



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département du génie électrique

Projet de fin d'études

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

**Diagnostic de défauts rotorique d'une machine
asynchrone à rotor à cage d'écureuil.**

Proposé et dirigé par :

Professeur O. Touhami.

Réalisé par :

*Bouaicha Abdelghafour.
Belkacemi rabie.*

Résumé

Le moteur asynchrone à cage est le moteur le plus répandu dans l'industrie, il est robuste, fiable, économique il est également apprécié pour sa très bonne standardisation, il arrive néanmoins qu'il présente une panne électrique ou mécanique.

L'objet de ce mémoire est la détection des défaillances du moteur asynchrone au niveau du rotor, pour un moteur doté d'une cage d'écureuil, le défaut correspond à la rupture des barreaux et d'une portion d'anneau de court-circuit.

Mots clefs : *Diagnostic, Modèle, Cage d'écureuil, barres et portions cassées.*

Abstract

A squirrel cage induction motor is the motor the most used in industry, it is robust, reliable and economic, and it is also appreciated for its good standardisation, nevertheless it happens that it presents electrical and mechanical failures.

The aim of this memorandum is the detection of rotor failures in induction machines, the defect correspond to the broken bars and broken segment of end-rings.

Key words: *Diagnosis, Model, Squirrel cage, Broken bars and end-rings.*

ملخص:

المحرك اللاتزامني ذو القفص ، هو المحرك الأكثر استعمالا في الصناعة ، إنه قوي واقتصادي، وهو أيضا مفضل من أجل عامة قياسه ، ولكنه في بعض الحالات يقع له عطب كهربائي أو ميكانيكي . الهدف من هذه المذكرة هو إيجاد عطب المحرك في الدوار هذا المحرك مزود بقفص السنجاب ، العطب يتمثل في انكسار أعمدة القفص وقطعة من حلقة الدارة القصيرة.

الكلمات المفتاح: تشخيص ، نموذج ، قفص السنجاب ، أعمدة وقطع الدارة القصيرة مكسرة

Sommaire



Notations

Introduction générale.....01

Chapitre I : Synthèse bibliographique02

Chapitre II : Modélisation par l'approche des circuits couplés.

II.1. Introduction	13
II.2. Modélisation de la machine	13
II.2.1. Modélisation du stator	13
II.2.1.1. Détermination de Φ_{ss}	14
II.2.1.2. Détermination de Φ_{sr} ..	15
II.2.2. Modélisation du rotor	20
II.2.2.1 Détermination de Φ_{rs}	21
II.2.2.2. Détermination de Φ_{rr}	22
II.2.3. Détermination du couple électromagnétique	22
II.3. Introduction des défauts rotoriques	23
II.3.1. Rupture des barres	23
II.3.1.1. Modèle de la machine avec une barre cassée	23
II.3.1.2. Modèle de la machine avec deux barres cassées.....	26
II.3.1.3 Généralisation du modèle	30
II.3.2. Rupture de portion d'anneau de court-circuit	32
II.4 Conclusion	33

Chapitre III : Simulation des défauts au rotor

III.1. Introduction	34
III.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK	34
III.3. Développement du modèle SIMULINK de la machine asynchrone à cage.....	35
III.4. Résultats de la simulation	35
III.4.1. Rupture des barres	36
III.4.1.1 Analyse du courant statorique	36
III.4.1.2 Analyse du couple.....	41
III.4.1.3 Analyse de la vitesse.....	44
III.4.1.4 Analyse des courants de barres.....	45
III.4.2. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit	49
III.4.2.1. Analyse du courant statorique	49
III.4.2.2. Analyse du couple.....	50
III.4.2.3. Analyse de la vitesse.....	50
III.4.2.4. Analyse des courants de barres.....	51
III.5. Conclusion.....	53

Conclusion générale.....54

Annexe.....56

Références bibliographiques

Notations

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

$V_s :$	vecteur des tensions statoriques.
$I_s :$	vecteur des courants statoriques.
$r_s :$	résistance d'une phase du stator.
$\Phi_s :$	flux total au stator.
$V_r :$	vecteur des tensions rotoriques.
$I_r :$	vecteur des courants rotoriques.
$\Phi_r :$	flux total au rotor.
$L_{ls} :$	inductance de fuite au stator.
$L_{ms} :$	inductance magnétisante.
$L_{xn} :$	inductance entre la phase x du stator et la maille n du rotor.
$N_s :$	nombre de spires par phase.
$l :$	longueur de l'entrefer.
$g :$	entrefer.
$r :$	rayon moyen de l'entrefer.
$\theta :$	angle de rotation.
$\alpha_r :$	angle entre deux barres adjacentes.
$R_b :$	résistance d'une barre du rotor.
$R_e :$	résistance d'une portion de l'anneau de court-circuit.
$L_b :$	inductance d'une barre du rotor
$L_e :$	inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit.
$\Phi_{rks} :$	flux rotorique de la maille k dû aux courants statoriques.
$\Phi_{rkr} :$	flux rotorique de la maille k dû aux courants rotoriques.

Introduction générale



Le moteur asynchrone à cage est le moteur le plus répandu dans l'industrie, il est robuste, fiable, économique il est également apprécié pour sa très bonne standardisation, il arrive néanmoins qu'il présente une panne électrique ou mécanique.

L'objet de ce mémoire est la détection des défaillances du moteur asynchrone au niveau du rotor, pour un moteur doté d'une cage d'écureuil, le défaut correspond à la rupture des barreaux et d'une portion d'anneau de court-circuit.

L'inaccessibilité du rotor nous amènera à chercher les variations des grandeurs rotoriques dues aux défauts, à travers leurs actions sur le stator, pour cela nous utilisons une méthode répandue qui est l'analyse de la signature du courant du moteur.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Dans le chapitre I, nous présentons une synthèse bibliographique des travaux de recherche menés sur les méthodes de diagnostic des défauts d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.
- Dans le chapitre II, nous proposons une modélisation de la machine asynchrone par l'approche des circuits couplés multiples, nous développons ensuite ce modèle en introduisant les défauts.
- Le chapitre III, est consacré à la simulation, où nous avons présenté les résultats obtenus pour une, deux et trois barres cassées et pour une portion d'anneau de court-circuit enlevée, puis nous analysons et traitons pour chaque cas le courant statorique par l'analyse spectrale de Fourier.

Le diagnostic et la surveillance des machines électriques sont des procédés aussi anciens que les machines elles mêmes, mais ils étaient restreints aux simples protections contre les surtensions et les surintensités.

L'évolution de la machine et l'amélioration de l'électronique de puissance rendent son diagnostic de plus en plus complexe mais nécessaire pour rendre leur fonctionnement rentable et performant .

La robustesse et la possibilité d' asservissement de la machine asynchrone aussi bien en couple qu'en vitesse, lui ouvre un large champ d'utilisation ; on la retrouve de plus en plus dans la traction électrique; mais les machines subissent de plus en plus de perturbations auxquelles elles sont sensibles.

Les défauts dans l'alimentation, le démarrage direct sur réseau et l'utilisation fréquente des variateurs de vitesse, entraînent des défauts dans la machine et peuvent conduire à des pannes.

Les défauts les plus importants suivant leurs localisation sont :

a/ Rotoriques

- rupture des barreaux
- rupture de l'anneau de court-circuit
- excentricité statique et dynamique

b/ Statoriques

- court-circuit dans les spires
- court-circuit entre les phases
- ouverture d'une phase

c Roulements à billes

- trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- corrosion due à l'eau
- défaut de graissage
- effritement de surface dû aux surcharges

Ces défauts produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :

- déséquilibre des tensions et des courants
- balancement de l'entrefer
- augmentation du couple pulsatoire et diminution du couple moyen
- augmentation des pertes et diminution du rendement
- échauffement et vibration excessifs

Une bibliographie [37] contenant 365 papiers entre articles et surveys présente des méthodes sur la détection et la localisation des défauts de fonctionnement au stator et au rotor de la machine afin d'optimiser l'exploitation de l'ensemble convertisseur-machine.

Les travaux ont rapporté que les pourcentages des défauts dans les différentes parties de la machine asynchrone sont distribués comme suit :

- 38% liés au stator
- 10% liés au rotor
- 40% liés aux roulements
- 12% autres

Thomson a rapporté dans la référence [28] que durant ces dix dernières années, des études ont montré que la rupture des barres rotoriques peut être un problème grave pour certaines machines asynchrones ; bien que la cassure des barres ne mène pas immédiatement la machine à l'arrêt complet, leur décollement des encoches rotoriques peut endommager les enroulements statoriques, de plus si l'environnement est explosif les étincelles provoquées à l'emplacement du défaut pendant le processus de dégradation peut être un risque potentiel en matière de sécurité.

Les principales causes de cassure de barres et de portions d'anneau de court-circuit peuvent être de natures différentes. A titre d'exemple, on peut citer :

- Démarrage direct de la machine sur le réseau qui cause de fortes contraintes thermiques et mécaniques.
- Les pulsations de charges qui peuvent soumettre le rotor à des contraintes mécaniques très élevées, comme dans les compresseurs et les broyeurs de charbon.
- L'imperfection dans le processus de fabrication de la cage rotorique.

Les figures (1) et (2) montrent des exemples réels de cage rotorique avec des barres cassées.

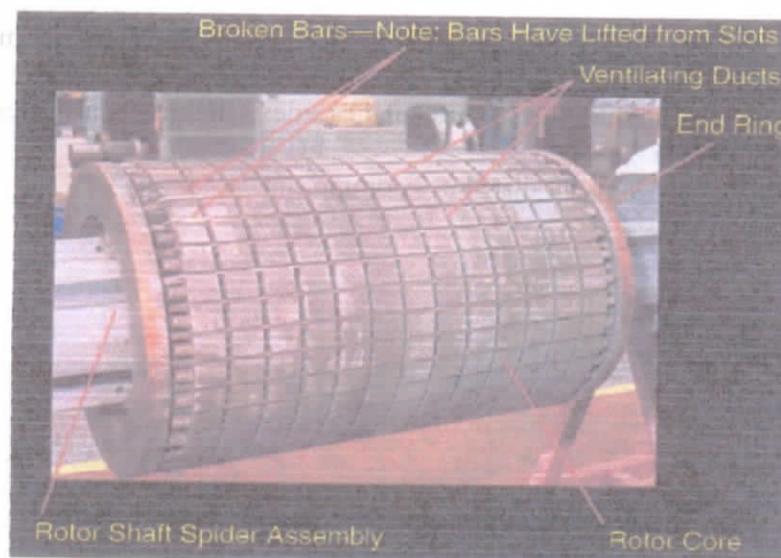


Figure.1 : Rotor avec des barres qui ont quitté les encoches d'un moteur de 1.492 MW. [28]

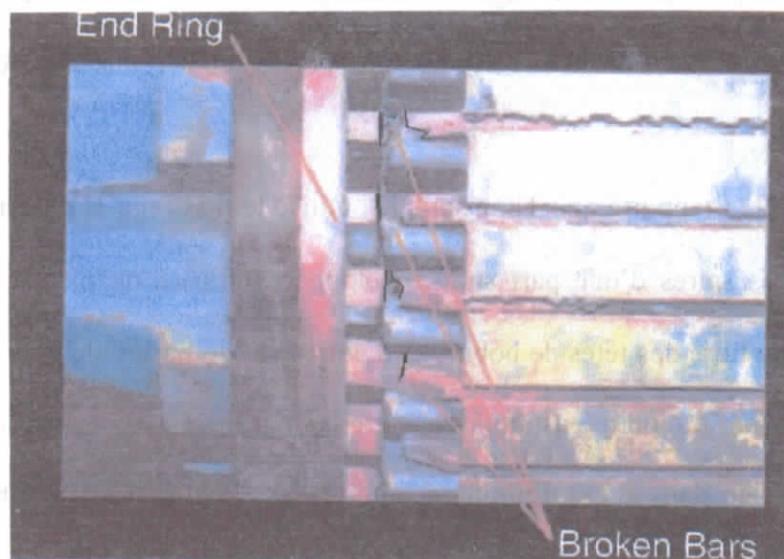


Figure.2 : Rotor avec 20 barres cassées d'un moteur à 46 barres. [28]

Plusieurs méthodes de diagnostic de défauts rotoriques ont été le siège d'étude de plusieurs auteurs.

Certains auteurs [1,2,3] utilisent l'analyse spectrale de la signature du courant pour la détection des défauts dans les barreaux rotoriques, leurs études montrent que les défauts apparaissent aux fréquences $f_b = (1 \pm 2s)f$.

La composante $(1-2s)f$ du courant interagit avec le fondamental du flux de l'entrefer et produit des ondulations dans la vitesse à la fréquence $2sf$, ce qui provoque une augmentation à la composante du courant aux fréquences $f_b = (1 \pm 2ks)f$.

L'inertie de la charge affecte aussi l'amplitude du courant à ces fréquences [3], et d'autres composantes spectrales sont observées pour $f_b = [(k/p)(1-s) \pm s]f$.

Pour éliminer les erreurs dues aux harmoniques de la source, aux déséquilibres de la tension, ou encore au fonctionnement en saturation Nandi propose dans la référence [4] une technique qui consiste à déconnecter les trois phases de la machine, ce qui annule les courants statoriques, le courant rotorique devient la seule source qui induit des tensions dans

les bobinages statoriques, donc si la cage d'écureuil présente des barreaux cassés la tension induite au stator sera directement affectée et son spectre montre une augmentation à une harmonique précise.

G.Salles[12], a rapporté que Thomson [13] utilise le flux pour la détection des barres cassées, il place des spires d'une part sur l'enveloppe extérieure du moteur pour mesurer l'étendue du flux de fuite des têtes de bobine et d'autre part de l'arbre du rotor pour mesurer le niveau du flux axial, il montre ensuite les spectres calculés à partir des signaux issus de ce dernier type de capteur dans le cas d'un moteur sain et dans celui où une des barres du rotor est cassée.

Le rotor peut être le siège d'autres défauts tels que l'excentricité, les effets et les dégâts dus à cette dernière ont été l'objet d'étude de plusieurs travaux [15], [16].

Benbouzid dans la référence [27], présente deux méthodes de détection qui utilisent la signature du courant, la première par le contrôle du comportement du courant autour des fréquences d'encoches, et les fréquences associées sont $f_{\text{slot+ecc}} = f_s [(k.R \pm n_d) / ((1-s)/p) \pm n_0]$.

La seconde par le contrôle du comportement du courant autour du fondamental de la fréquence d'alimentation et ces fréquences sont données par $f_{\text{ecc}} = f_s [1 \pm m(1-s)/p]$.

f_s : fréquence de l'alimentation ;

$k=1,2,3$; $m=1,2,3$; p : nombre de paires de pôles ;

R : nombre d'encoches ; s : glissement ;

n_0 : ordre des harmoniques de la fmm statorique .

Benbouzid [27], a mentionné l'existence de deux défauts rotoriques, le premier est l'oscillation de l'arbre le long de l'entrefer, qui cause la variation de la densité du flux dans ce dernier, l'oscillation produit alors des harmoniques dans le courant statorique dont les fréquences sont prédites par $f_{\text{osc}} = f_s (k(1-s)/p \pm 1)$.

Le deuxième défaut est l'asymétrie du rotor qui perturbe la densité du flux dans l'entrefer, les fréquences des composantes spectrales de la densité du flux dans l'entrefer sont données

par $f_{ra} = f(k(1-s)/p \pm s)$.

avec $k=1,2,3,\dots$

Yasici montre bien que l'analyse temps-fréquence facilite la détection des défauts, elle propose dans son travail [5], une méthode statistique, dont l'idée est de transformer le courant du moteur en spectre temps-fréquence pour capter la variation des composantes de la fréquence en fonction du temps, et pour analyser le spectre statistiquement pour différencier le fonctionnement avec défaut du fonctionnement normal. l'algorithme associé à cette méthode se compose de quatre étapes :

- l'avant-traitement, où le courant est filtré puis discrétisé, et le spectre temps-fréquence est établi .
- étape d'apprentissage, dans laquelle les vecteurs de la caractéristique sont segmentés en régions homogènes le long de l'axe des temps, soit par une méthode statistique, ou par estimation du couple ; les régions obtenues de la segmentation définissent les modes de fonctionnement normal du moteur, chaque mode est analysé statistiquement où les représentatifs et les seuils sont déterminés .
- étape de test où l'écart entre les caractéristiques mesurées et les modes représentatifs est comparé au seuil, si l'écart est supérieur au seuil l'existence d'un défaut dans les barres rotoriques est fort probable, ce qui conduit à une quatrième étape où plusieurs mesures sont faites pour augmenter la précision de la détection du défaut .

