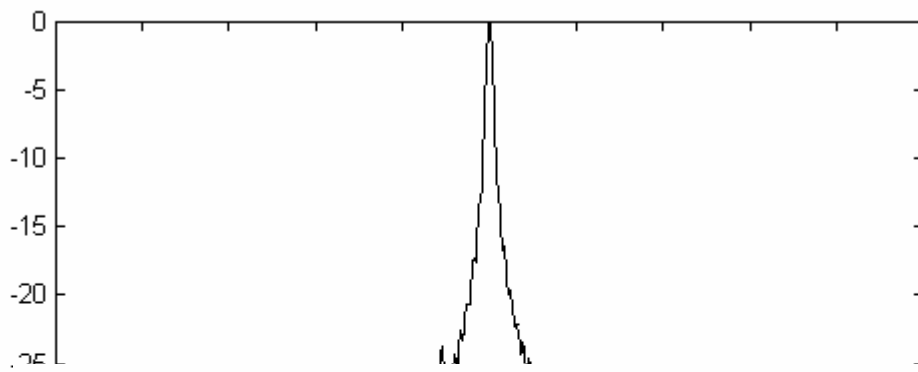
Cette caractéristique porte essentiellement sur trois points :

- la largeur et la hauteur du lobe principal,
- la hauteur du premier lobe secondaire,
- l'atténuation des lobes secondaires,

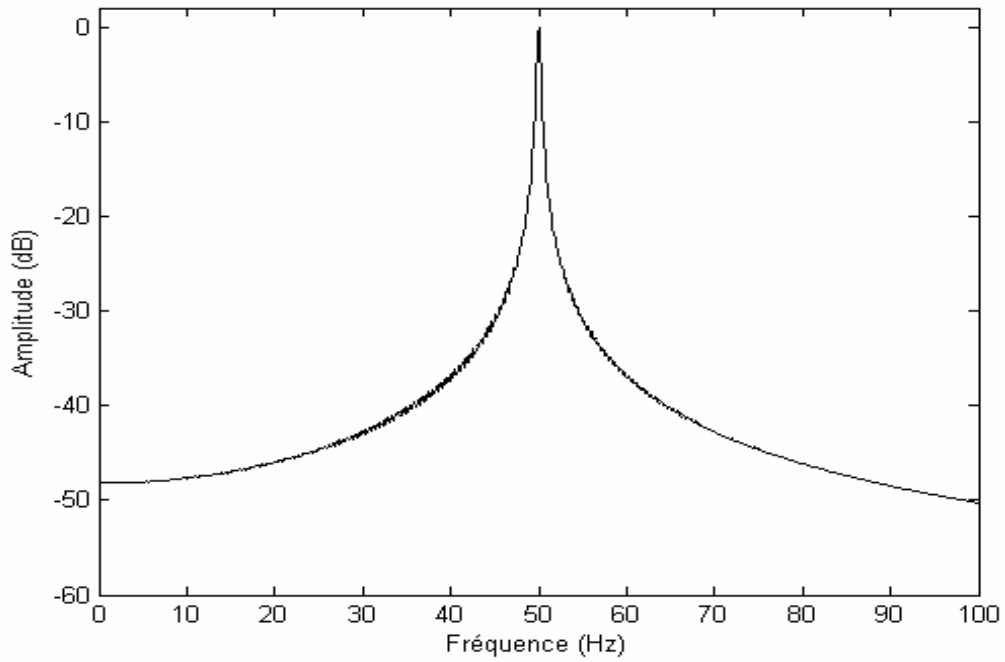
On utilise la fenêtre de hanning.

IV-7 Résultat de simulation d'analyse spectrale

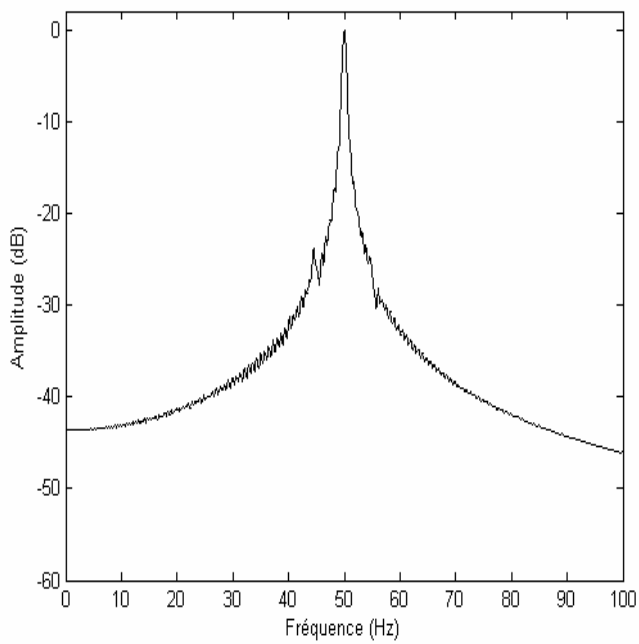
Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique, du couple et de la vitesse en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT). Nous montrerons comment cette méthode permet de déterminer le contenu fréquentiel du courant statorique, du couple et de la vitesse de rotation, et donc de retrouver les raies associées aux défauts de barres ou d'anneaux. Nous montrerons aussi, l'influence de barres adjacentes (1 et 2) et espacées (1 et 7).