Une autre méthode est présentée concernant la détection des barres rotoriques cassées par l'utilisation des signaux de tensions et de courants statoriques destinés à l'estimation

simultanée de la vitesse et de la résistance rotorique. Cette dernière est comparée à sa valeur nominale pour détecter les barres cassées en tenant compte de l'influence de la température, [6].

Haji et Tolyat [7] présentent un algorithme basé sur l'erreur minimale de Bayes qui utilise les courants statoriques comme seule entrée; la connaissance de la vitesse est importante pour la normalisation et l'obtention des caractéristiques c'est pourquoi ils l'estiment, et pour cela ils utilisent la méthode des harmoniques d'encoches rotoriques (RSH), les caractéristiques sont extraites et envoyées à un classificateur, ce dernier basé sur le calcul de variance, covariance et moyenne, décide si la machine est saine ou contient des barres cassées.

Dans la référence [8], les auteurs utilisent la méthode « Sequences of Field-Oriented Control », ils décrivent la structure d'une machine asynchrone commandée en incluant deux modèles en courant et en tension. Le premier est utilisé pour le contrôle, le second pour l'adaptation en ligne des paramètres et pour l'estimation du couple, les auteurs montrent que l'écart entre ces deux modèles indique des asymétries dans la machine.

Trigeassou et Moreau [9] choisissent une approche d'estimation des paramètres de la machine utilisant l'algorithme d'erreur de sortie en se basant sur les références [10] et [11]; D'abord ils constituent une base de données (référence) de valeurs nominales des paramètres de P_{nom} d'une machine saine. Si cette référence est différente de θ_{pes} estimée du fonctionnement normal, un défaut est détecté, puis l'origine du défaut est localisée utilisant l'analyse de Fourier, et ils montrent que la présence d'une raie à $f \ll f_0$ indique un défaut rotorique, avec f_0 : fréquence de l'alimentation.

Le couple peut être utilisé pour la détection de l'excentricité comme l'ont montré Kral et Pirker dans [17] où ils estiment le couple, les amplitudes de la première et la seconde harmonique de l'analyse de Fourier discrète peuvent être des indicateurs de défauts.

D'autres méthodes et techniques sont utilisées pour l'identification et le diagnostic des défauts, Filippetti [14] utilise les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour le diagnostic en ligne des défauts du rotor en particulier celui des barres cassées, il propose l'utilisation de l'apprentissage mixte, où les données sont fournies par la simulation d'une machine saine et d'une autre défectueuse pour introduire les différents défauts qui peuvent apparaître .

Certains auteurs [12] utilisent la logique floue pour le diagnostic, celle ci intervient dans la procédure informatique de la prise de décision .

Après avoir étudié les effets des barres et anneaux cassés et les excentricités de l'entrefer sur les pertes joule et fer par une méthode numérique qui combine deux méthodes éléments finis - espace d'état (CFE-SS) [18], Damerdash est passé au diagnostic des défauts rotoriques en appliquant cette méthode [19], l'objectif de cette publication est de montrer la possibilité de détection des excentricités de l'entrefer par une méthode numérique « Time Stepping » CFE-SS (TSCFE-SS), et le pouvoir de distinguer entre la rupture des barres et/ou portions d'anneaux de court circuit et les excentricités utilisant la combinaison de l'analyse de la signature du courant du moteur (MCSA), et l'analyse de la signature du profil du couple (TPSA) .

Dans la référence [20], Damerdash a développé sa méthode en intégrant la méthode TSCFE-SS avec la technique Time Series Data Mining (TSDM), où il a pu caractériser et prédire les modes de fonctionnement de la machine automatiquement, sa méthode permet de différencier entre les types de défauts, comme l'excentricité statique et dynamique et les distinguer des défauts de la cage rotorique, elle permet aussi d'avoir le degré d'excentricité et le nombre de barres cassées .

Le stator est plutôt soumis à des contraintes électriques que mécanique, contrairement au rotor, il présente essentiellement des défauts dans les bobinages (court-circuit ,ouverture d'une phase), presque 30-40 % des rapports sur les défauts des machines appartiennent à la

catégorie des défauts de court-circuit des bobinages statoriques .

Dans la référence [12] l'auteur rapporte que l'observation du flux permet une très bonne détection des défauts liés au stator ; ce type de signal nécessite la connaissance des courants, des tensions et de la vitesse de rotation du moteur. les composantes de la fréquence à détecter en cas de défaut dans la composante du flux axial sont données par $(k \pm n(1-s)/p)f$. où $n = 1, 2, 3, \dots, (2.p-1)$; $k = 1, 3$.

Dans la référence [9], les auteurs montrent qu'une raie dans le spectre de fréquence à $f = n f_0$, est causée par un défaut statorique, ($n > 1$, f_0 : fréquence d'alimentation) l'origine de ce défaut est localisée à l'aide du modèle triphasé où six paramètres des bobinages statoriques sont utilisés pour l'estimation ; une méthode plus rigoureuse utilise onze paramètres, donne les mêmes résultats [21].

Vieira et Theys dans la référence [22] s'intéressent à la détection séquentielle de changements brusques de la résistance et de l'inductance statoriques, l'approche faite utilise d'abord le filtre de Kalman associé à un modèle d'espace d'état discret pour la génération des résidus puis elle fait la classification après avoir fait des règles de décision .

La possibilité d'utilisation du modèle d'identification de Park pour la détection des court-circuits du stator a été vérifiée expérimentalement par Schaeffer [23] , où l'expérience a été suivie par une analyse évaluant les effets de court-circuits sur les paramètres estimés du modèle de Park .

La technique des décharges partielles est une technique très utilisée pour détecter la détérioration des isolations dans les machines tournantes à grande puissance . Des investigations à base de cette technique sont encore à développer afin d'obtenir un critère de durée de vie pour optimiser les cycles de maintenance et pour permettre une prévention de panne [24] .

A l'interface entre le rotor et le stator le roulement à billes présente aussi un vieillissement relativement rapide, classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire [12].

Selon H.Tolyat [2], Schoen [25] a montré que les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts de roulement apparaissent dans le spectre du courant à $f_{bmg} = f_l \pm m f_v$ où :

$m=1,2,3, \dots$; f_v : est la fréquence d'une des vibrations caractéristiques .

Une approximation faite par Benbouzid dans la référence[26], pour les roulements dont le nombre de billes est compris entre 6 et 12, donne les fréquences de vibration :

$f_v = 0.4 n f_r$ pour les défauts dans les gorges intérieures .

$f_v = 0.6 n f_r$ pour les défauts dans les gorges extérieures .

f_r étant la fréquence de rotation .

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique des travaux de recherche menés sur les méthodes de diagnostic des défauts d'une machine asynchrone à cage d'écureuil , ces méthodes sont basées sur l'étude de différents signaux qui peuvent être tributaires par de différents défauts .

Les plus importants signaux utilisés pour le diagnostic peuvent être résumés par :

- Le flux
- Le couple électromagnétique
- Courants et tensions statoriques
- Vibrations mécanique et acoustique

Différents auteurs développent plusieurs techniques pour traiter ces signaux et en tirer des informations liées aux défauts, certains d'entre eux utilisent l'analyse spectrale des courants et

Chapitre II

*Modélisation par l'approche des circuits
couplés multiples*

II.1. Introduction

Le modèle triphasé-triphasé ne nous permet pas de connaître les valeurs réelles des courants circulant dans les barres rotoriques, ainsi il ne permet surtout pas de prendre en compte les défauts rotoriques, c'est pour quoi le modèle multi-enroulements a été développé.

Dans ce modèle, le rotor est représenté comme étant constitué d'autant de phases que de barreaux ce qui conduit à considérer les courants circulant dans les portions d'anneau de court-circuit comme des courants de phase rotoriques, *figure(3)*.

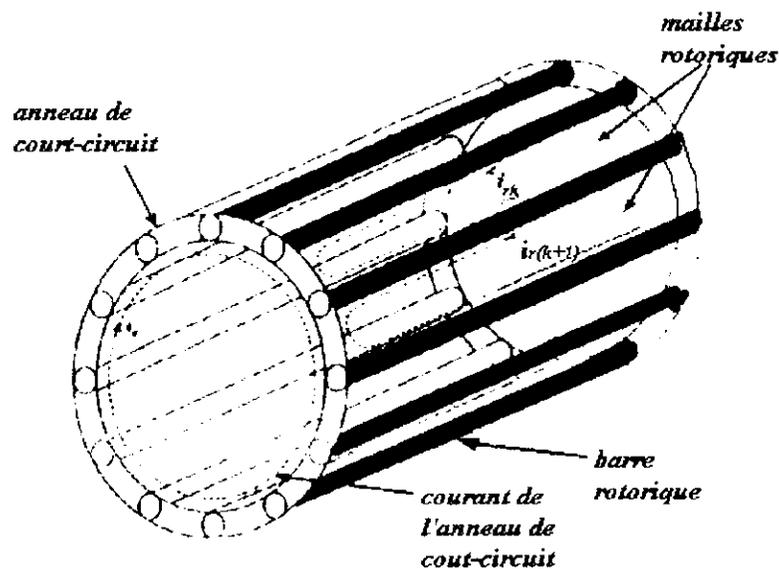


Figure.3 : Représentation des mailles rotoriques.

II.2. Modélisation de la machine

II.2.1. Modélisation du stator

En tenant compte des hypothèses suivantes :

- Saturation négligeable.
- Distribution sinusoïdale des enroulements statorique.
- Entrefer constant.

- Courant entre barres négligeable.

Les équations statoriques peuvent s'écrire :

$$V_S = R_S I_S + \frac{d \Psi_S}{dt} \quad (1)$$

Avec :

$$V_S = [V_a \ V_b \ V_c]$$

$$I_S = [I_a \ I_b \ I_c]$$

La matrice résistance R_S (diagonale 3×3) est constituée des résistances de chaque enroulement.

$$R_S = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

et le flux total au stator :

$$\Phi_S = \Phi_{SS} + \Phi_{SR} \quad (3)$$

Où :

- Φ_{SS} est le flux statorique dû aux courants statoriques .
- Φ_{SR} est le flux statorique dû aux courants rotoriques.

11.2.1.1. Détermination de Φ_{SS}

Pour une distribution sinusoïdale des enroulements, le flux statorique dû aux courants statoriques est donné par [29] :

$$\phi_{ss} = \begin{bmatrix} \phi_{ass} \\ \phi_{bss} \\ \phi_{css} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Où L_{ls} et L_{ms} sont respectivement les inductances de fuite et magnétisante des enroulements statoriques.

L'inductance magnétisante L_{ms} pour un enroulement ayant N_s spires par phase est donnée par l'équation (5) :

$$L_{ms} = (\mu_0 \cdot l \cdot r / g) \cdot N_s^2 \cdot (\pi/4). \quad (5)$$

L'inductance de fuite L_{ls} est calculée à partir de [30] .

II.2.1.2. Détermination de Φ_{sr} :

Chaque maille rotorique est formée de deux barres adjacentes et les portions d'anneau de court-circuit qui les relie, et est magnétiquement couplée avec toutes les autres mailles rotoriques et avec les trois phases du stator.

$$\phi_{sr} = \begin{bmatrix} \phi_{asr} \\ \phi_{bsr} \\ \phi_{csr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a2} & \dots & L_{an} \\ L_{b1} & L_{b2} & \dots & L_{bn} \\ L_{c1} & L_{c2} & \dots & L_{cn} \end{bmatrix} I_r \quad (6)$$

Avec $I_r = [i_{r1} \ i_{r2} \ \dots \ i_{rn}]$

L_{xi} représente l'inductance mutuelle entre la phase x du stator et la maille ' i ' du rotor .

Les inductances sont calculées par l'intermédiaire des fonctions d'enroulements, cette méthode suppose qu'il n'y a pas de symétrie dans l'emplacement des bobines dans les encoches, selon la théorie de fonction d'enroulement 'WFT' [31], l'inductance mutuelle entre deux bobines

quelconques 'i', 'j' de la machine peut être calculée par l'expression (7), en supposant que la perméance du fer est infinie :

$$L_{ij}(\theta) = \mu_0 \cdot l \cdot r \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) N_i(\varphi, \theta) N_j(\varphi, \theta) d\varphi. \quad (7)$$

Où θ représente la position du rotor par rapport à une référence donnée (liée au stator); φ est une position angulaire particulière le long de la surface intérieure du stator.

$g^{-1}(\varphi, \theta)$ est l'inverse de la fonction de l'entrefer, si nous supposons que l'entrefer est constant et petit devant le rayon du rotor alors la fonction $g^{-1}(\varphi, \theta)$ devient constante et est égale à $1/g$.

Le terme $N_i(\varphi, \theta)$ est dit fonction d'enroulement et représente en effet la distribution spatiale de la FMM le long de l'entrefer pour une unité de courant circulant dans l'enroulement 'i', les termes inductance propre peuvent être calculés simplement en posant $i = j$, l'expression (7) est d'ordre générale pour deux enroulements quelconques dans une machine électrique.

Le but est de traiter une distribution arbitraire d'enroulements, il est pratique alors d'employer une autre forme de cette équation pour compléter la tâche de calcul des inductances de la machine.

De la théorie de la fonction d'enroulement, on peut connaître la FMM de l'entrefer produite par un courant i_A circulant dans une bobine A à n'importe quelle position φ de l'entrefer et elle est donnée par :

$$F_A = N_A(\theta) i_A. \quad (8)$$

Le flux crée dans une bobine B ayant N_B spires (où $N_B(\theta)$ est la distribution de l'enroulement de la bobine B , voir : *figure(4)*) par le courant i_A est donné en fonction de la FMM

par :

$$\Phi = F \cdot \lambda, \quad (9)$$

Où λ est la perméance de l'entrefer, et F la FMM dans l'entrefer. En se referant à la figure(4), le flux différentiel traversant l'entrefer à travers une section transversale droite égale à $l \cdot r \cdot d\theta$ est :

$$d\Phi = F_A(\theta) \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot d\theta \cdot g, \quad (10)$$

et le flux différentiel crée dans B devient alors :

$$d\lambda_{BA} = \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot g \cdot N_A(\theta) N_B(\theta) i_A d\theta \quad (11)$$

d'où l'expression du flux total :

$$\lambda_{BA} = \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot g \cdot i_A \int_{\theta_{B1}}^{\theta_{B2}} N_A(\theta) N_B(\theta) d\theta \quad (12)$$

Du flux total, il est alors possible de déterminer l'inductance L_{BA} entre la bobine A et la bobine B :

$$L_{BA} = \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot g \int_{\theta_{B1}}^{\theta_{B2}} N_A(\theta) N_B(\theta) d\theta. \quad (13)$$

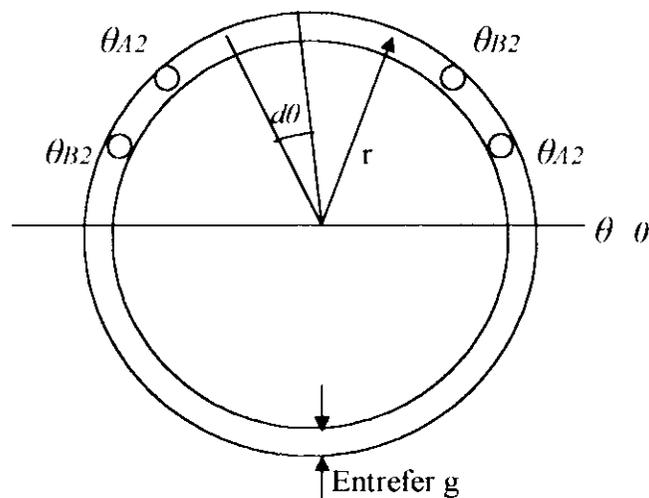


Figure.4 : Position des bobines A et B dans l'espace .