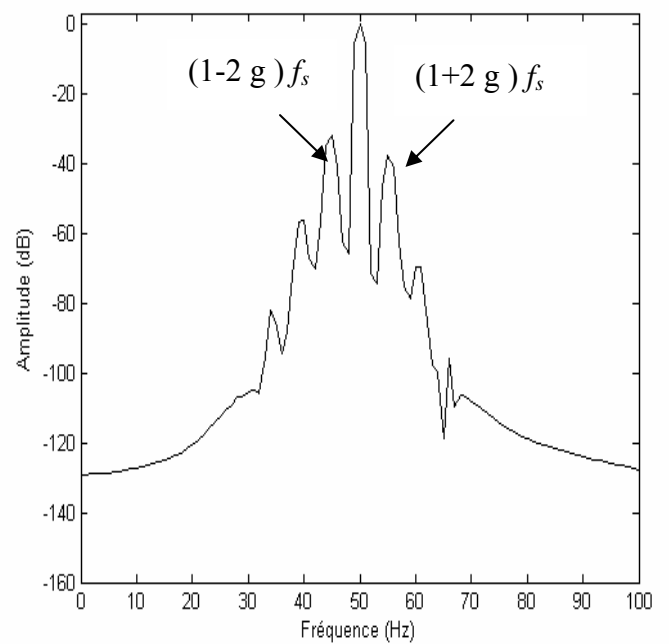
rique par FFT en



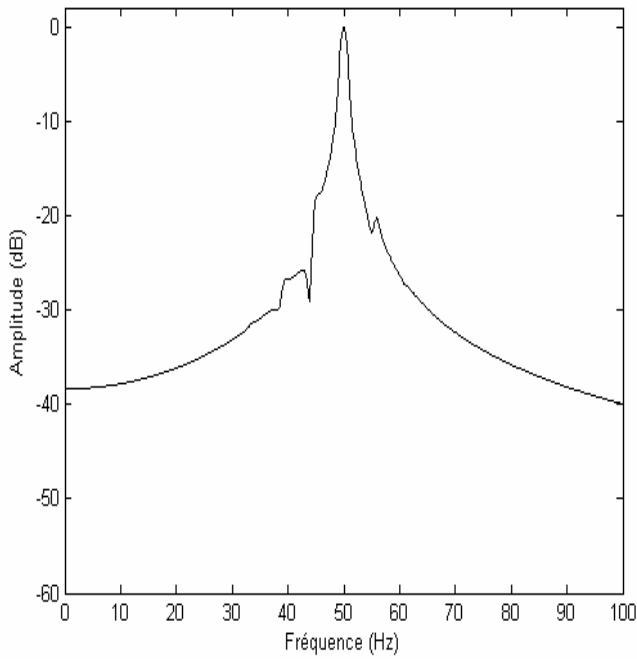
a : état sain



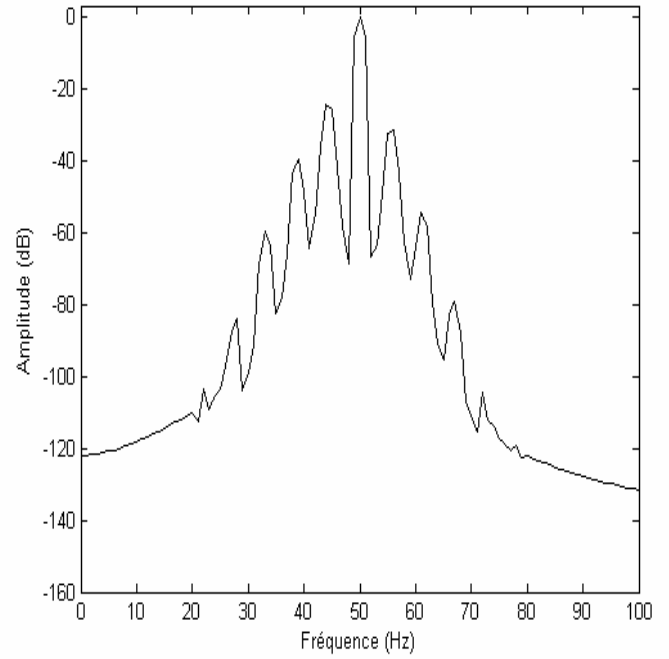
b : rupture de barre 1 « $R = 11 \times R_b$ »



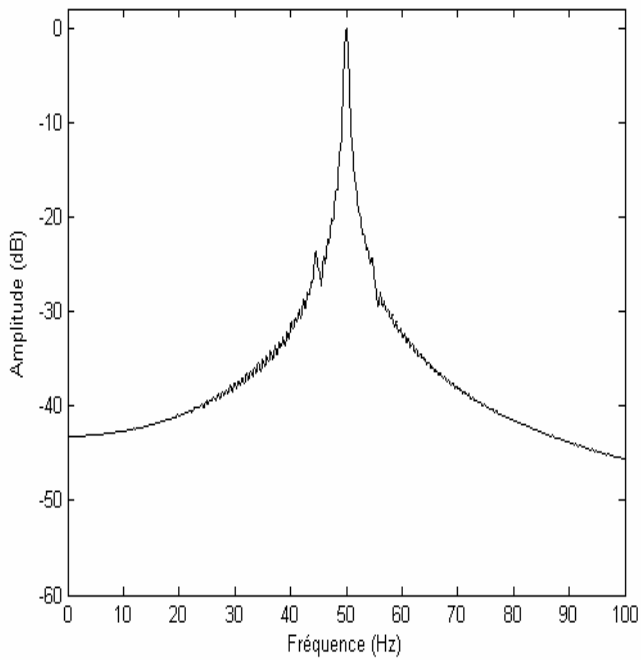
c : rupture de barre 1 « $R = 30 \times R_b$ »



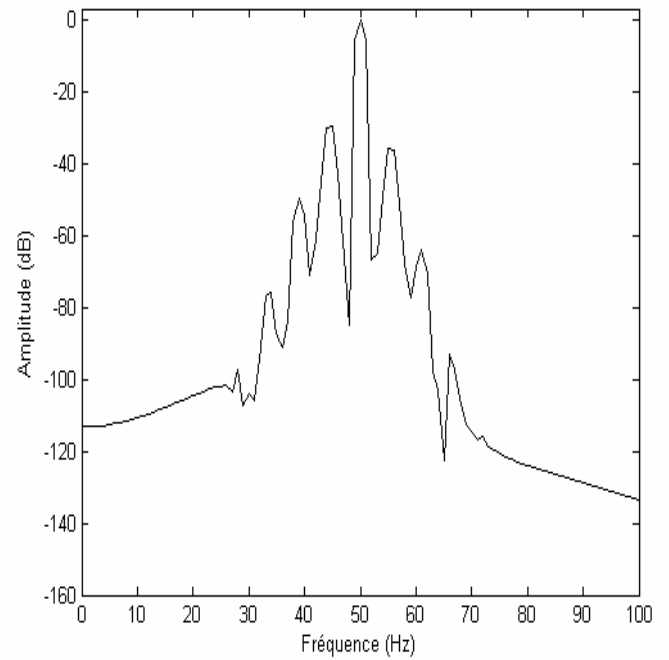
d : ruptures des barres 1 et 2 « $R=11 \times R_b$ »



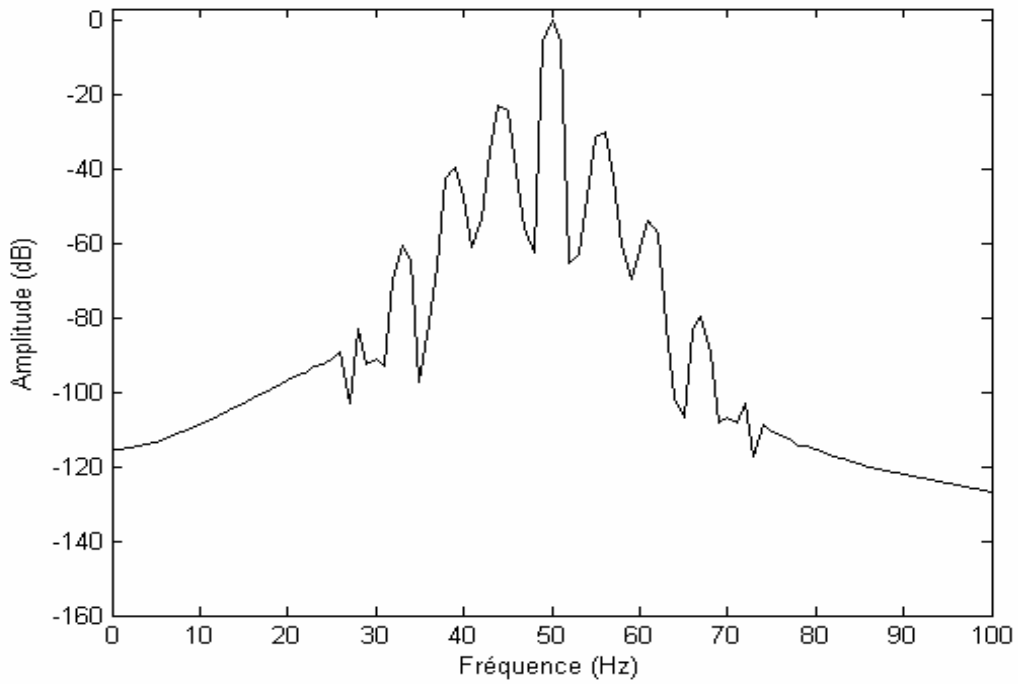
e : ruptures des barres 1 et 2 « $R=30 \times R_b$ »



f : ruptures des barres 1 et 7 « $R=11 \times R_b$ »



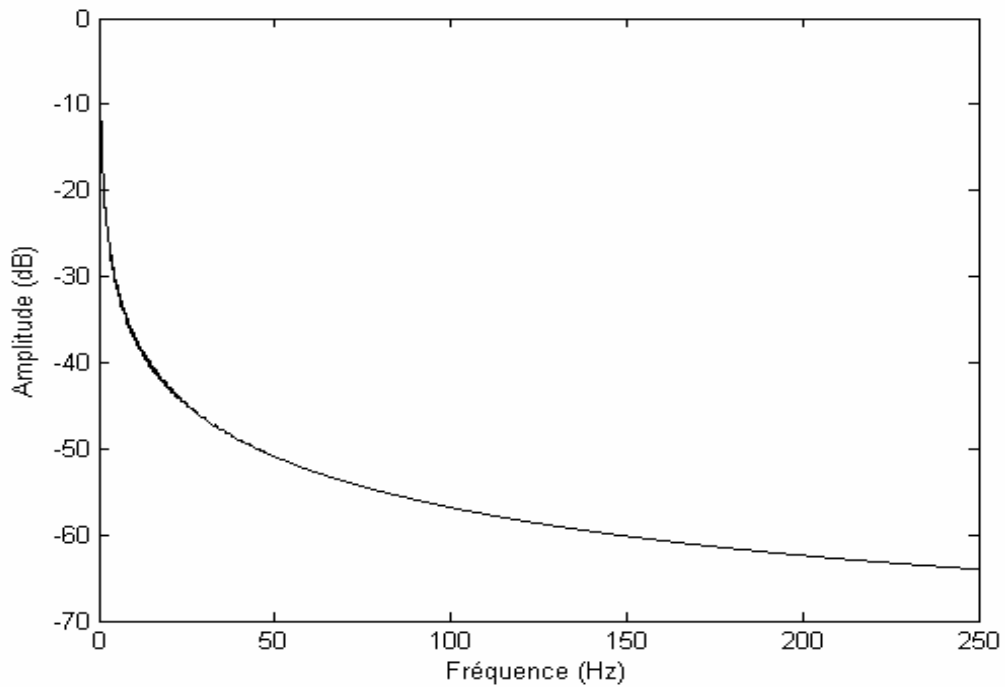
g : ruptures des barres 1 et 7 « $R=30 \times R_b$ »



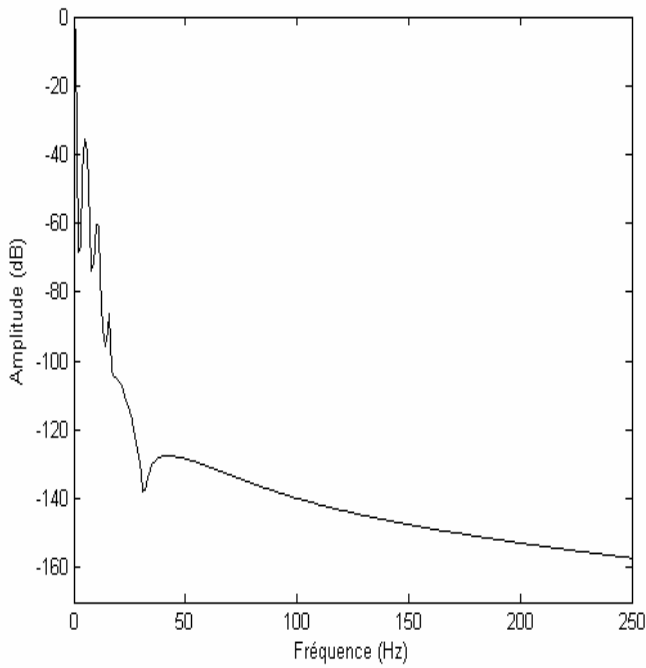
h : rupture de portion d’anneau

Figure IV–1: Spectre du courant statorique en charge ($C_r = 3.5 \text{ N.m}$) avec variation de la résistance

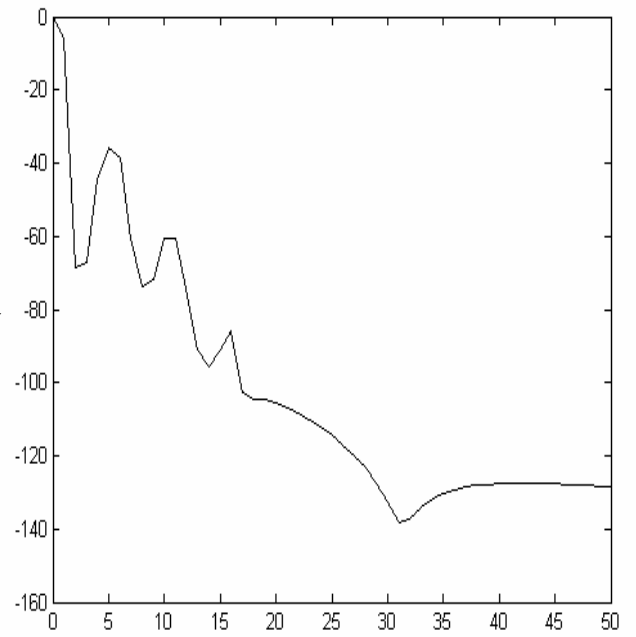
► **Le couple électromagnétique :** dans ce cas en va utiliser la fenêtre de hanning pour détecter le défaut rotorique sur le couple électromagnétique dans les différentes cas.