En considérant la distribution des enroulements statoriques et des barres rotoriques dans la figure (5), la fonction d'enroulement normalisée pour les phases statoriques est [29] :

$$\begin{cases} N_a = N_s/2 \cos(\theta) \\ N_b = N_s/2 \cos(\theta - 2\pi/3) \\ N_c = N_s/2 \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (14)$$

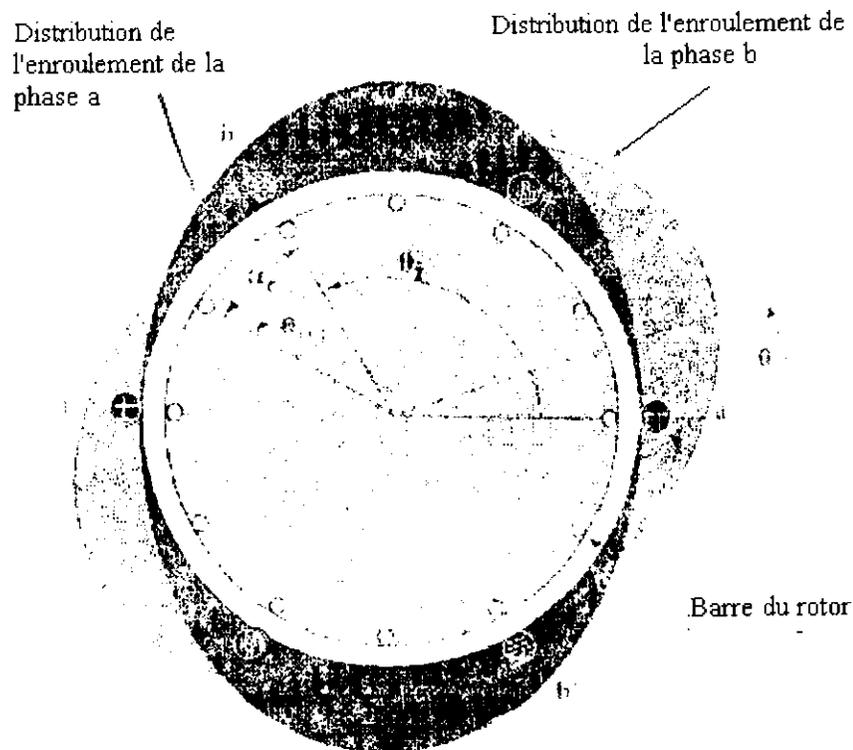


Figure.5: Distribution des enroulements statoriques [29].

Celle de la i -ème maille rotorique est donnée par la figure (6).

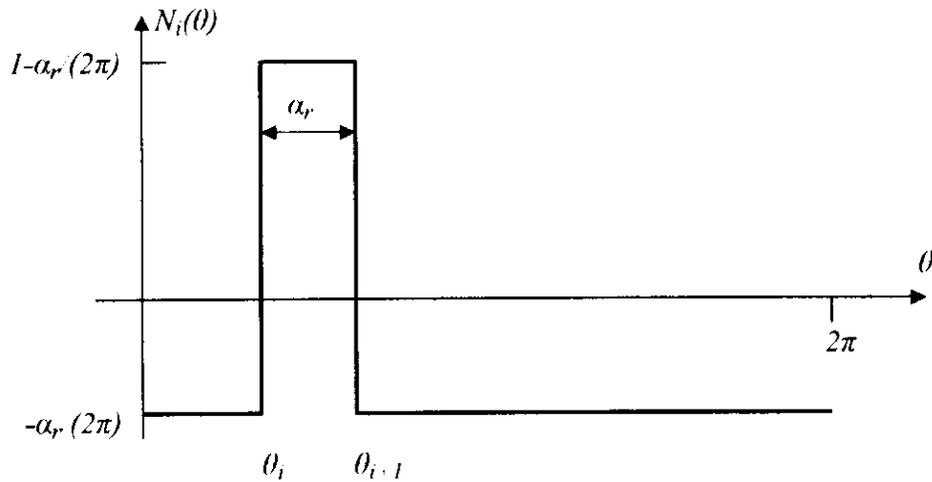


Figure.6 : Fonction d'enroulement d'une maille du rotor .

$$N_i(\theta) \begin{cases} -\alpha_r / (2\pi) & 0 < \theta [\theta_i \\ 1 - \alpha_r / (2\pi) & \theta_i < \theta [\theta_{i+1} \\ -\alpha_r / (2\pi) & \theta_{i+1} < \theta [2\pi \end{cases} \quad (15)$$

Où α_r est l'angle entre deux barres adjacentes et θ_i est l'angle de la i -ème barre.

En remplaçant $g^{-1}(\varphi, \theta)$ et $N_i(\varphi, \theta)$ définis précédemment dans l'expression (7), pour la phase 'a' du stator, on tire :

$$L_{ai} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_i(\theta) d\theta.$$

$$L_{ai} = L_m \cos(\theta_i + \delta) \quad (16)$$

θ_i peut se mettre sous la forme [29] :

$$\theta_i = \theta_r + (i-1) \cdot \alpha_r \quad \theta_r : \text{angle arbitraire.} \quad (17)$$

Avec :

$$L_m = 4 \pi \cdot \sin(\delta) N_s \cdot I_{ms} \quad (18)$$

et

$$\delta = \alpha_r / 2. \quad (19)$$

Pour les autres phases du stator, L_{hj} et L_{ci} sont décalées de $62\pi/3$ par rapport à L_{ai} .

II.2.2. Modélisation du rotor

A partir du circuit équivalent d'une cage rotorique saine représenté à la *figure(7)*, on peut écrire les équations suivantes :

$$V_r = R_r I_r + \frac{d \cdot r}{dt} \quad (20)$$

Avec : $V_r = [V_{r1} \ V_{r2} \ V_{r3} \ \dots \ V_{rn}]$.

$I_r = [I_{r1} \ I_{r2} \ I_{r3} \ \dots \ I_{rn}]$.

Et puisque le rotor est à cage d'écureuil, il vient : $V_{rk} = 0 ; \quad k = 1, 2 \dots n$. (21)

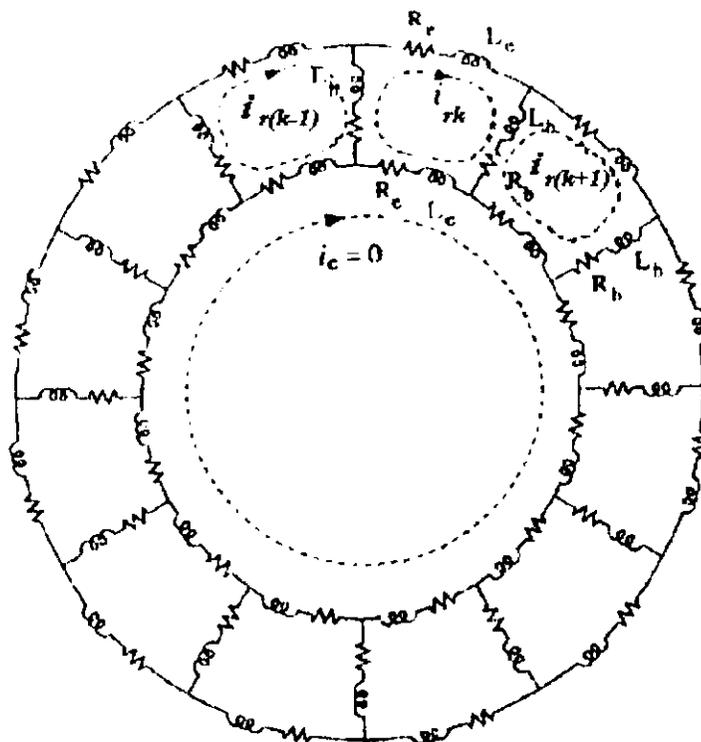


Figure.7 : Circuit équivalent d'une cage rotorique sans défaut [36].

L'équation (20) devient :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(R_b + R) & -R_b & 0 & \cdot & \cdot & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R) & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -R_b & \cdot \\ -R_b & 0 & \cdot & \cdot & -R_b & 2(R_b + R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ir_1 \\ ir_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ ir_n \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} \quad (22)$$

le flux rotorique total est :

$$\Phi_r = \Phi_{rr} + \Phi_{rs}$$

Où :

Φ_{rr} est le flux rotorique dû aux courants rotoriques .

Φ_{rs} est le flux rotorique dû aux courants statoriques .

II.2.2.1 Détermination de Φ_{rs}

Ce flux est exprimé par la relation matricielle suivante :

$$\Phi_{rs} = [\Phi_{r1s} \Phi_{r2s} \dots \Phi_{rms}]^T = \begin{bmatrix} L_{1a} & L_{1b} & L_{1c} \\ L_{1a} & L_{1b} & L_{1c} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1a} & L_{1b} & L_{1c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

L_{ix} égale à L_{xi} déjà calculées, où x correspond aux phases statoriques a,b et c, et $i=1,2,3\dots n$.

II.2.2.2. Détermination de Φ_{rr}

Le flux dans la i -ème maille du rotor provoqué par les courants rotoriques est exprimé par la relation (24) tirée de la figure(7) :

$$\Phi_{rkr} = L_{k1} i_{r1} + \dots + L_{kn} i_{rn} + 2(L_e + L_b) i_{rk} - L_b(i_{r1(k-1)} + i_{r(k+1)}). \quad (24)$$

En écriture matricielle l'équation (24) devient :

$$\begin{bmatrix} \phi_{r1r} \\ \phi_{r2r} \\ \vdots \\ \phi_{rmr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mr}+2(L_b+L_e) & L_{r1r2}-L_b & L_{r1r3} & \dots & L_{r1r(n-1)} & L_{r1rn}-L_b \\ L_{r2r1}-L_b & L_{mr}+2(L_b+L_e) & \dots & \dots & \dots & L_{r2rn} \\ L_{r3r1} & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ L_{rn-1r1}-L_b & L_{rn-1r2} & \dots & L_{rn-1r(n-1)}-L_b & L_{rn-1rn}+2(L_b+L_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Les inductances propres des mailles sont égales, et elles sont données par [29] :

$$L_{mr} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_k^2(\theta) d\theta = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \alpha_r (1 - \alpha_r / 2\pi). \quad (26)$$

Et la mutuelle entre deux mailles rotoriques 'i' et 'j' :

$$L_{rirj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta = \mu_0 \cdot l \cdot r / g (-\alpha_r^2 / 2\pi). \quad (27)$$

II.2.3. Détermination du couple électromagnétique

Le couple et l'équation mécanique pour la machine sont :

$$T_e = I_s^T (\partial L_{sr} / \partial \theta) I_r. \quad (28)$$

$$d\omega/dt = 1/J (T_e - T_r). \quad (29)$$

$$d\theta/dt = \omega, \tag{30}$$

Où θ est l'angle mécanique, ω la vitesse angulaire, T_r le couple résistant et J le moment d'inertie du rotor.

II.3. Introduction des défauts rotoriques

II.3.1. Rupture des barres

II.3.1.1. Modèle de la machine avec une barre cassée

La rupture d'une barre diminue le nombre d'équations rotoriques de 1, car le défaut nous impose la condition suivante :

Si c'est la barre parcourue par i_{rj} et i_{rj+1} qui est cassée, on aura $i_{rj} = i_{rj+1}$, ce qui veut dire que le courant i_{rj} parcourt une maille deux fois plus large et la maille $j+1$ est éliminée, *figure(8)*.

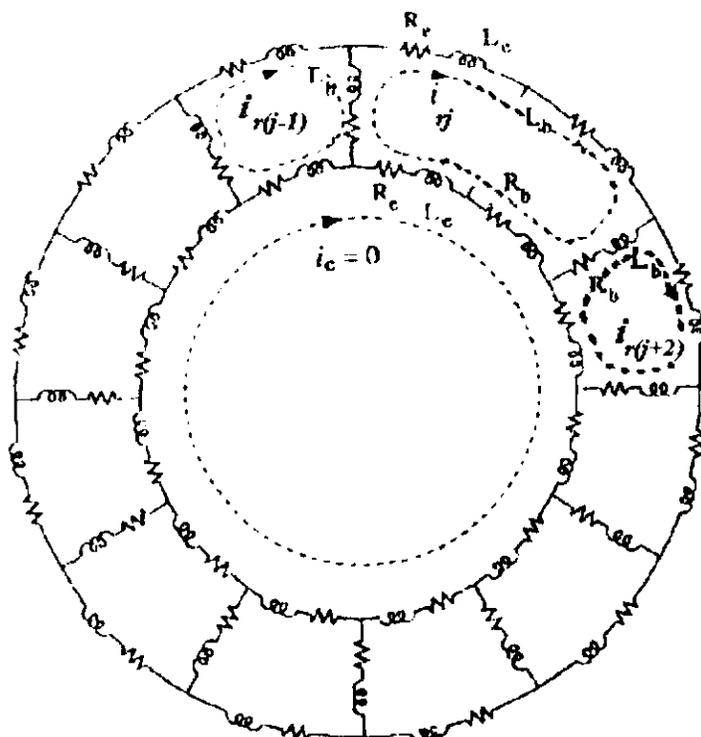


Figure.8 : Circuit équivalent d'une cage rotorique avec une barre cassée.

Dans les matrices inductances la ligne et la colonne $j+1$ sont éliminées et les termes relatifs à la colonne j sont donc recalculés en utilisant l'expression (7) en tenant compte de la nouvelle fonction d'enroulement pour la maille rotorique j , voir *figure(9)*.

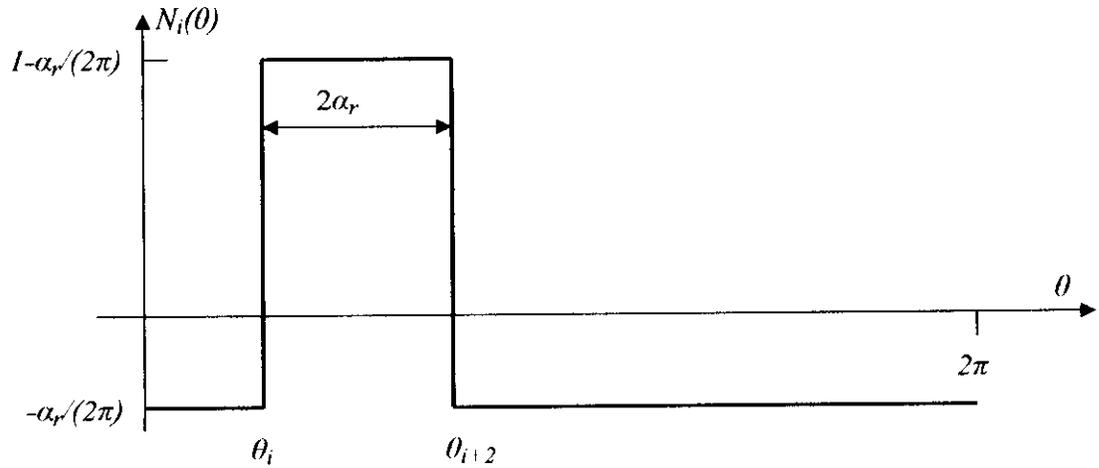


Figure.9: Fonction d'enroulement de la maille 'j' concernée par la cassure de la barre .

$$N_i(\theta) = \begin{cases} -\alpha_r / (2\pi) & 0 < \theta [\theta_i \\ 1 - \alpha_r / (2\pi) & \theta_i < \theta [\theta_{i+2} \\ -\alpha_r / (2\pi) & \theta_{i+2} < \theta [2\pi \end{cases} \quad (31)$$

- Calcul de la nouvelle inductance propre L_{0j}

$$L_{jj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_j^2(\theta) d\theta.$$

$$= \mu_0 \cdot l \cdot r / g \cdot 2 \cdot \alpha_r (1 - \alpha_r / \pi). \quad (32)$$

et,

$$L_{0j} = L_{jj} + 2(L_b + 2L_e). \quad (33)$$

- Calcul de la nouvelle inductance mutuelle rotor-rotor $L_{r_i r_j}$:

$$L_{r_i r_j} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \alpha_r (\alpha_r / 2\pi - 3\alpha_r / 2\pi).$$

$$= \mu_0 \cdot l \cdot r / g (-\alpha_r^2 / \pi). \quad (34)$$

Le même calcul est appliqué pour la ligne j.