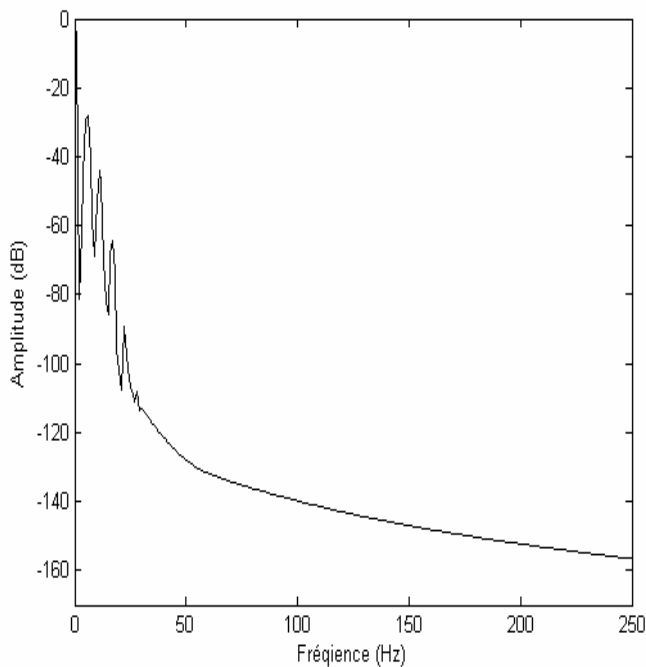
a : état sain



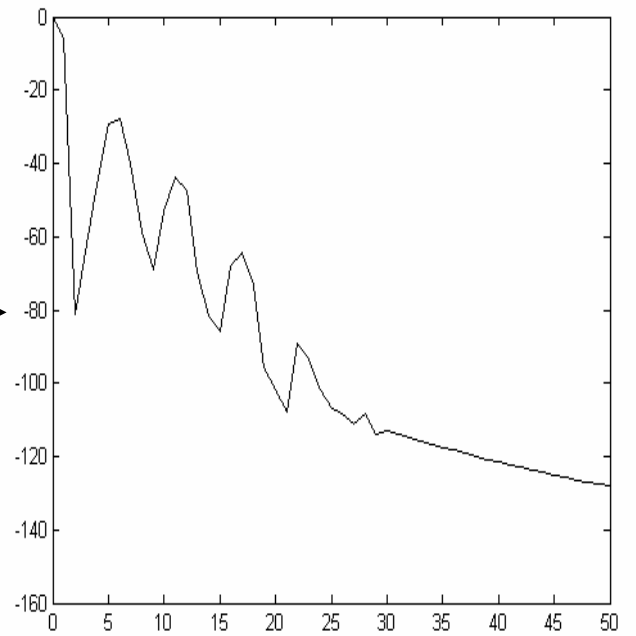
b : rupture de barre 1 « $R=30 \times R_b$ »



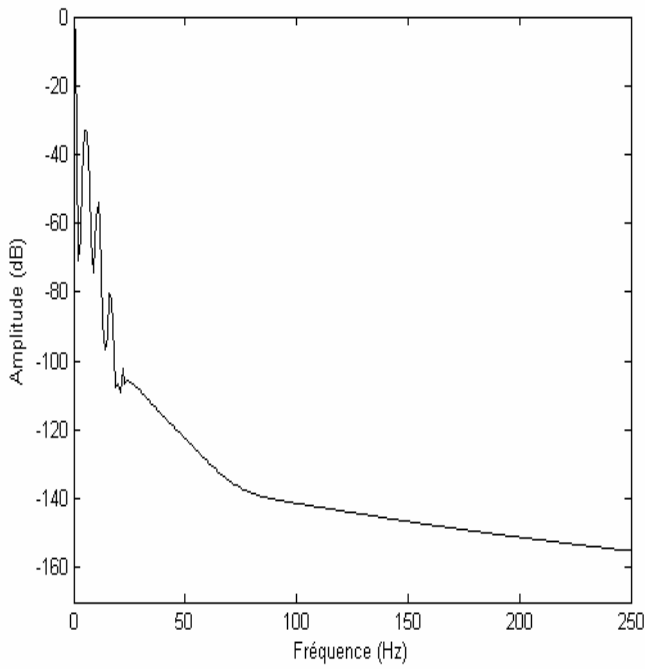
Agrandissement



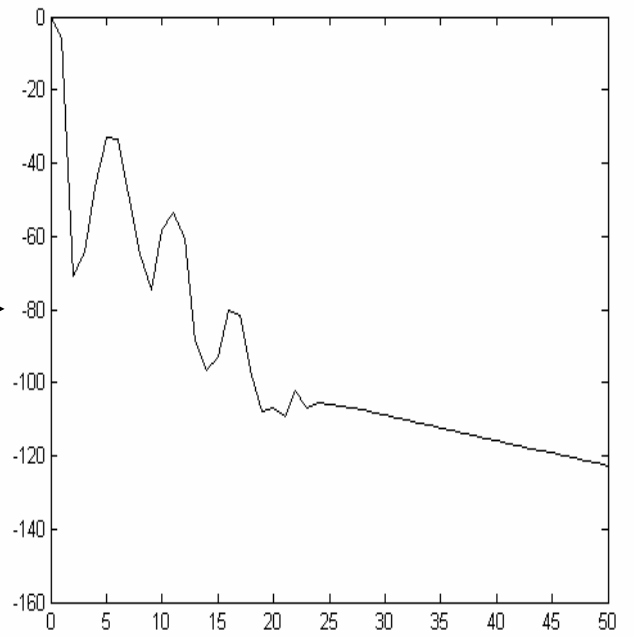
c : ruptures des barres 1 et 2 « $R=30 \times R_b$ »



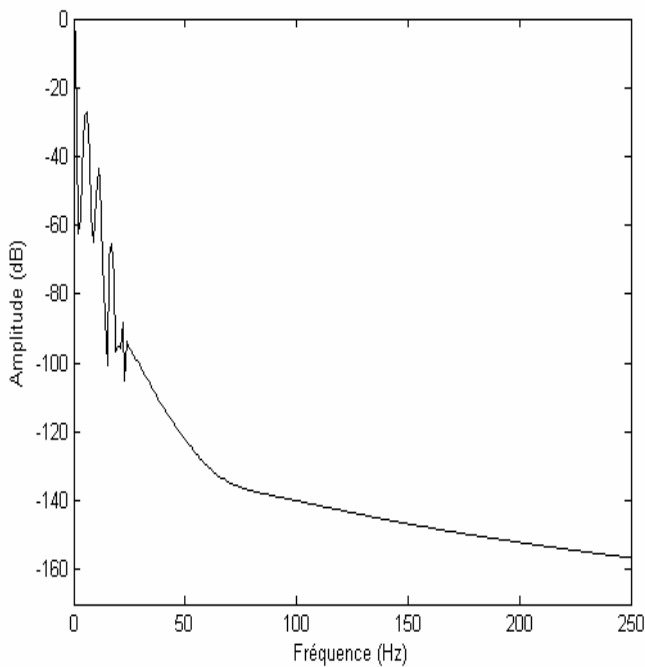
Agrandissement



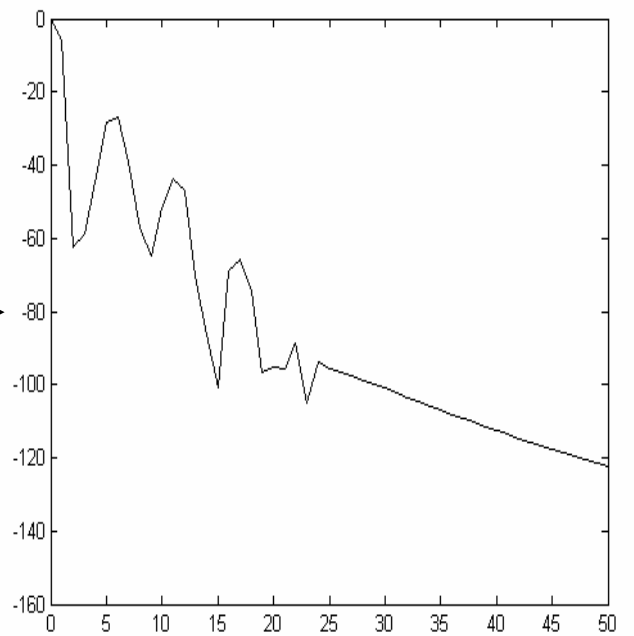
d : ruptures des barres 1et 7 « $R=30 \times R_b$ »