La nouvelle matrice inductance devient alors :

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{mr+2}(L_b+L_e) & L_{r12}-L_b & L_{r13} & \dots & L_{r1j} & L_{r1(j+2)} & \dots & L_{1mr}L_b \\ L_{r21}-L_b & L_{mr+2}(L_b+L_e) & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \dots & L_{2rn} \\ L_{r31} & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \vdots & \cdot & \cdot & \dots & L_{j+2}(L_b+2L_e) & \cdot & \dots & \cdot \\ \vdots & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \dots & L_{(n-1)rn}-L_b \\ L_{rn1}-L_b & L_{rn2} & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \dots & L_{mr+2}(L_b+L_e) \end{bmatrix} \quad (35)$$

- Calcul des nouvelles inductances mutuelles L_{xj} entre la maille j et les enroulements statoriques :

$$L_{aj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_j(\theta) d\theta.$$

$$L_{aj} = L_m \cdot \cos(\theta_r + 2(j-1) \cdot \alpha_r + \delta) \quad (36)$$

Cette mutuelle est décalée de $62\pi/3$ pour les phases b et c. Et donc la matrice inductance mutuelle stator-rotor s'écrit :

$$L_{sr} \quad L_{rs}^T = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a1} & \dots & L_{aj} & L_{a(j+2)} & \dots & L_{an} \\ L_{b1} & L_{b2} & \dots & L_{bj} & L_{b(j+2)} & \dots & L_{bn} \\ L_{c1} & L_{c2} & \dots & L_{cj} & L_{c(j+2)} & \dots & L_{cn} \end{bmatrix} \quad (37)$$

La matrice résistance rotorique elle aussi, est affectée par la cassure de la barre, et s'obtient à partir de la nouvelle représentation schématique du rotor montrée à la *figure (8)* :

$$R_r = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_c) & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_c) & & & : & & 0 \\ 0 & & & & -R_b & & : \\ : & & & -R_b & 2(R_b + 2R_c) & -R_b & : \\ : & & & & -R_b & & -R_b \\ -R_b & 0 & \dots & & : & -R_b & 2(R_b + R_c) \end{bmatrix} \quad (38)$$

II.3.1.2. Modèle de la machine avec deux barres cassées

Dans ce cas le nombre de mailles rotoriques diminue de 2, si la barre parcourue par i_{rj} , i_{rj+1} et la barre parcourue par i_{rj+1} , i_{rj+2} sont cassées, on aura :

$$i_{rj} - i_{rj+1} = i_{rj+2} \quad (39)$$

signifie que i_{rj} parcourt une maille trois fois plus large comme le montre la *figure(10)*.

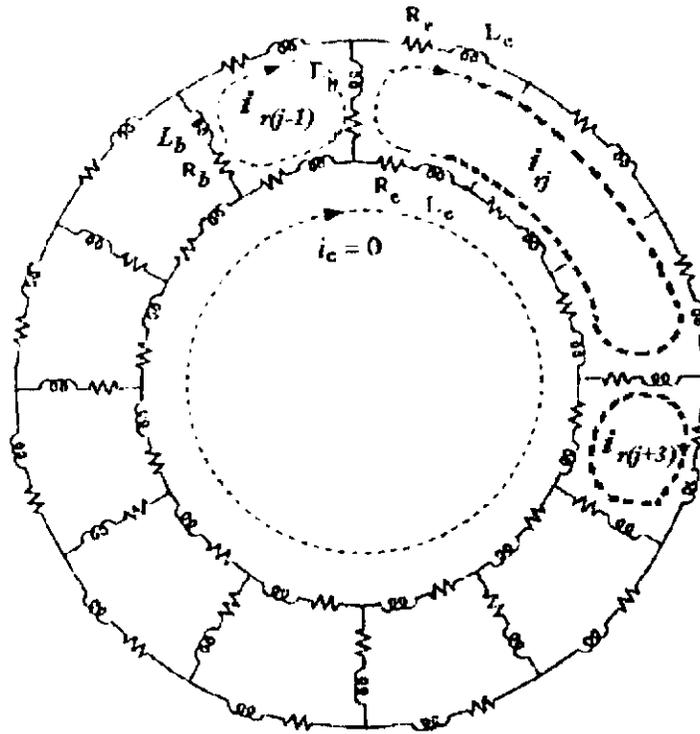


Figure.10: Circuit équivalent d'une cage rotorique avec deux barres cassées.

Lors de la cassure de deux barres la fonction d'enroulement devient :

$$N_i(\theta) = \begin{cases} -\alpha_r(2\pi) & 0 < \theta [\theta_i \\ 1 - \alpha_r(2\pi) & \theta_i \leq \theta [\theta_{i+3} \\ -\alpha_r(2\pi) & \theta_{i+3} \leq \theta [2\pi \end{cases} \quad (40)$$

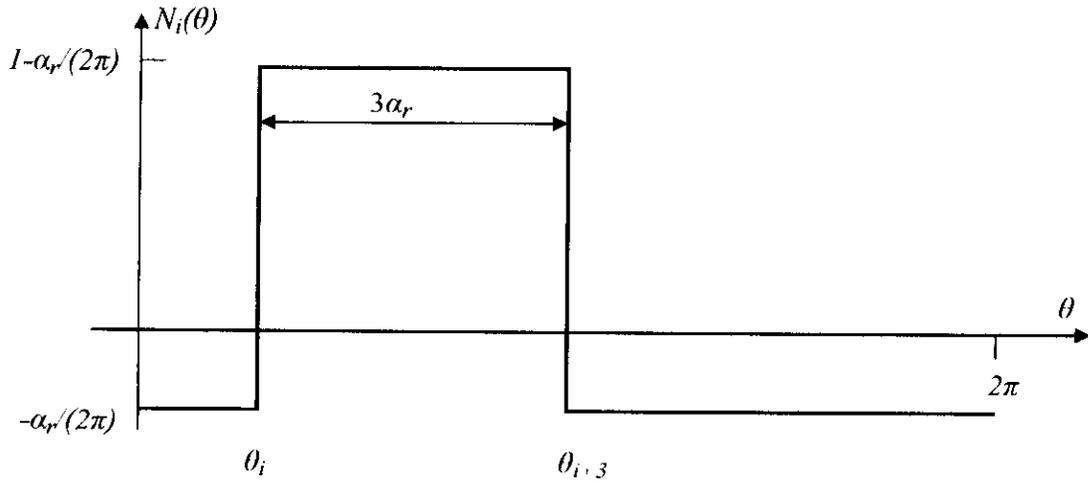


Figure.11: Fonction d'enroulement de la maille 'j' du rotor .

Le même type de relation appliquée dans le cas d'une barre cassée est utilisé pour le calcul des nouvelles matrices inductance et résistance .

- Calcul de L_{0j} :

$$L_{jj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_j^2(\theta) d\theta = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \cdot 3 \cdot \alpha_r (1 - 3\alpha_r / (2\pi)). \quad (41)$$

et,

$$L_{0j} = L_{jj} + 2(L_b + 3L_e). \quad (42)$$

- Calcul de L_{rj} :

$$L_{rj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta \\ = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \alpha_r (\alpha_r / 2\pi - 4\alpha_r / 2\pi).$$

$$= \mu_0.l.r.g(-3\alpha_r^2 \cdot 2\pi). \quad (43)$$

Le même calcul est appliqué pour la ligne j. La nouvelle matrice inductance devient alors :

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr+2}(L_b+L_e) & L_{r12}-L_b & L_{r13} & \dots & L_{r1j} & L_{r1(j+3)} & \dots & L_{r1n}-L_b \\ L_{r21}-L_b & L_{mr+2}(L_b+L_e) & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{r2n} \\ L_{r31} & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & L_{jr+2}(L_b+3L_e) & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{(j+1)r}-L_b \\ L_{rn1}-L_b & L_{rn2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{mr+2}(L_b+L_e) \end{bmatrix} \quad (44)$$

- Calcul des inductances mutuelles L_{xj} :

$$L_{aj} = \mu_0.l.r/g \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_j(\theta) d\theta.$$

$$L_{aj} = L_m \cdot \cos(\theta_r - 3(j-1) \cdot \alpha_r - \delta) \quad (45)$$

Cette mutuelle est décalée de $62\pi/3$ pour les phases b et c.

La matrice inductance mutuelle stator-rotor s'écrit :

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a1} & \dots & L_{aj} & L_{a(j+3)} & \dots & L_{an} \\ L_{b1} & L_{b1} & \dots & L_{bj} & L_{b(j+3)} & \dots & L_{bn} \\ L_{c1} & L_{c1} & \dots & L_{cj} & L_{c(j+3)} & \dots & L_{cn} \end{bmatrix} \quad (46)$$

La nouvelle matrice résistance rotorique devient alors :

$$R_r = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_c) & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_c) & & & : & & 0 \\ 0 & & & & -R_b & & : \\ : & & & -R_b & 2(R_b + 3R_c) & -R_b & : \\ : & & & & -R_b & & -R_b \\ -R_b & 0 & \dots & & : & -R_b & 2(R_b + R_c) \end{bmatrix} \quad (47)$$

II.3.1.3 Généralisation du modèle pour une machine avec k barres cassées

Le même raisonnement, que pour les cas d'une barre et de deux barres cassées, est valable pour le cas où il y a plusieurs barres successives cassées. Le nombre d'équations rotoriques sera diminué en fonction du nombre de barres cassées; et les mailles concernées par la cassure sont éliminées; la maille j sera k fois plus large, *figure(12)*.

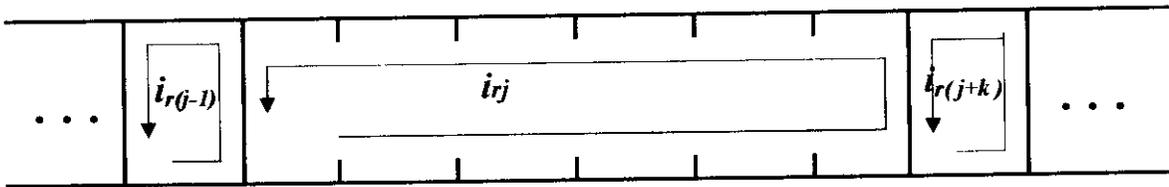


Figure.12: Circuit équivalent d'une cage rotorique avec 'k' barres cassées.

- Calcul de l'inductance propre L_{0j} :

$$L_{jj} = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \int_0^{2\pi} N_j^2(\theta) d\theta = \mu_0 \cdot l \cdot r / g \cdot (k+1) \cdot \alpha_r (1 - (k+1) \alpha_r / (2\pi)). \quad (48)$$

et,

$$L_{0j} = L_{jj} + 2(L_b + (k+1)L_e). \quad (49)$$

- Calcul de l'inductance mutuelle rotor-rotor :

$$\begin{aligned}
 L_{rirj} &= \mu_0.l.r/g \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta. \\
 &= \mu_0.l.r/g \alpha_r(\alpha_r/2\pi - (k+2)\alpha_r/2\pi). \\
 &= -\mu_0.l.r/g (k+1)\alpha_r^2/2\pi.
 \end{aligned} \tag{50}$$

et : $L_{ij} = L_{ji}$, tel que $i = 1 \dots n$ avec $i \neq j, j+1 \dots j+k$.

- Calcul des inductances mutuelles L_{xj} entre la maille j et les enroulements du stator :

$$\begin{aligned}
 L_{aj} &= \mu_0.l.r/g \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_j(\theta) d\theta. \\
 L_{aj} &= L_m \cos(\theta_r + (k+1)(j-1).\alpha_r + \delta)
 \end{aligned} \tag{51}$$

- Calcul de la matrice résistance rotorique :

$$R_r = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_c) & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_c) & & & : & & 0 \\ 0 & & & & -R_b & & : \\ : & & & & & & : \\ : & & -R_b & 2(R_b + (k+1)R_c) & -R_b & & : \\ : & & & & -R_b & & -R_b \\ -R_b & 0 & \dots & & : & -R_b & 2(R_b + R_c) \end{bmatrix} \tag{52}$$

II.3.2. Rupture de portion d'anneau de court-circuit :

Si une ou plusieurs portions d'anneau de court-circuit sont cassées, le nombre d'équations rotoriques se trouve diminué en fonction du nombre de portions cassées, puisque les courants des mailles relatives aux portions cassées sont nuls. mais l'ensemble d'équations électriques reste inchangé.

La figure(13) montre un schéma représentant un rotor avec une portion d'anneau cassée.

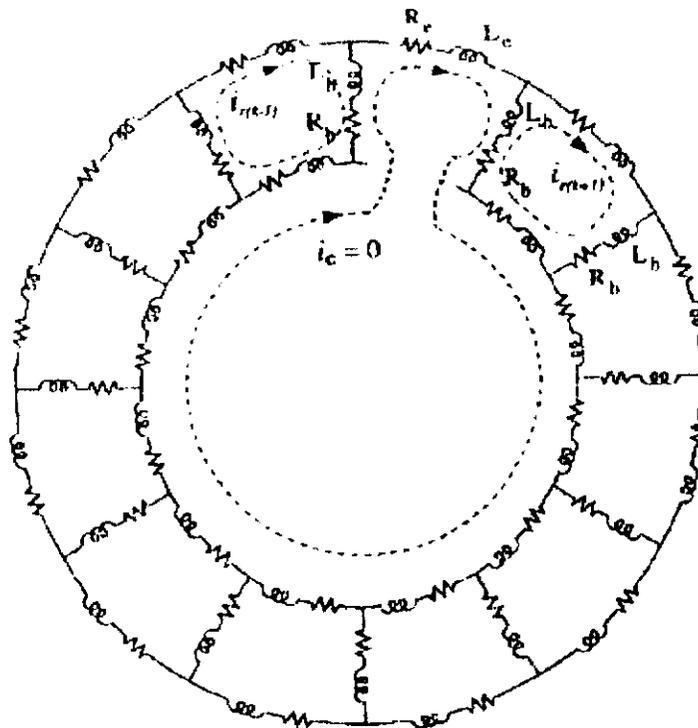


Figure.13: Circuit équivalent d'une cage rotorique avec une portion d'anneau de court-circuit cassée[31].

Conclusion

Le modèle développé est basé sur la géométrie du rotor à cage de la machine asynchrone, c'est pourquoi nous devons recalculer les matrices résistance et inductance pour chaque cas de figure de la géométrie du rotor. Le calcul des inductances propres et mutuelles des mailles rotoriques est effectué en utilisant la théorie de la fonction d'enroulement.

Ce modèle permet l'introduction des défauts et la connaissance des courants réels dans les barres du rotor et dans l'anneau de court-circuit, ce qui est impossible à réaliser en utilisant le modèle triphasé-triphasé.

Chapitre III

Simulation et détermination des défauts au rotor

III.1. Introduction

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisée pour faire des études préliminaires et comparatives, tant au niveau de la conception, qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils de simulation sont utilisés dans le domaine des machines électriques et de la commande : SPICE, SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire.

III.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK

Le MATLAB est un logiciel interactif de calcul numérique et de visualisation graphique, Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions de façon aisée. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc.

MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques.

Le SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes.

Dans notre travail, nous avons couplé ces deux logiciels pour le calcul et l'intégration différentielle du modèle dynamique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil.

III.3. Développement du modèle SIMULINK de la machine asynchrone à cage

A partir de l'étude théorique de la structure de la machine asynchrone à cage (voir Chapitre(II)), nous pouvons élaborer les différents blocs nécessaires à la simulation .

La *figure(14)* dans l'annexe-1, représente le modèle SIMULINK de la machine asynchrone à rotor à cage .

III.4. Résultats de la simulation

La simulation est effectuée en utilisant l'algorithme d'intégration ' Runge-Kutta d'ordre 4 ', qui a donné les mêmes résultats que l'algorithme d'intégration ' Euler d'ordre 1'(ode 1) dans notre application. Le pas d'itération a été fixé à 10^{-3} .

Le calcul des inductances de la machine (sans et avec défauts) se fait par un programme MATLAB avant le lancement de la simulation sous SIMULINK, et ses paramètres sont préalablement calculés en se basant sur les notions de construction de machines électriques [30] et [33].

Les résultats de la simulation sont traités et visualisés dans MATLAB. Nous montrons dans ce qui suit les résultats obtenus pour la machine sans défaut et pour les deux cas de défauts rotoriques choisis pour la simulation :

1. Cassure de barres .
2. Rupture de portion d'anneau de court-circuit.

Dans le premier type de défauts nous avons simulé la machine avec un rotor ayant :

- Une (01) barre cassée.
- Deux (02) barres cassées.
- Trois (03) barres cassées.

Ces défauts sont introduits dans le programme en supprimant les blocs définissant les barres concernées par la cassure, et en introduisant les nouvelles inductances et résistances

calculées dans le Chapitre précédent.

La variation de la résistance équivalente du rotor est donnée dans le tableau-1- dans l'annexe.

Dans le deuxième cas nous avons simulé la machine avec une portion d'anneau de court-circuit sciée, en forçant le courant de la portion en question à zéro .

III.4.1. Rupture des barres

III.4.1.1. Analyse du courant statorique

On remarque que les défauts provoqués causent des oscillations de l'enveloppe du courant statorique, l'amplitude de ces oscillations augmentent avec l'augmentation du nombre de barres cassées en comparaison à celle de la machine sans défaut, comme le montrent les figures 13,14,15,et 16 .On remarque aussi que l'amplitude du courant dans la partie transitoire (courant de démarrage) diminue à chaque fois qu'on casse une barre.