Agrandissement



e : rupture de portion d'anneau

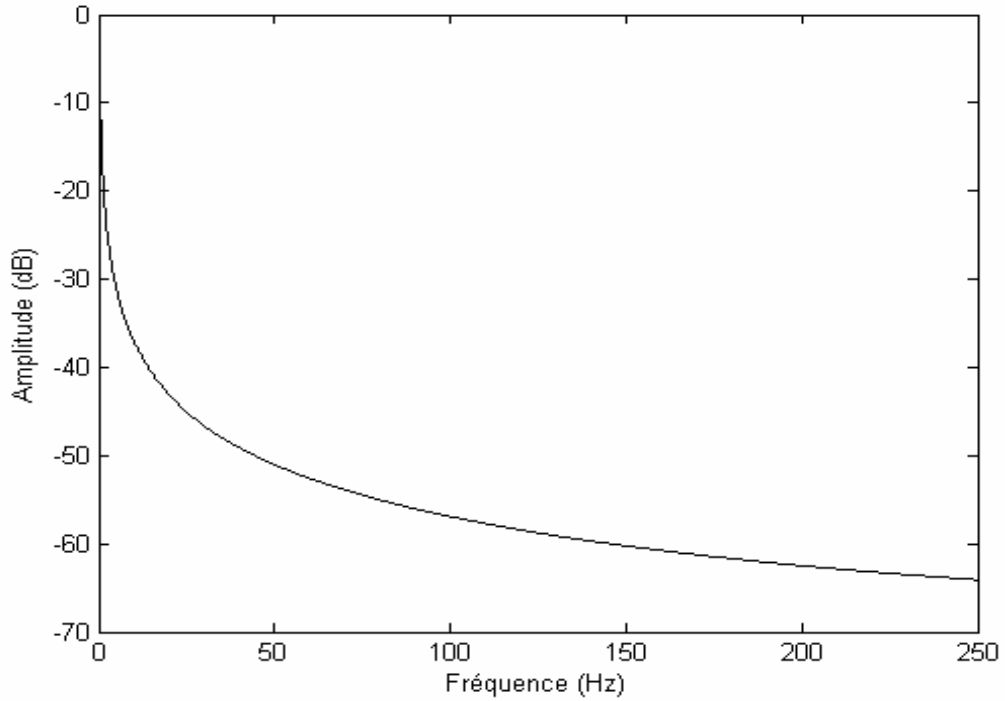


Agrandissement

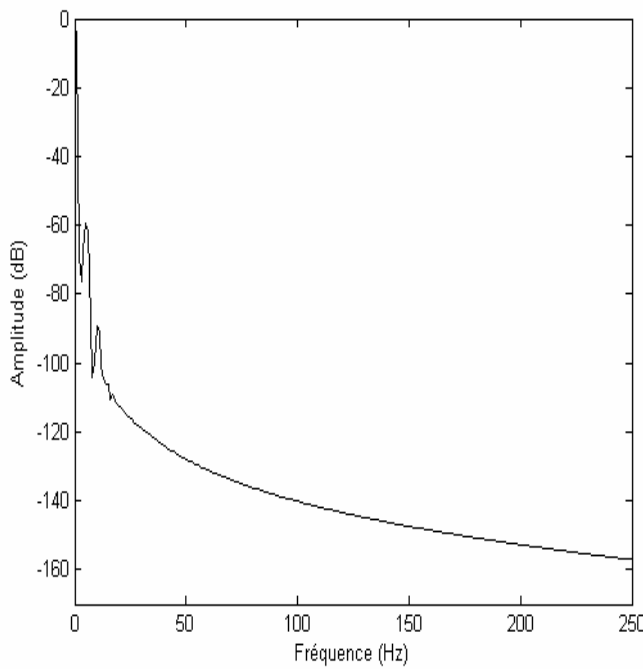
Figure IV-2 Spectre du couple électromagnétique avec $Cr = 3.5 \text{ N.m}$

► La vitesse de rotation

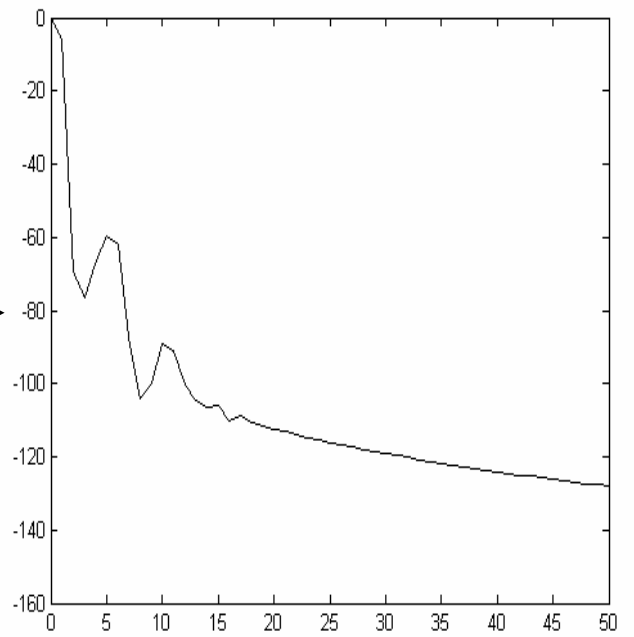
En va aussi simuler les résultats de l'analyse spectrale de la vitesse par FFT en régime permanent en charge.