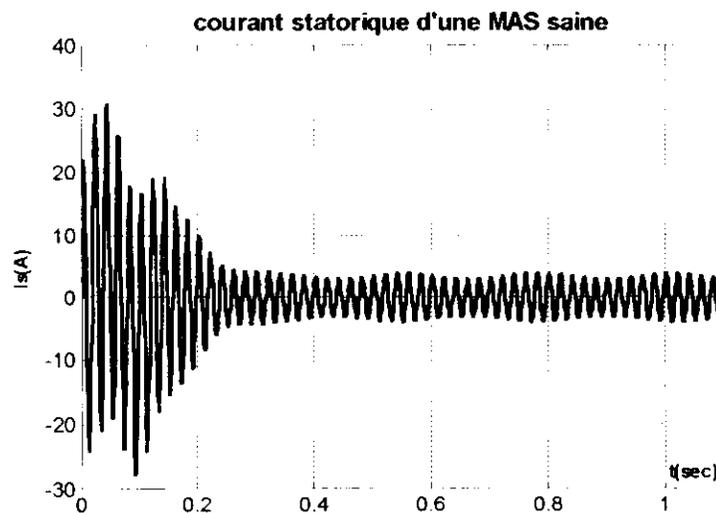


Figure.15: Courant statorique d'une machine asynchrone saine à charge de 4 N.m.

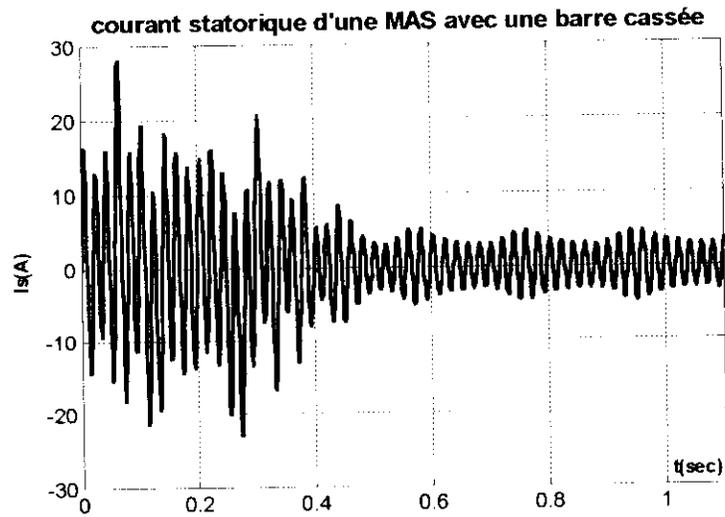


Figure.16 : Courant statorique d'une MAS avec 1 barre cassée.

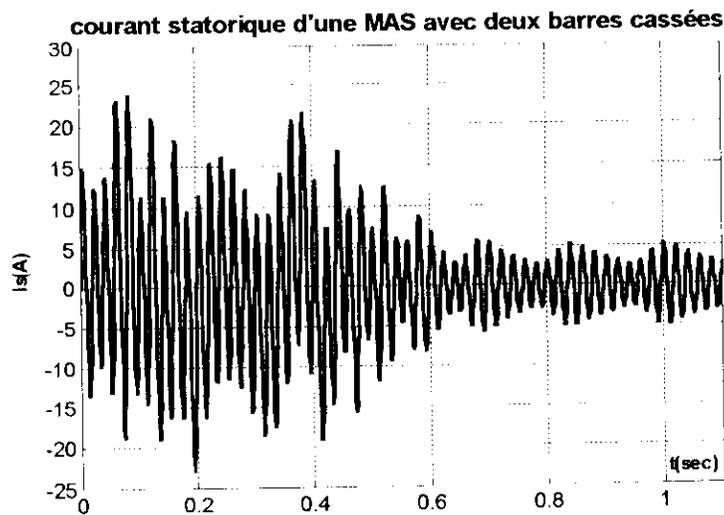


Figure.17: Courant statorique d'une MAS avec 2 barres cassées.

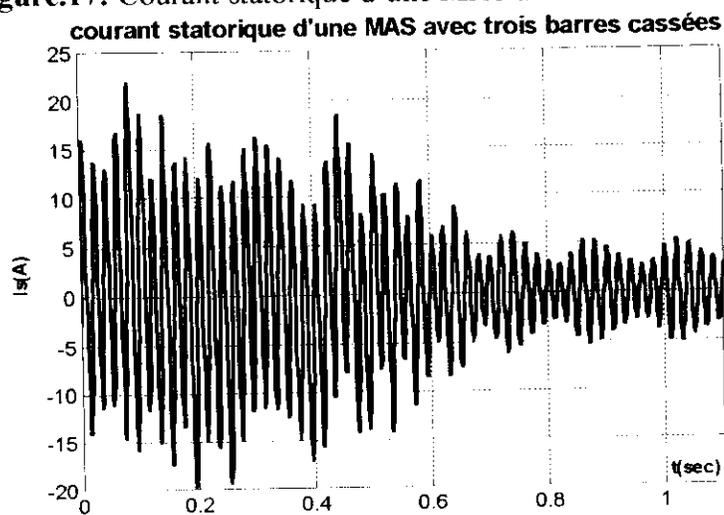


Figure.18 : Courant statorique d'une MAS avec 3 barres cassées .

L'analyse spectrale du courant montre une apparition de raies aux fréquences $(1 \pm 2s)f$ autour du fondamental qui apparaît à $f=50$ Hz, *figure(19)*.

Lors de la rupture d'une barre nous constatons l'apparition d'une raie à 44 Hz d'une amplitude de 0.14 (A), dans le cas de rupture de deux barres il y a apparition de deux raies symétriques par rapport au fondamental, l'une à 44 Hz et l'autre à 56 Hz, d'amplitude 0.2 (A) et 0.07 (A) respectivement; la rupture d'une troisième barre fait décaler les deux raies à 43 Hz et à 57 Hz, à cause d'une légère augmentation du glissement, et fait augmenter leurs amplitudes.

Pour retrouver les spectres montrés dans *figure-17- a,b,c et d*, et dans le but d'extraire les informations relatives aux défauts rotoriques, nous avons éliminé l'effet des fréquences qui existent dans le régime transitoire (démarrage) en supprimant cette partie, et nous avons pris l'amplitude des spectres en unité de courant au lieu de travailler en dB afin d'obtenir les raies les plus significatives.

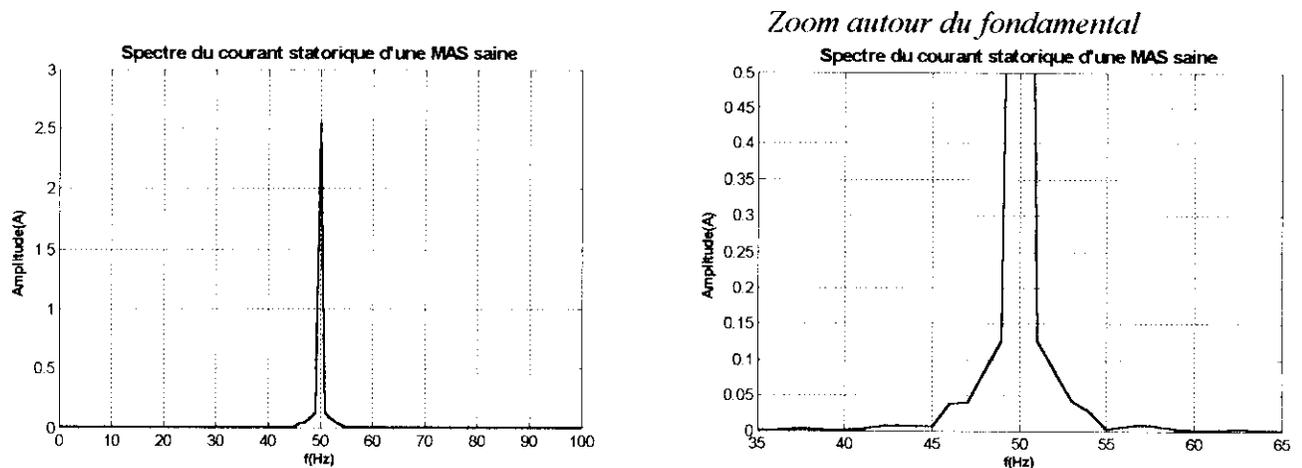


Figure.19. a : Spectre du courant statorique pour une machine saine .

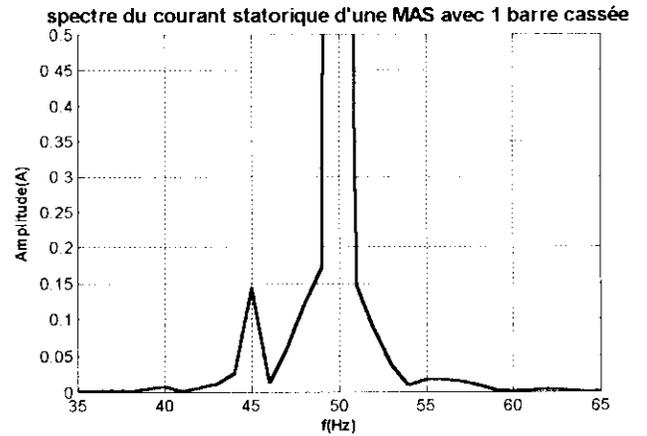
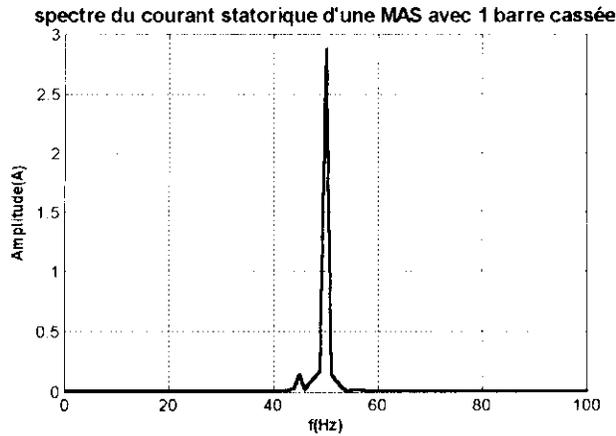


Figure.19. b : Spectre du courant statorique pour une machine avec 1 barre cassée

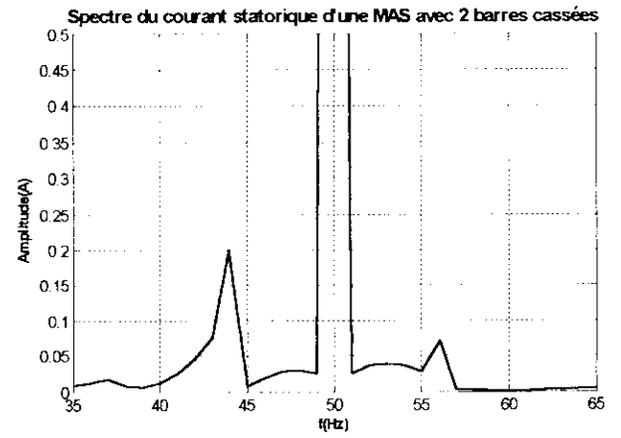
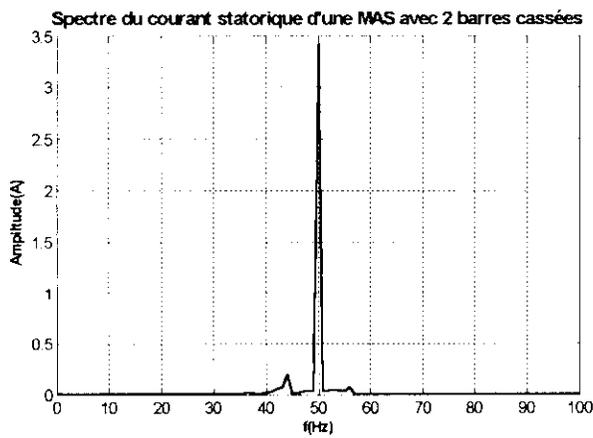


Figure.19. c : Spectre du courant statorique pour une machine avec 2 barres cassées.

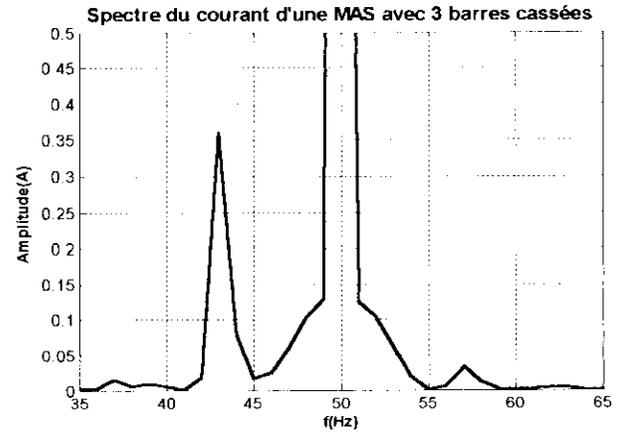
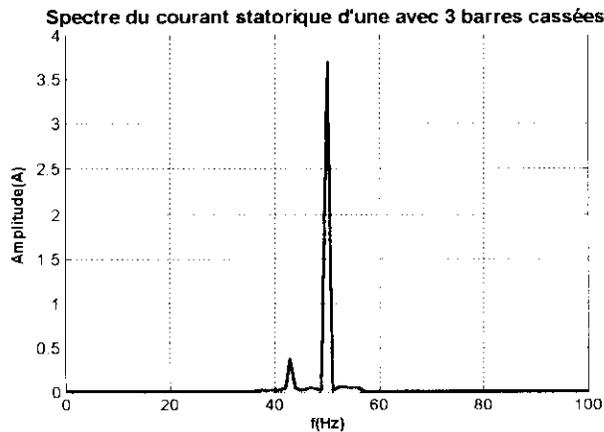


Figure.19. d : Spectre du courant statorique pour une machine avec 3 barres cassées.

Figure.19: Spectre du courant statorique.

Dans la référence[34] l'auteur a donné les spectres issus de la simulation et de l'expérimentation d'une machine asynchrone avec un rotor ayant deux barres cassées, voir *figure (20)* , il montre les raies relatives au défaut au voisinage du fondamental .

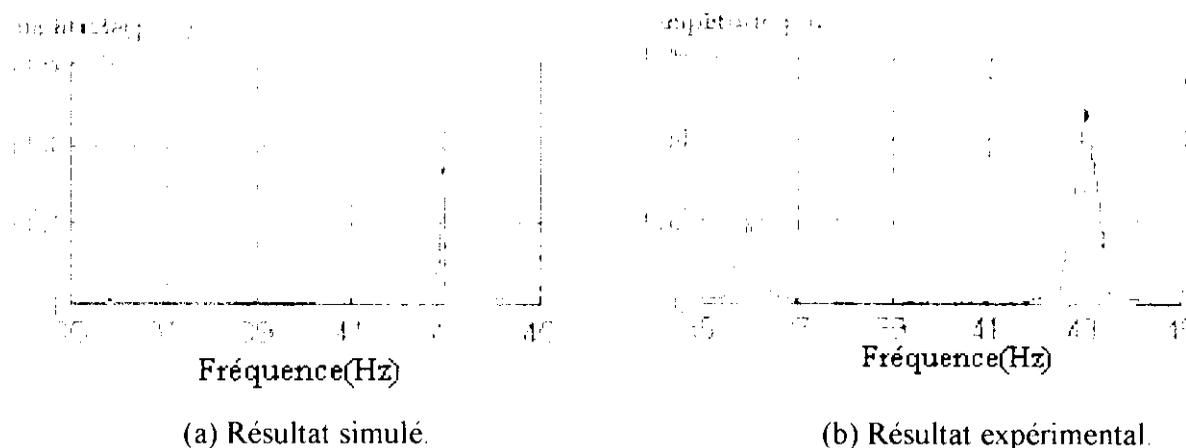


Figure.20: spectre du courant d'une machine asynchrone avec deux barres cassées.

Thomson[28] présente un cas réel d'une machine asynchrone triphasée à rotor à cage, *figure(2)*, d'une puissance de 328 kW (70.7 A) utilisée dans un broyeur de charbon. l'analyse spectrale du courant qui oscillait entre 40 A et 70 A, a révélé l'existence d'un grand nombre de barres cassées, la *figure (21)* montre deux raies de très grande amplitude, autour du fondamental au fréquences $(1 \pm 2s)f$, montrant la gravité du défaut.