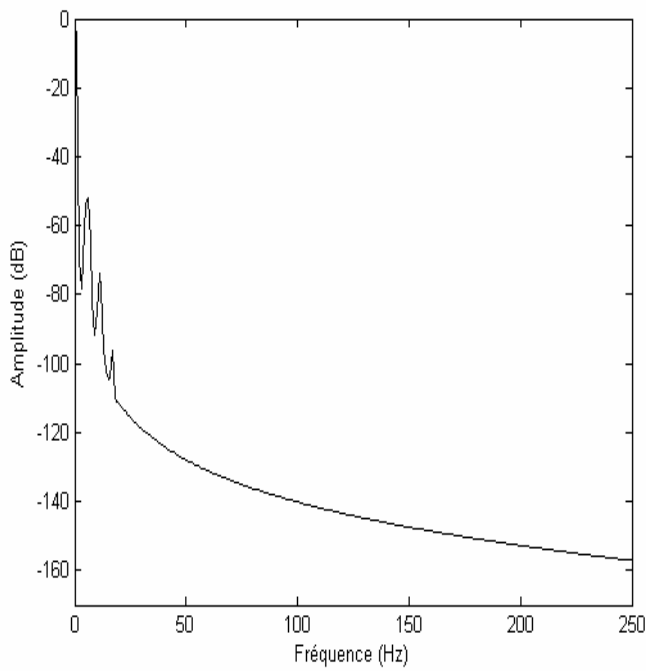
a : état sain



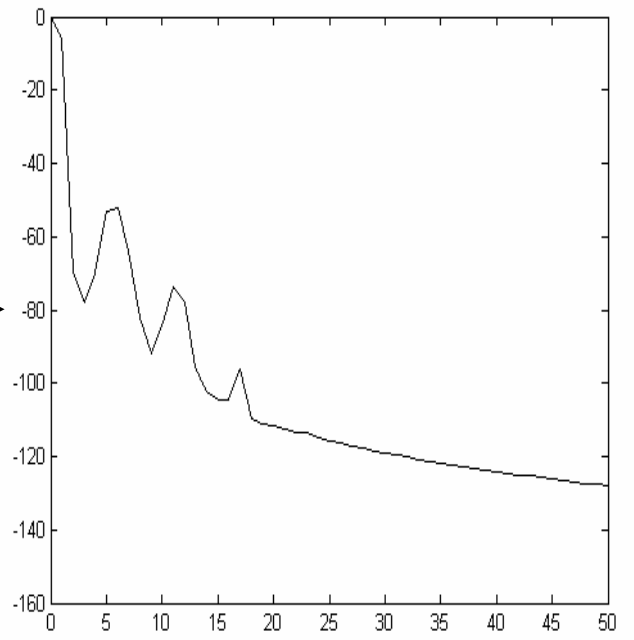
b : rupture de barre 1 « $R=30 \times R_b$ »



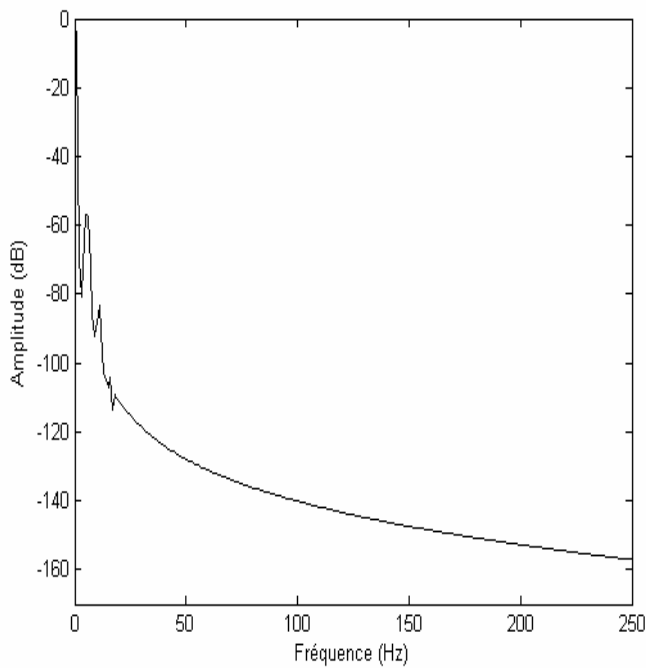
Agrandissement



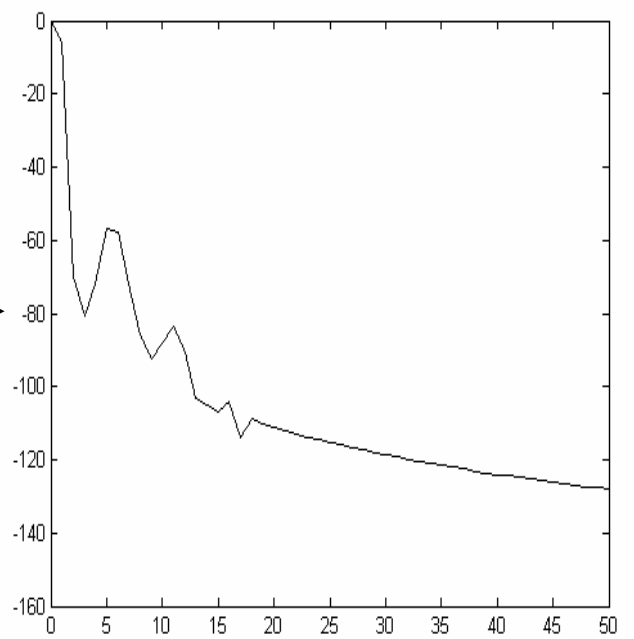
c : ruptures des barres 1 et 2 « $R=30 \times R_b$ »



Agrandissement



d : ruptures des barres 1 et 7 « $R=30 \times R_b$ »



Agrandissement

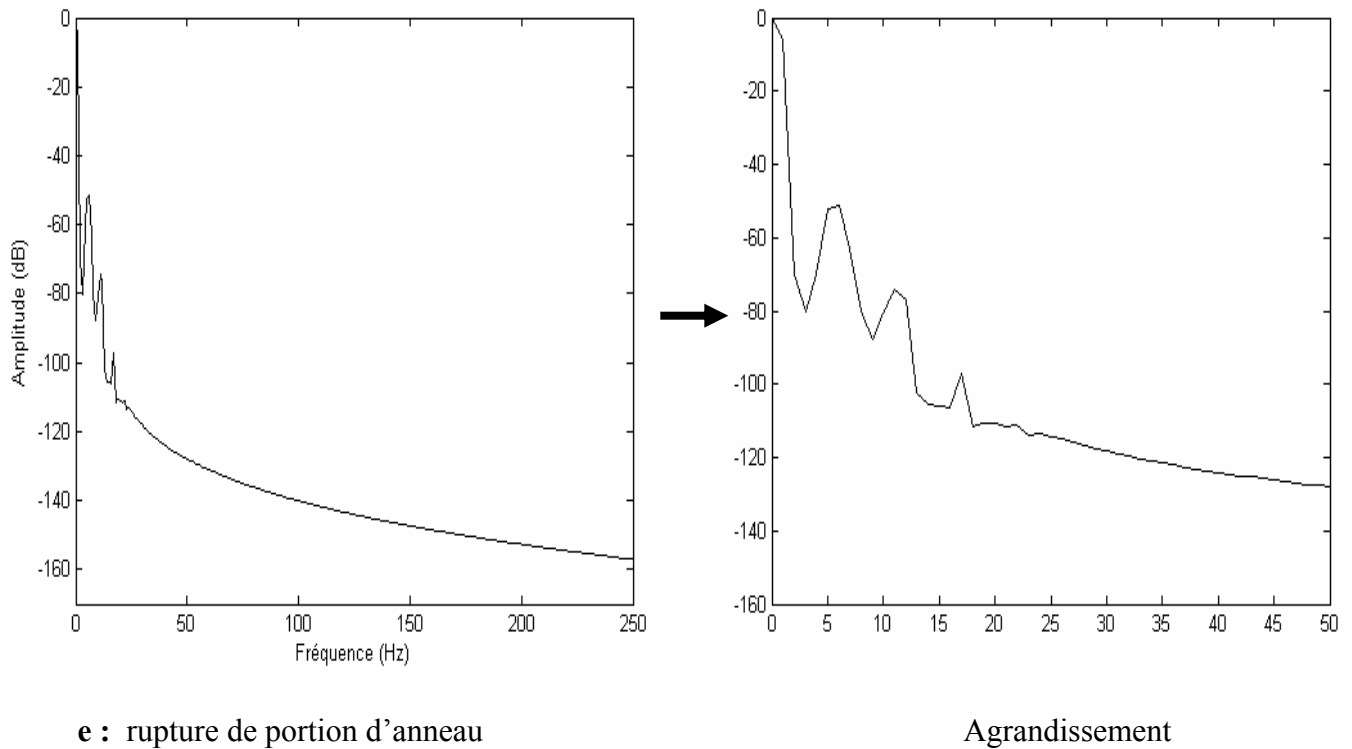


Figure IV-3 spectre de la vitesse, machine en charge ($C_r=3.5N.m$)

IV-7-4 Interprétations

◆ La figure IV-1 , représente le spectre du courant statorique en charge pour plusieurs cas :

- la figure (a), représente le courant statorique à l'état sain. C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale. Il est important de noter qu'en réalité, il y a toujours un certain degré d'asymétrie naturelle (de construction) dans le rotor, ce qui engendre l'apparition des raies, mais avec des amplitudes faibles .
- Dans les autres schémas on remarque que l'influence de la résistance ($30 \times R$) est le majeur par rapport a la résistance ($11 \times R$).
- Lorsque une barre est rompue (figure (c)), on remarque l'apparition des raies latérales aux fréquences [34, 39, 45 et 55, 60][Hz] et avec amplitudes [-82, -57, -33 et -37, -70][dB]
- Lorsque une deuxième barre adjacente est rompue (figure (e)), on observe une augmentation de 9 dB sur la raie $(1-2 g) f_s$ et une augmentation de 6 dB sur la raie $(1+2 g) f_s$. On remarque aussi, l'apparition des raies aux fréquences [27 Hz et 67 Hz] qui correspondent à $(1 \pm 4 g) f_s$, mais avec des amplitudes faibles [-85 dB et -80 dB].

- Dans le cas où de deux barres espacées est rompue (figure (g)), on remarque une augmentation d'amplitude sur les raies [-75 , -50 , -30 et -35 , -65][dB] .

- Lorsque une portion d'anneau est rompue (figure (h)), on remarque une augmentation d'amplitude sur les raies [-61, -41, -23 et -30, -54]. On remarque aussi, que cette augmentation est grand par rapport les autres.

◆ la même chose pour le spectre du couple (figure IV-2) et du vitesse (figure IV-3), avec le spectre du couple donne des information plus claires que celui de la vitesse .

Cependant, le couple et la vitesse dépendent du comportement global du dispositif mécanique constitué du moteur, du dispositif entraîné, de l'accouplement..., ainsi que des défauts qui peuvent affecter chacun de ces élément. Il possible d'observer une composante oscillatoire de vitesse ou de couple d'origine purement mécanique, ceci peut conduit à un diagnostic erroné[SAH 03]. D'autre part, le coût des capteurs mécaniques limite l'utilisation de ces techniques.

Toutes ces raisons, rendent difficile la détection de défaut par l'analyse de la vitesse ou du couple. On préférera donc utiliser le courant statorique qui est toujours mesurable quelque soit les conditions d'installation de la machine.

Au point de vue des résultats des différentes simulation, on peut affirmer que la manifestation des raies est un signe de l'existence du défaut, de plus, leur amplitude est une indication du degré de sévérité du défaut.

IV-8 Conclusion

L'analyse spectrale du couple et de la vitesse, et du courant statorique par la transformée de Fourier rapide, nous a permis de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux, et donc de retrouver les raies associées au défaut de barres. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée sur le courant statorique que sur la vitesse ou sur le couple. En effet, la mesure du courant puis son traitement est plus simple et moins onéreux qu'une analyse de la vitesse ou du couple. La comparaison entre toutes ces méthodes, du point de vue sensibilité au degré de sévérité du défaut, nous a permis de constater que l'analyse de courant statorique reste la meilleure méthode pour détecter les ruptures de barres rotoriques.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons, la première est parce que les moteurs asynchrone à cage sont les plus répondus dans le monde industriel, tandis que la deuxième réside dans le fait que d'un point de vue structure multi enroulements.

Les ruptures de barres et de portion d'anneau de court-circuit ont été le centre de notre intérêt dans ce présent travail.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi représentés.

Nous avons développé un modèle dq pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances de barres rotoriques et de portion d'anneau.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain) et (avec défaut) nous avons développé un modèle mathématique multi- enroulement pour la cage rotorique.

Ce modèle, conduit à un gain notable en termes de temps de calcul tout en introduisant l'apparition d'un défaut par un changement significatif des résistances de la sous matrice liée au rotor.

Ensuite, nous avons construit un programme de simulation a l'aide du MATLAB 6.5. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine(sans et avec défauts).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut de deux barres cassées (adjacentes et espacées) et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

A la fin de ce travail on a fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance nous avons développés un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine. L'analyse spectrale ayant recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse spectrale de ces performances a permis de détecter et de quantifier la valeur des défaut survenue sur la partie rotorique de la machine.

En perspective, utilisé un modèle réduit qui contient cinq équations avec rupture de barre et d'utiliser ce modèle avec la commande PI par mode glissant.

La matrice [R_{tr}] est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 R_s & -w_r L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & w_r M_{sr} \text{sinka} & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 w_r L_{sc} & R_s & \vdots & \dots & \dots & \dots & -w_r M_{sr} \text{coska} & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & \frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & 0 & \ddots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & \ddots & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r-1)} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & \frac{R_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & \frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix}$$

La matrice [L_{tr}] est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 L_{sc} & 0 & \vdots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \text{coska} & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 0 & L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \text{sinka} & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \ddots & \ddots & M_{rr} & \ddots & M_{rr} - L_b & \vdots & \frac{L_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \frac{3}{2}M_{sr} \text{coska} & \frac{3}{2}M_{sr} \text{sinka} & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} & \ddots & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & \frac{L_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & \frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e
 \end{bmatrix}$$

Paramètre du moteur utilisé

P	puissance nominale	1.1Kw
V	tension nominale de ligne	220 v
f_s	fréquence d'alimentation	50Hz
p	nombre de paire de pole	1
R	diamètre moyen	35.76mm
l	la longueur	65mm
e	épaisseur d'entrefer	0.2mm
N_r	nombre de barres	16
N_s	nombre de spire par phase	160
R_s	résistance d'une phase statorique	7.58 Ω
R_r	résistance d'une barre rotorique	150 $\mu\Omega$
R_e	résistance d'une portion d'anneau	150 $\mu\Omega$
L_e	inductance de fuite d'anneau de court-circuit	0.1 μH
L_b	inductance de fuite d'une barre rotorique	0.1 μH
L_{fs}	inductance de fuite statorique	26.5mH
K_0	coefficient de frottement	0
J	moment d'inertie	5.4 10^{-3} Kgm ²