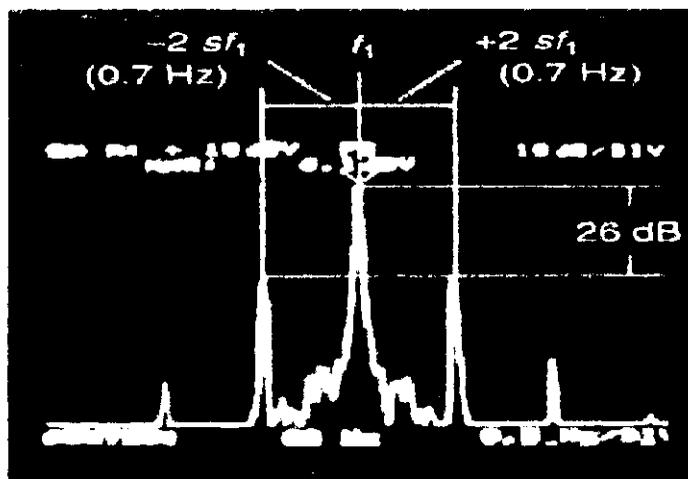


Figure.21 : FFT du courant statorique d' un machine asynchrone avec 20 barres cassées.

III.4.1.2. Analyse du couple

Le couple électromagnétique est aussi affecté par la rupture des barres rotoriques, les figures 23, 24 et 25 montrent que les oscillations en régime permanent sont très visibles, comme dans le cas des courants statoriques, l'amplitude de ces oscillations augmentent avec le nombre de barres cassées.

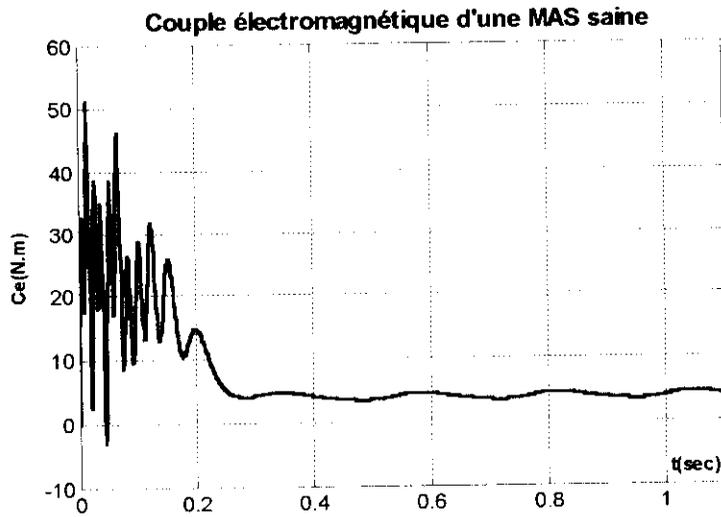


Figure.22 : Couple électromagnétique d'une MAS saine.

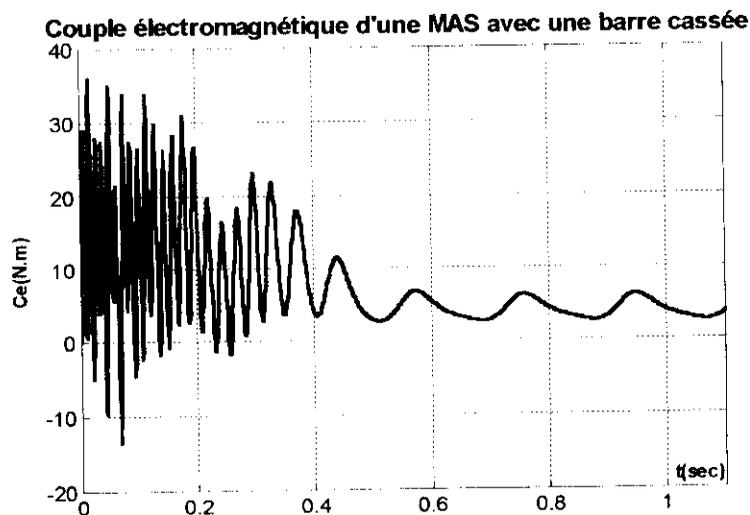


Figure.23 : Couple électromagnétique d'une MAS avec une barre cassée.

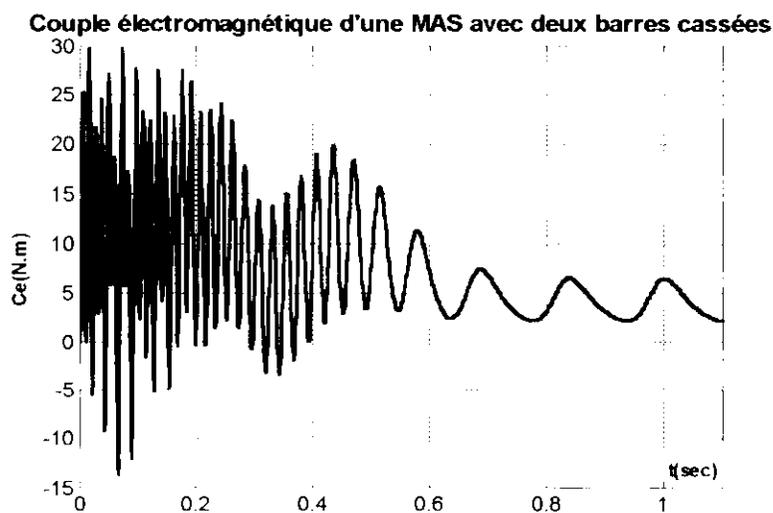


Figure.24 : Couple électromagnétique d'une MAS avec 2 barres cassées.

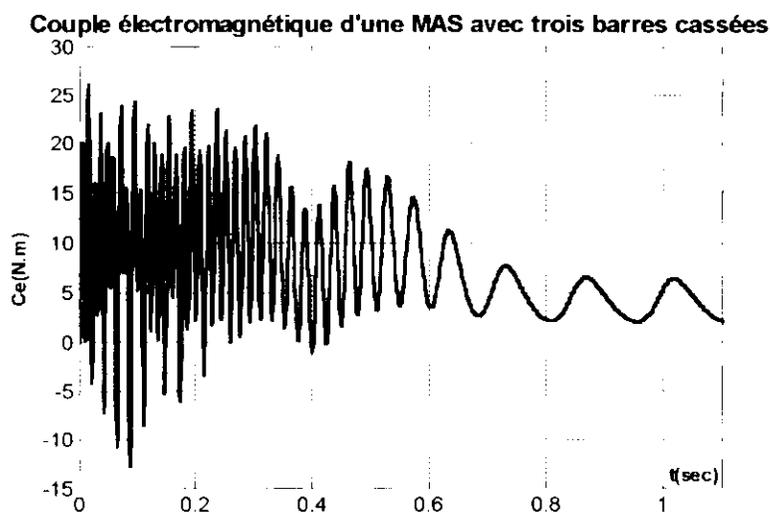
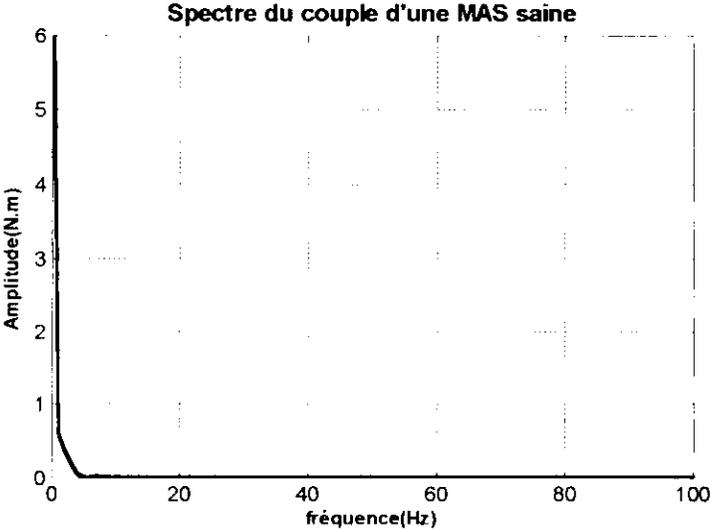


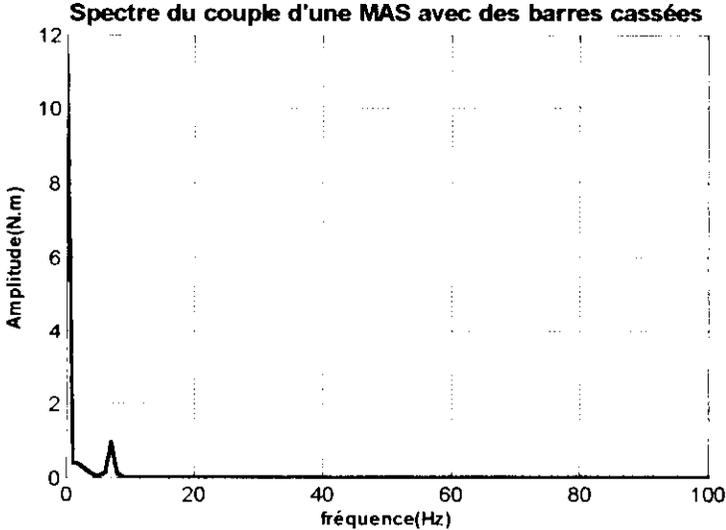
Figure.25: Couple électromagnétique d'une MAS avec 3 barres cassées.

L'analyse spectrale du couple montre que la cassure des barre(s) fait apparaître une raie à faible fréquence égale à $2sf_s$ [35], [2].

Dans notre application, le glissement est de 0.06 (6 %), ce qui correspond à une raie à $2sf_s = 6$ Hz, qui apparaît clairement dans la *figure(26. b)*.



(a) : Machine saine.



(b) : Machine avec 3 barres cassées.

Figure.26: Spectre du couple pour une MAS

III.4.1.3. Analyse de la vitesse

Puisque la vitesse est liée directement au couple électromagnétique par l'équation mécanique, il est évident qu'elle subit les variations dues à l'asymétrie du rotor.

Nous observons sur les courbes de vitesse que la cassure de barres provoque des oscillations considérables dans la vitesse, *figure(27)*.

De plus, on constate que la constante de temps mécanique augmente avec le nombre de barres cassées. Pour une barre cassée, la constante de temps est égale à 0.5s, celle de deux barres cassées est de 0.7s, et pour trois barres cassées elle est de 0.8s, alors que pour une machine sans défaut la constante de temps mécanique est de l'ordre de 0.25s.

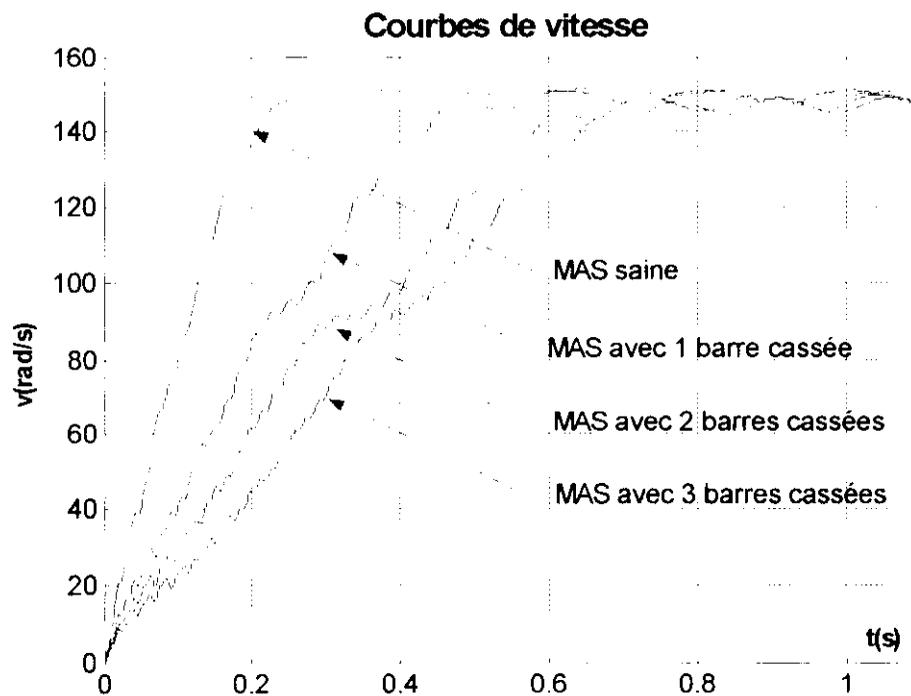


Figure.27 : Courbes de vitesse.

III.4.1.4. Analyse des courants de barres

La modification du circuit représentant le rotor implique un changement direct des courants qui circulent dans ce circuit, ce qui rend leur observation intéressante. En observant les courants de barres issus de la simulation, on voit clairement que les amplitudes des courants des barres adjacentes aux barres cassées augmentent considérablement et atteignent le double, voire plus, du courant dans les autres barres, ce qui est en accord avec les résultats donnés dans les références [36], [4].

On remarque aussi que l'allure des courants de barres, qui était sinusoidale dans le cas d'une machine à rotor sans défaut, se déforment lors de la cassure de barres, voir *figure (29)*.

La *figure (28)* montre l'allure du courant dans une des barres d'un rotor sain ; et dans la *figure (29)* on représente les courants dans les barres adjacentes et dans une des barres non adjacentes pour le cas d'une, deux et trois barres cassées.

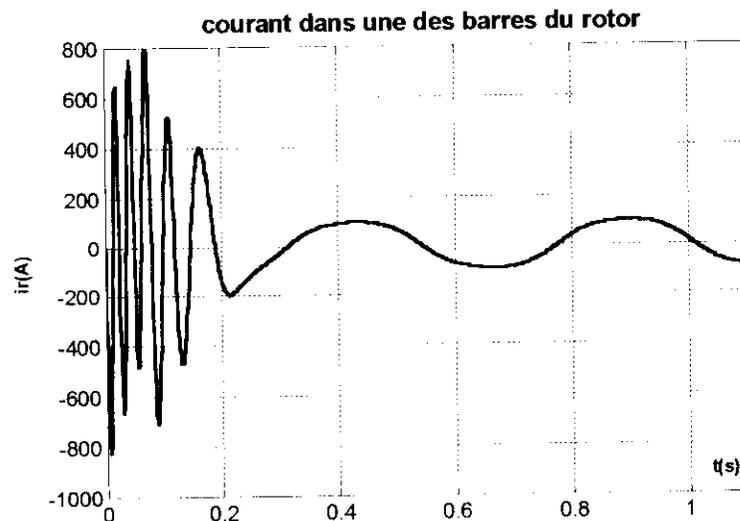


Figure.28: Courant dans une des barres du rotor sain.

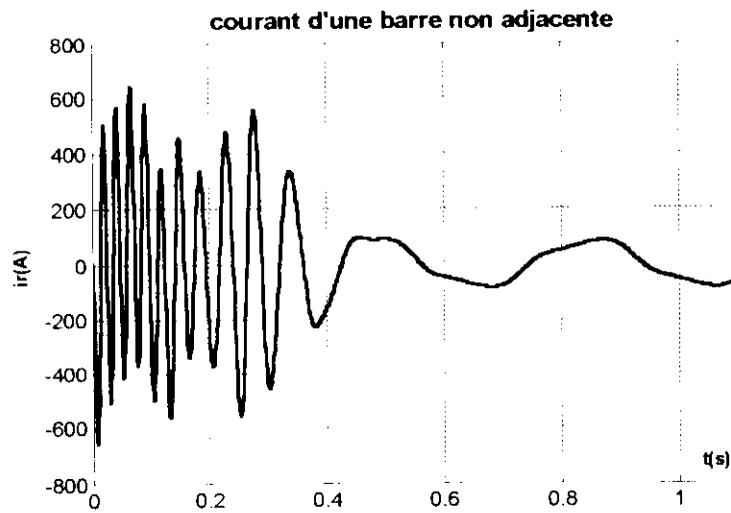


Figure.29.1.a : Courant dans une des barres du rotor avec une barre cassée

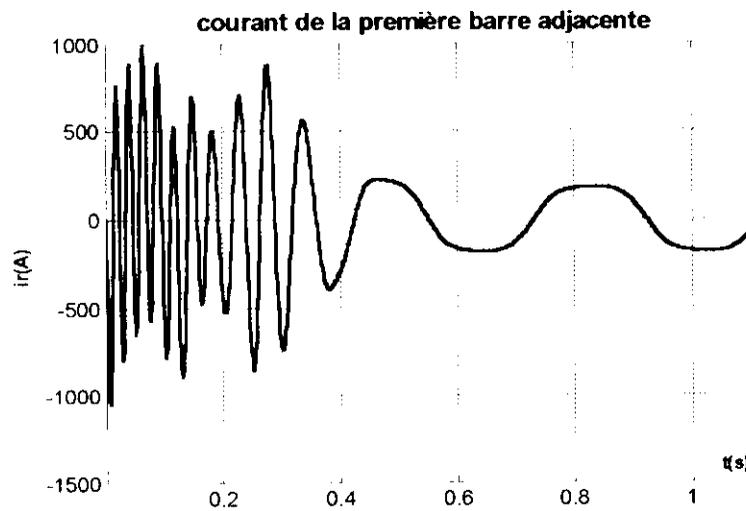


Figure.29.1.b : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec une barre cassée.