BIBLIOGRAPHIE

- [**ABE 02**] : **ABED Aicha** «Contribution à l'étude et Au Diagnostic de la Machine Asynchrone », Thèse de Doctorat Université Henri, Nancy Soutenue Publiquement le 28 mars 2002
- [**BEL 05**] : **BELHAMDI Saad** « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005
- [**BOU 01**] : **BOUMEGOURA.T**, "Recherche de Signale électromagnétique des défauts dans une machine asynchrones et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic", thèse de doctorat Ecole centrale de Lyon France, 2001.
- [**CAS 92**] : **ROLAND Casimir** « Diagnostic des Défauts Des Machines Par Reconnaissance Des Formes », Thèse Doctorat, préparé aux sein de L'école Doctorale Electronique, Electrotechnique, automatique De Lyan,03 /1992
- [**GHO 05**] : **GHOGGAL Adel** : « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Dédié à la Détection Des Défauts »Thèse de Magister, Université de Batna , Soutenue 2005
- [**HUB 02**] : **HUBERT Razik** « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance »Faculté des Sciences , Nancy, CEDEX , juin 2002.
- [**REZ 03**] **Rezzoug.A, Hubert R, Abed .A** « Un modèle du moteur asynchrone à cage dédie à la simulation et au diagnostic », Université Henri Poincaré Nancy1,Noter de cours 2003 .
- [**SAH 03**] : **SAHRAOUI Mohamed** «Contribution aux Diagnostic des Machines Asynchrones Triphasées à cage »Université Mohamed Khider Biskra,10 /2003

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par M^{ef} : *Saâd BELHAMDI*

Présenté par : *MAGHRAOUI Abdelwahab & DEBOUCHA Abdelhakim*

Thème :

Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage

Résumé :

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance de circuits de commande en automatique ont contribué à l'utilisation grandissante des machines asynchrones dans les systèmes d'entraînements électriques. Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et coût de fabrication. Leurs maintenance et surveillance permettent de rentabiliser les installations. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter d'une manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines.

L'objectif de notre travail s'articule autour de la modélisation de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres et de l'application de la méthode appropriée du traitement de signal pour pouvoir détecter le défaut.

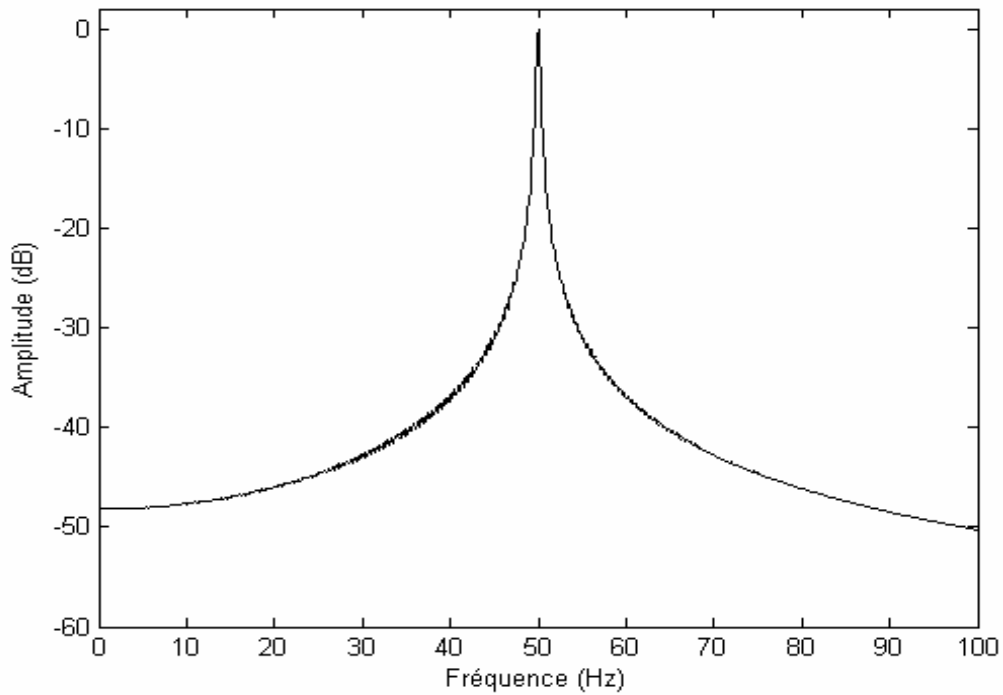
Mots clés :

Moteur asynchrone, Défaut rotorique, Diagnostic, Modèle multi-enroulement,
Analyse spectrale

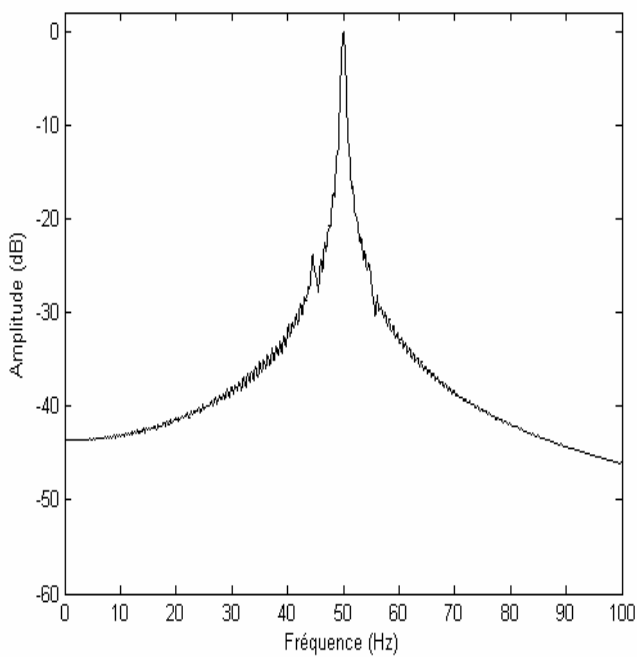
Analyse spectrale avec « fenêtre hannig »

► **Le courant statorique**

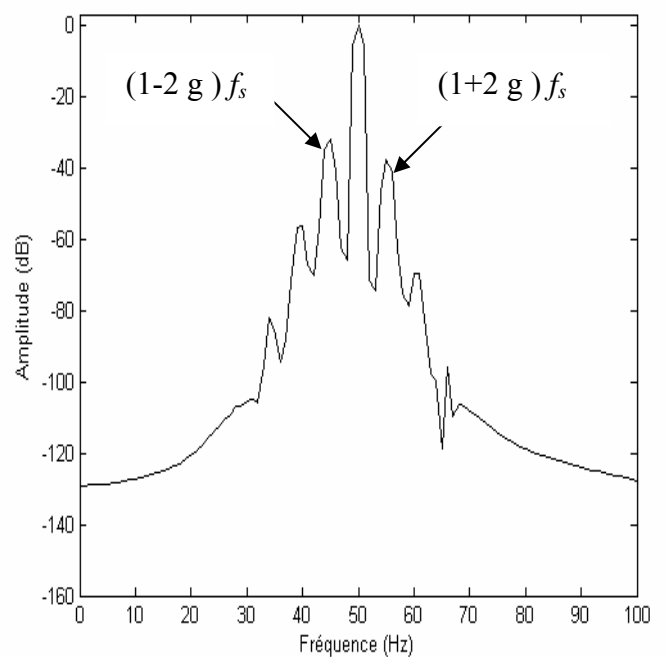
Nous présentons les résultats de simulation de l'analyse spectrale du courant statorique par FFT en régime permanent avec une charge de 3.5 Nm.



a : état sain



b : rupture de barre 1 « $R = 11 \times R_b$ »



c : rupture de barre 1 « $R = 30 \times R_b$ »