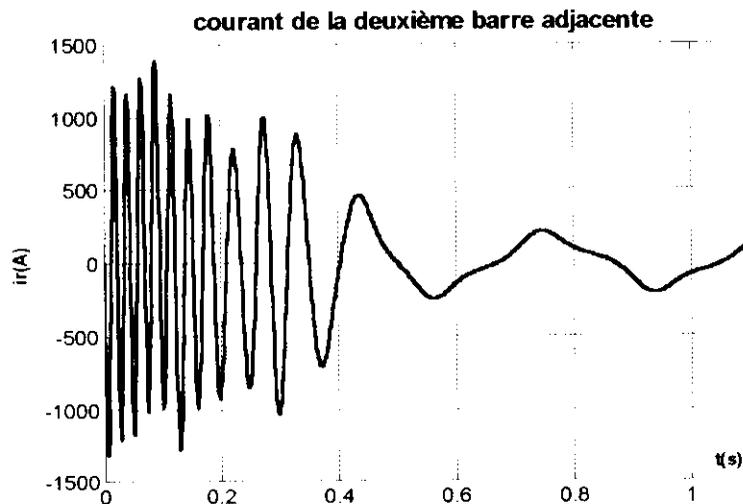


Figure.29.1.c : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec une barre cassée.

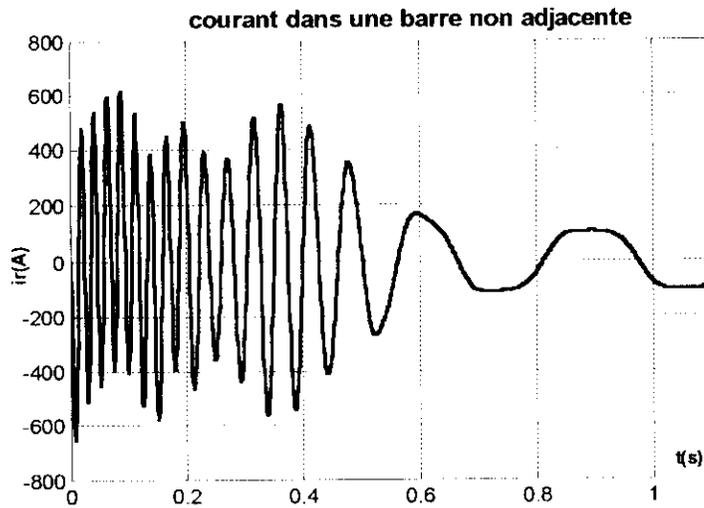


Figure.29.2.a : Courant dans une des barres du rotor avec deux barres cassées

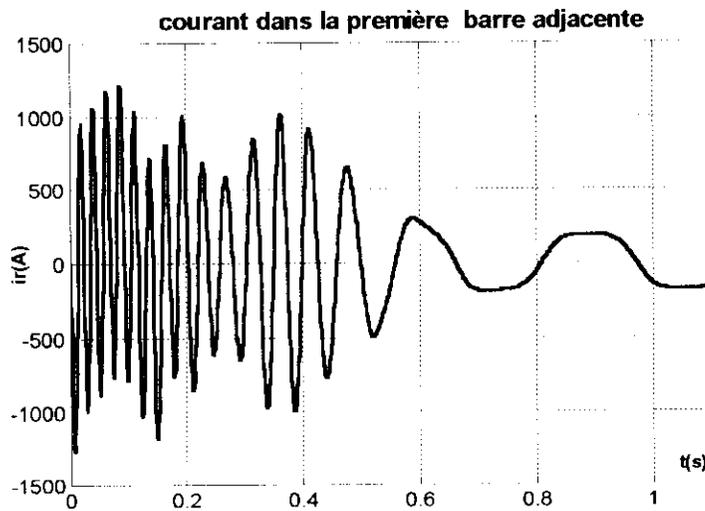


Figure.29.2.b : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec deux barres cassées.

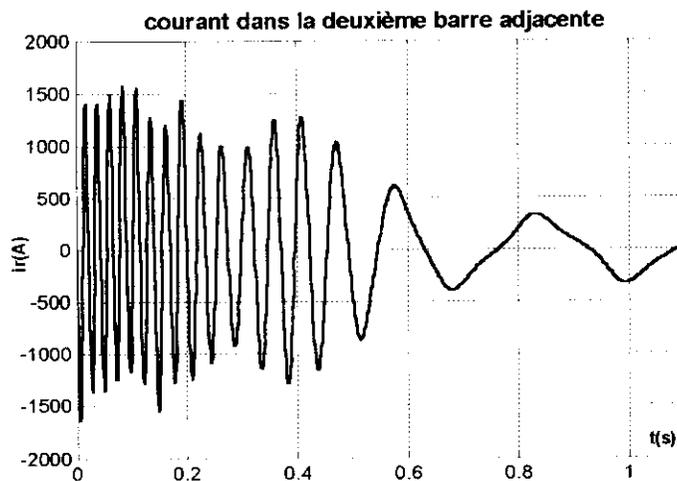


Figure.29.2.c : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec deux barres cassées.

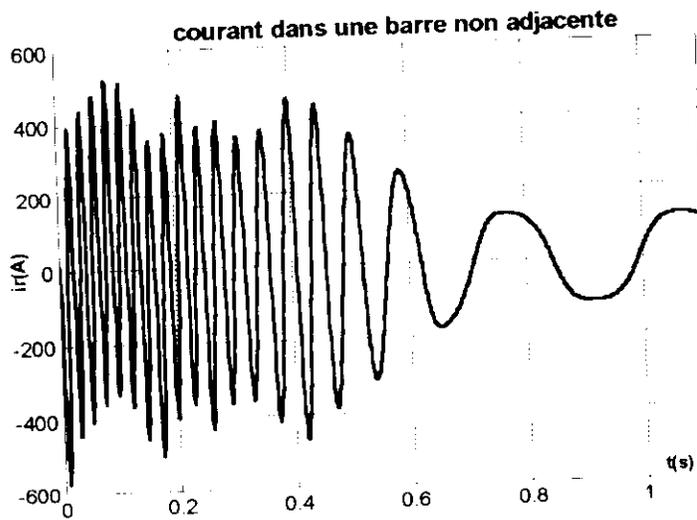


Figure.29.3.a : Courant dans une des barres du rotor avec trois barres cassées.

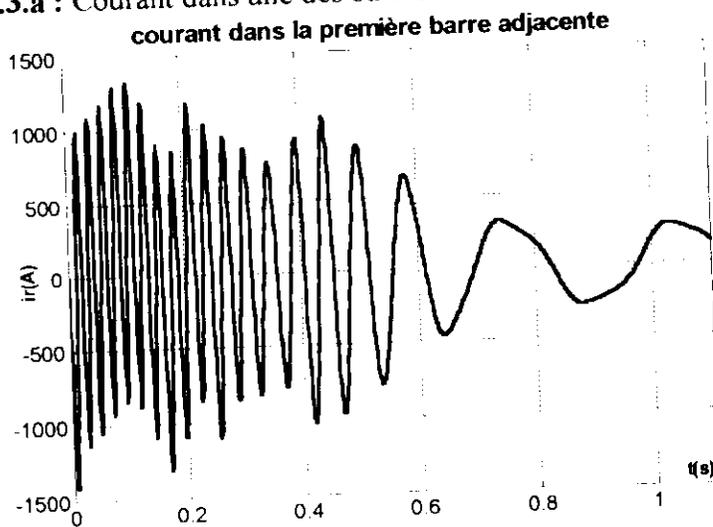


Figure.29.3.b : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec trois barres cassées.

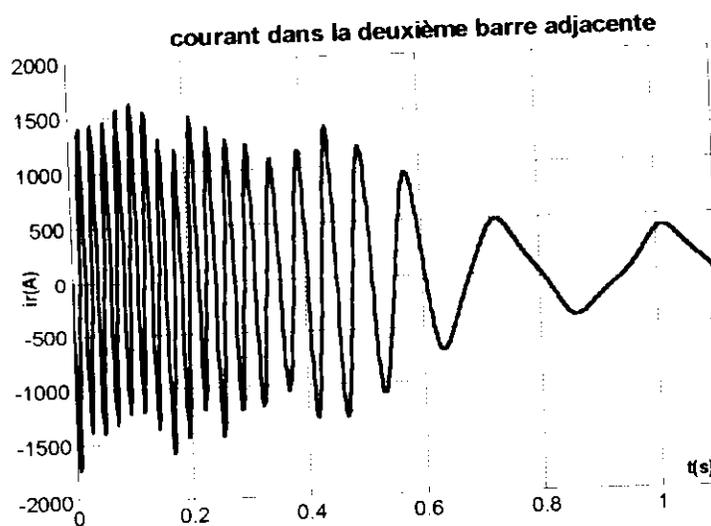


Figure.29.3.c : Courant dans une des barres adjacentes du rotor avec trois barres cassées.

III.4.2. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

III.4.2.1. Analyse du courant statorique

D'après les résultats obtenus on constate une certaine ressemblance des effets des défaut rotoriques (rupture de barreaux ou de portions de l'anneau de court-circuit).

A la figure(30), on remarque l'apparition d'ondulation au niveau de l'enveloppe du courant statorique au régime permanent, et une déformation du courant de démarrage par rapport à celui de la machine saine.

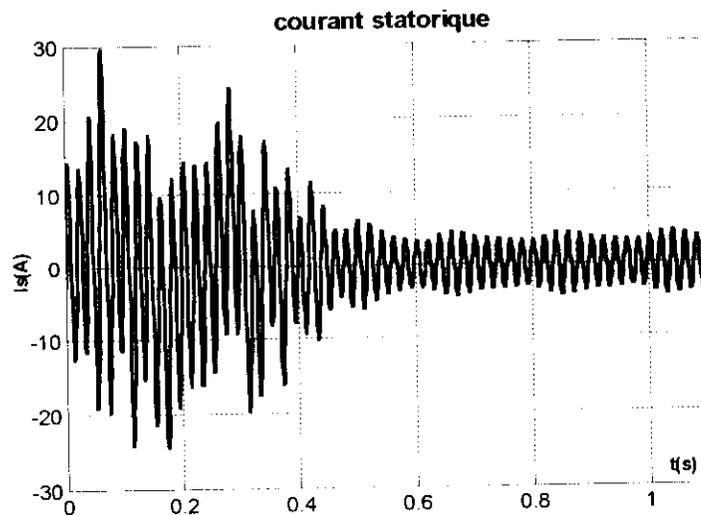


Figure.30 : Courant statorique d'une MAS avec une portion d'anneau cassée

Comme dans le cas de rupture de barres, l'analyse spectrale révèle la raie relative au défaut, cette raie apparaît à la fréquence 44.5 Hz, et elle a une amplitude égale à 0.05 (A), comme le montre la *figure (31)*.

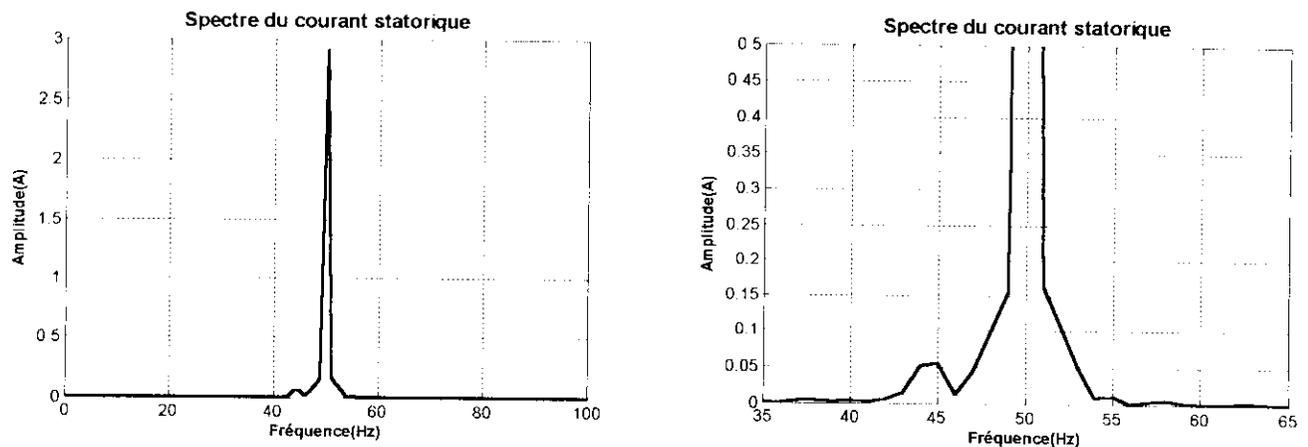


Figure.31 : Spectre du courant statorique

III.4.2.2. Analyse du couple

L'allure de la courbe du couple électromagnétique est proche de celle retrouvée pour un rotor avec une barre cassée, ses amplitudes d'oscillation au régime permanent sont presque identiques.

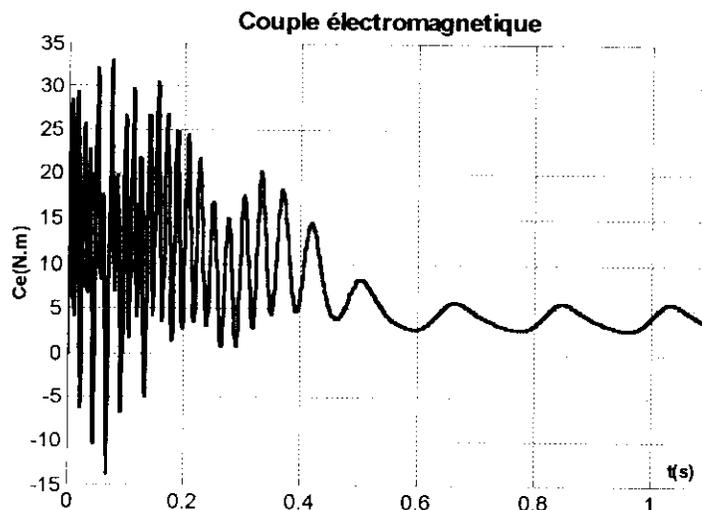
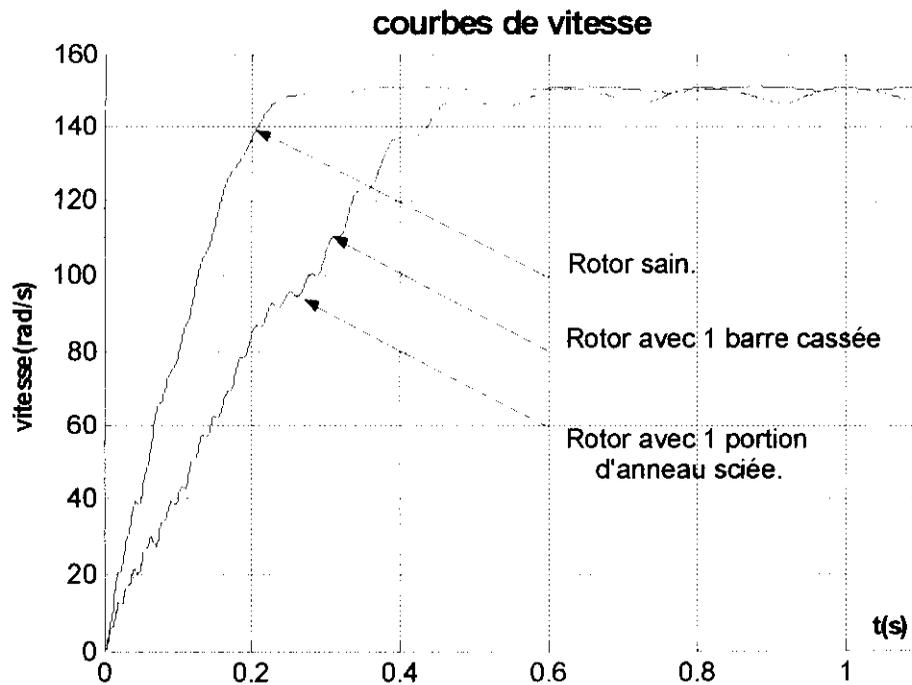


Figure.32: Couple électromagnétique.

III.4.2.3. Analyse de la vitesse

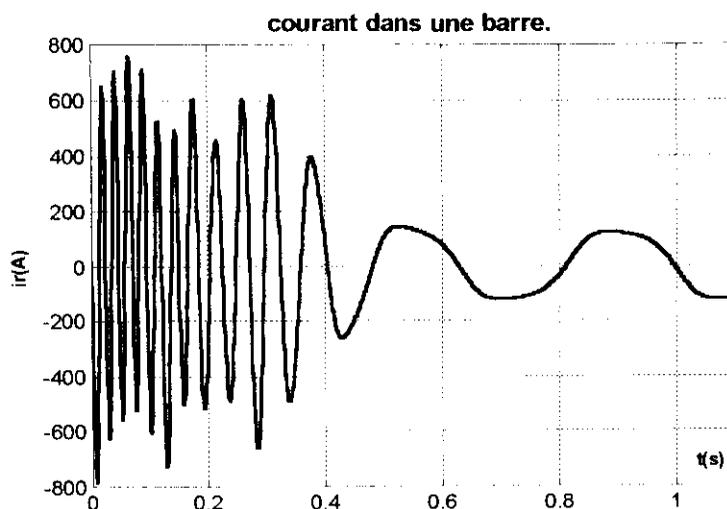
On remarque bien dans la *figure(33)*, que les deux courbes de vitesse relatives à une portion d'anneau sciée et à une barre cassée sont voisines et ont des constantes de temps relativement proches.



III.4.2.4. Analyse des courants de barres

Les augmentations d'amplitude des courants de barres liées à la portion cassée sont aussi sévère que ceux observées dans le cas des barres cassées .

Les figures suivantes montrent les courants dans les deux barres en liaison directe avec la portion cassée, et le courant dans une autre barre plus loin .



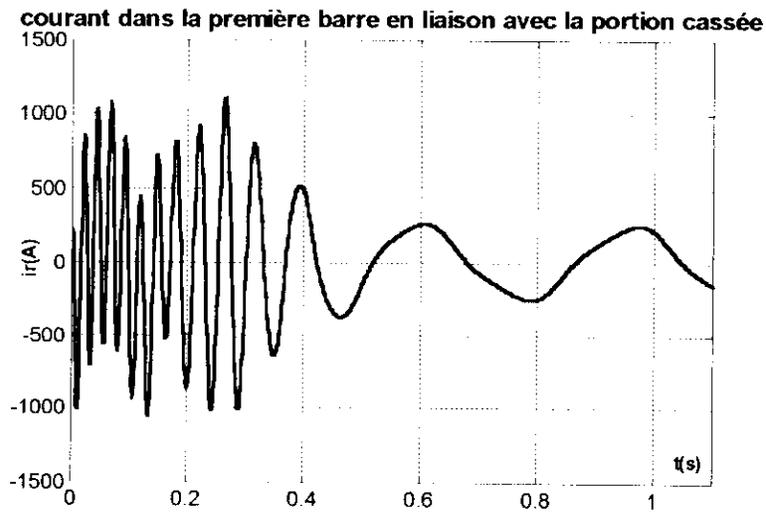


Figure.35: Courant dans une barre liée à la portion d’anneau cassée .

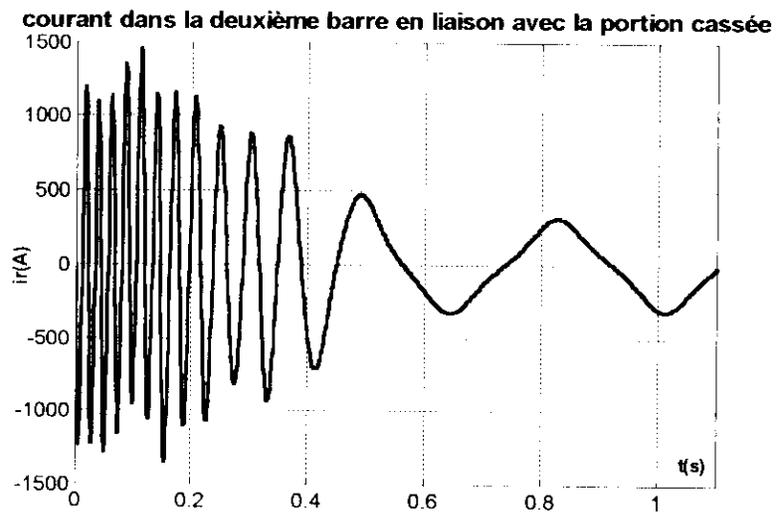


Figure.36: Courant dans une barre liée à la portion d’anneau cassée .

III.5.Conclusion

Les spectres des courants statoriques nous indiquent très clairement que le défaut provoqué sur le rotor est plus grave à chaque fois qu'il y a cassure de barres, car l'amplitude des raies relatives aux défauts augmente. C'est ce critère qui nous permettra d'évaluer l'importance du défaut de la cage rotorique, en effet, ce sera l'amplitude de la raie à gauche du fondamental qui nous donnera des informations relatives au défaut rotorique. Si la raie présente à gauche du fondamental se manifeste, cela signifiera qu'un défaut est apparu au niveau du rotor. De plus si cette raie augmente en amplitude, cela traduira un accroissement du défaut rotorique.

Conclusion générale

Nous venons de présenter, dans ce mémoire, une étude de quelques défauts rotoriques et leur détection dans une machine asynchrone à cage d'écureuil, pour cela nous avons développé un modèle de la machine qui permet d'introduire le défaut au niveau du rotor et d'étudier le phénomène répercuté sur le courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

Dans ce modèle, le rotor est représenté comme étant constitué d'autant de phases que de barreaux, ce qui conduit à considérer les courants circulant dans les portions d'anneau de court-circuit comme des courants de phases rotoriques.

Le calcul des inductances propres et mutuelles des mailles rotoriques est effectué en utilisant la théorie de la fonction d'enroulement « WFT », ces inductances sont recalculées pour chaque représentation du rotor relative au défaut introduit.

Les modèles nous ont permis de connaître non seulement le courant statorique, le couple et la vitesse mais aussi les courants dans les barres du rotor.

Grâce à l'analyse spectrale du courant statorique, nous avons pu observer les raies présentes autour du fondamental dont les fréquences correspondent à la relation mathématique $(1 \pm 2s)f$.

La défaillance rotorique cause une oscillation de l'enveloppe du courant statorique qui induit des ondulations du couple électromagnétique qui elles même provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine engendrant des vibrations mécaniques, ces dernières peuvent engendrer d'autres défauts tels que les défaut dans les roulements, l'excentricité, la courbure de l'axe du rotor, etc.

Les courants dans les barres du rotor sont les premiers à être affectés par le défaut, les courants dans les barres adjacentes aux barres cassées atteignent des valeurs très importantes et peuvent dépasser le double du courant dans les autres barres, ce qui cause un échauffement

excessif et engendre la cassure de ces barres.

Les résultats ont montré que la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit et la cassure d'une barre ont presque les mêmes effets sur le courant statorique, le couple et la vitesse.

Annexe-1-

Nombre de barres cassées	Inductances				Résistance équivalente du rotor
	Inductance propre d'une phase du stator L_{ss} (H)	Inductance magnétisante L_{ms} (H)	Inductance propre d'une maille du rotor. L_{0j} (μ H) *	Inductance mutuelle entre deux mailles du rotor. L_{rij} (μ H) *	R_r ($\mu\Omega$)
0	0.55	0.54	4.3	0.100	3.990
1	0.55	0.54	7.8	0.230	4.119
2	0.55	0.54	11	0.356	4.256
3	0.55	0.54	14	0.474	4.403
4	0.55	0.54	16.9	0.593	4.560
5	0.55	0.54	19.4	0.712	4.729
6	0.55	0.54	21.7	0.832	4.911
7	0.55	0.54	23.8	0.950	5.107
8	0.55	0.54	25.7	1.070	5.320
9	0.55	0.54	27.3	1.187	5.551
10	0.55	0.54	28.6	1.301	5.803

Tableau.1 : Valeurs des inductances et de la résistance du rotor.

(*) La maille j est la maille concernée par la cassure

Annexe-2-

Paramètres de la machine :

$P_a = 4 \text{ kW}$.

$U = 220/380 \text{ V}$.

$f = 50 \text{ Hz}$.

Longueur de l'entrefer $l = 11 \text{ cm}$.

L'entrefer $g = 0.5 \text{ mm}$.

Nombres de spires par phase $N_s = 190$ spires.

Résistance d'une phase du stator $r_s = 1.5 \Omega$.

Résistance de la barre du rotor $R_b = 62 \mu\Omega$.

Résistance d'une portion d'anneau de court-circuit $R_c = 5 \mu\Omega$.

Inductance de la barre du rotor $L_b = 0.28 \mu\text{H}$.

Résistance d'une portion d'anneau de court-circuit $L_c = 30 \text{ nH}$.

Nombre de barres au rotor = 32 barres.

Rayon moyen de l'entrefer $r = 7 \text{ cm}$.

Inductance magnétisante $L_{ms} = 0.548 \text{ H}$.

Inductance de fuite au stator $L_{ls} = 7 \text{ mH}$.

Le moment d'inertie $J = 0.025 \text{ kg.m}^2$.

Références bibliographiques

- [1] H.Toliat, 'Condition monitoring and faults diagnosis of electrical machines-a review', in conf.Rec-1999 IEEE-IAS annuaire.meeting, vol.1, phoenix, AZ, pp.197-204.
- [2] S.Nandi, R.Haradwaj, H.Toliat, A.Parlos,'Simulation of three phase induction motor with incipient rotor cage faults', SDEMPED'99, pp.389-392,Gijon, Spain, september.1999.
- [3] G.B.Kliman, A.Bellini, F.Filppetti,'Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis' ,IEEE Transactions on industry applications, vol.37, No.5, pp.1248-1255, Sebtember/October 2001.
- [4] J.Milimonfared, H.Kelks, S.Nandi, A.Mminssians, H.Toliat,'A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors', IEEE Transaction on industry applications, vol.35, No.5, pp.1000-1006, Sebtember/October 1999.
- [5] B.Yazici, B.Kliman,'An adaptative statistical time-frequency method for a detection of broken bars and bearing faults in motor using stator curent', IEEE Transaction on industry applications, vol.35, No.2, pp.442-452, March/April 1999.
- [6] M.S.Nait Said, M.Benbouzid, A.Benchaib, 'Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation',IEEE Transaction on energy conversion, vol.15, No.1, pp.66-70, March 2000.
- [7] M.Haji, H.Toliat,'Pattern recognition-a technique for induction machines rotor broken bar detection', IEEE Transaction on energy conversion, vol.16, No.4, pp.312-317, december 2001.
- [8] C.Kral,S.Wieser,F.Pirker, M.Schngginger,'Sequences of faulty rotor bars in induction machines-the vienna monitoring method', IEEE Transactions on industrial electronics, vol.47, No.5, pp.1042-1050, October2000.
- [9] S.Moreau, J.C.Trigeassou, G.Champenois, J.P.Caubert,'Diagnosis of induction machines:

a procedure for electrical fault detection and localization', SDEMPED'99, pp.225-229, Gijon, Spain, september.1999.

[10] J.Richalet, A.Rault, R.Pouliquen, 'Identification des processus par la méthode du modèle', Godon et Breach 1971.

[11] J.Richalet, 'Pratique de l'identification', Hermès, Paris, 1991.

[12] G.Salles, 'Surveillance et diagnostique des défauts de la charge d'un entraînement par machine asynchrone', thèse de doctorat université de Lyon 1997.

[13] W.T.Thomson, N.D.Deans, R.A.Leonard, A.J.Milne, 'Condition monitoring of induction motors for availability assesement in offshore installations', Robert Gordon institue of technology, Aberdeen scotland, UK.

[14] F.Filippetti, G.Franceschini, C.Tassoni, ' Neural network-fuzzy logic synthesis in diagnostic systems for electric machines', IEEE Transaction on industry applications, vol.31, No.4, pp 892-897, July/august 1995.

[15] T.J.Sobczyk, K.Weinreb, T.Wegiel, M.Sulowicz, 'Theoretical study of effects due to rotor eccentricities in induction motors', SDEMPED'99, pp.289-295, Gijon, Spain, september.1999.

[16] L.Golebiowski, D.Mazur, '2D and 3D analysis of damages of three-phase induction motor including time and space harmonic effects', SDEMPED'99, pp.487-494, Gijon, Spain, september.1999.

[17] C.Kral, F.Pirker, 'Rotor eccentricity detection of induction machines by means of torque estimation', SDEMPED'99, pp.283-287, Gijon, Spain, september.1999.

[18] N.A.Demerdach, J.F.Bamgura, 'Effects of broken bars/end-ring connectors and airgap eccentricities on ohmic and core losses of induction motors in ASD's using acoupled finite element-state space method', IEEE Transaction on energy conversion, vol.15, No.1, pp.40-47, march 2000.

- [19] N.A.Demerdach, J.F.Bamgura, 'Comparaison between characterization and diagnosis of broken bars/end-ring connectors and airgap eccentricities on ohmic and core losses of induction motors in ASD's using acoupled finite element-state space method', IEEE Transaction on energy conversion, vol.15, No.1, pp.48-66, march 2000.
- [20] N.A.Demerdach, J.F.Bamgura, R.J.Povinelli, R.H.Brown, 'Diagnosis of eccentricities and Bar/end-ring connector breakages in polyphase induction motors through a combination of time-series data mining and time-stepping coupled FE-state space techniques', IEEE Transaction on energy conversion, vol.17, No.5, pp.284-291, march 2001.
- [21] D.Kerignard, 'Contribution a la modélisation et à l'identification des paramètres électriques de la machine asynchrone en régime dynamique', thèse de doctorat, université de Potier, 1997.
- [22] M.Viera, C.Theys, 'Stator impedance unbalance detection via sequential abrupt changes detection technique', SDEMPED'99, pp.283-287, Gijon, Spain, september.1999.
- [23] E.Schaeffer, E.L.Carpentier, M.E.Zaim, 'Failure detection in induction machine by means of parametric identification',CESA'98; IEEE conference on computational engineering in systems application, Nabeul-Hammamet, Tunisie, 1-4 April 1998.
- [24] A.Contin, G.C.Montanari, M.Cacciari, 'Diagnosis of stator windings of AC machines using partial decharge technique' SDEMPED'99, pp.283-287, Gijon, Spain, september.1999.
- [25] R.R.Schoen, T.G.Habetler, F.Kamran, R.G.Bartheld, 'Motor bearing damage detection using stator current monitoring', IEEE Tansactions on industry applications, vol.31, No.6, pp.1274-1279, november/december 1995.
- [26] R.L.Schiltz, 'Forcing frequency identification of rolling element bearing', int.j.Sound Vibration, pp.16-19, May 1990.
- [27] M.E.H.Benbouzid, M.Vieira, C.Theys, 'Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing technique', IEEE Transaction on

power electronics, vol.14, No.1, January 1999.

[28] W.Thomson 'Current signature analysis to detect induction motor faults', IEEE Industry Applications Magazine, pp.26-35, July/August 2001.

[29] T.A.Lipo, A.Munoz-Garcia ' Complex vector model of the squirrel cage induction machine including instantaneous rotor bar currents', IEEE Transaction on industry applications, vol.35 , no.6, pp.1332-1340, november / december 1999.

[30] O. Touhami ' Cours non édité de construction de machines électriques', ENP, 2004.

[31] Y. Liao, H. Toliyat, A. Lipo, 'Multiple coupled circuit modeling of induction machines' IEEE Transactions on industry applications, vol.31, no2, pp.311-318, march / april.1995.

[31] H.A.Toliyat, T.A. Lipo,' Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults ', IEEE Transactions on energy conversion, vol.10, no.2, pp.241-247, June 1995.

[33] R. Ibtouen,' Construction de machine asynchrone à rotor à encoches profondes', projet de fin d'études, ENP, Juin 1980 .

[34] Z. Cai, A.Gao, J. Jiang, ' Modeling for interior faults of induction motors and its simulation on EMTDC ', Internationale conference on power systems transient-IPST 2003 New Orleans, USA, pp.1-5, 2003.

[35] W. T. Thomson, ' A review of on-line condition monitoring techniques for three phase squirrel cage induction machine- Past Present and Future', SDEMPED'99, pp.3-18, Gijon, Spain, september.1999.

[36] C.C. Cunha, F.B. Soares, P.S. Oliveira, ' A new method to simulate induction machines with rotor asymmetries ' IEEE Transaction on energy conversion, vol. 6, No.4, pp.298-303, april 2002.

[37] M.E.H.Benbouzid, ' Bibliography on induction motors faults detection in diagnosis', IEEE Transaction on energy conversion, vol.14, No.4, pp.1065-1074, December 1999.