

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريش

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : - KELLOU Ayoub

- BENAKMOUM Fethenour

Sujet

Utilisation de la technique TOD pour la détection du défaut d'excentricité dans la machine asynchrone

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2023 , devant le jury composé de :

Dr AISSA Oualid	MCA	Univ-BBA	Président
Mr KHATIR Abdelfatah	MAA	Univ-BBA	Examineur
Dr TALHAOUI Hicham	MCA	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tout nous remercions الله qui nous 'a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce travail.

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Dr. TALHAOUI Hicham** qui a sacrifié un grand effort afin de nous permettre de mener à bien le présent travail et à qui
Nous exprimons notre gratitude et notre respect.*

Nous remercions aussi les membres de jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.

Nos remerciements aux enseignants du département d'électromécanique

Enfin, Nous exprimons nos remerciements à nos familles et nos amis.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail :

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien, leurs prières tout au long de mes
études*

Au mes très chers frères Aymen et Akram

Au ma très chère sœur Ranime

A toute ma famille

KELLOU Ayoub

Je dédie mon travail avant tout à mes chers Parents

A ma femme

A mes enfants, Anse Abed Rahman et Aridje

A mes frères et sœurs

Au Dr Hicham TALHAOUI

BENAKMOUM Fethenour

Sommaire

Introduction générale	01
<i>Chapitre I: Étude et simulation de la machine asynchrone à l'état sain</i>	
I.1 Introduction	03
I.2 Constitution de la machine asynchrone	03
I.2.1 Stator	04
I.2.2 Rotor	04
I.2.2.1 Cage d'écureuil	04
I.2.2.2 Arbre	05
I.2.3 Paliers	05
I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	05
I.4 Modèle multi-enroulements	06
I.4.1 Hypothèses simplificatrices	06
I.4.2 Équations de tensions au stator	07
I.4.3 Équations des tensions au rotor	08
I.4.4 Calcul des inductances	09
I.5 Modèle équivalent de la machine de taille réduit	10
I.6 Résultats de simulation	11
a) Démarrage à vide avec introduction du couple de charge	12
b) Variation de la charge (Cr)	14
I.7 Conclusion	16
<i>Chapitre II: Étude et simulation de la machine asynchrone avec défaut d'excentricité mixte</i>	
II.1 Introduction	18
II.2 Concepts et définitions	18
II.2.1 Maintenance	18
II.2.2 Défaut	18
II.2.3 Défaillance	18
II.2.4 Panne	19
II.2.5 Supervision	19
II.3 Divers types de défauts	19
II.3.1 Défauts de court-circuit	20
II.3.2 Cassures des barres et des portions d'anneaux	21
II.3.3 Défaut d'excentricité	22

II.3.4 Défaut de roulement	23
II.4 Étude de défauts d'excentricité mixte	25
II.4.1 Entrefer	25
II.5 Résultats de simulation	26
II.6 Conclusion	30

Chapitre III: Étude et application de la technique ondelette pour détecter un défaut d'excentricité

III.1 Introduction	32
III.2 Maintenance	32
III.2.1 But de la maintenance	32
III.2.2 Types de la maintenance	32
III.3 Quelques méthodes de diagnostic	33
III.3.1 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques	33
III.3.2 Méthodes avec modèle	34
III.3.3 Méthodes sans modèle	35
III.3.3.1 Approche signal	35
III.4 Quelques techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic	35
III.4.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)	35
III.4.2 Transformée en Ondelette (TO)	36
III.5 Résultats de simulation	37
III.5.1 Analyse par FFT	37
III.5.2 Analyse de défaut d'excentricité par l'ondelette	40
III.6 Conclusion	44
Conclusion générale	45
Références bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I : Étude et simulation de la machine asynchrone à l'état sain

Figure I.1 : Constitution de la machine asynchrone	03
Figure I.2 : Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite).	04
Figure I.3 : Rotor à cage d'écureuil.	05
Figure I.4 : Principe de fonctionnement de la machine asynchrone triphasée	06
Figure I.5 : Structure multi-enroulements du rotor	08
Figure I.6 : Courant statorique de la phase (a).	12
Figure I.7 : Couple électromagnétique.	13
Figure I.8 : Vitesse de rotation .	13
Figure I.9 : Courant Ids .	13
Figure I.10 : Courant Iqs .	14
Figure I.11 : Courant statorique de la phase (a).	14
Figure I.12 : Couple électromagnétique.	15
Figure I.13 : Vitesse de rotation.	15

Chapitre II : Étude et simulation de la machine asynchrone avec défaut d'excentricité mixte

Figure II.1 : Action de panne	19
Figure II.2 : Différents types de défauts d'enroulement statorique	20
Figure II.3 : Rupture d'une barre et d'une portion d'anneau de court-circuit	21
Figure II.4 : Types d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte	23
Figure II.5 : Dimensions du roulement à billes	24
Figure II.6 : Excentricité mixte	25
Figure II.7 : Couple électromagnétique	26
Figure II.8 : Vitesse de rotation	27
Figure II.9 : Courant statorique	27
Figure II.10 : Courant Iqs	27
Figure II.11 : Courant Ids	28
Figure II.12 : Couple électromagnétique	28
Figure II.13 : Vitesse de rotation	29
Figure II.14 : Courant statorique	29
Figure II.15 : Courant Iqs	29

Figure II.16 : Courant Ids	30
-----------------------------------	-----------

Chapitre III : Étude et application de la technique ondelette pour la détection d'un défaut d'excentricité

Figure III.1 : Déférents type de la maintenance	33
Figure III.2 : Principe de l'estimation d'état	34
Figure III.3 : Représentation temporelle vers fréquentielle	35
Figure III.4 : Représentation temporelle vers ondelette	36
Figure III.5 : Couple électromagnétique à l'état sain	37
Figure III.6 : Vitesse de rotation à l'état sain	37
Figure III.7 : Courant statorique à l'état sain	38
Figure III.8 : Couple électromagnétique en défaut	38
Figure III.9 : Vitesse de rotation en défaut	39
Figure III.10 : Analyse spectrale par FFT du courant statorique en défaut	39
Figure III.11 : Courant statorique (machine avec défaut d'excentricité mixte $a_1=0,1$ et $a_2=0.0542$)	42
Figure III.12 : Approximations et détails du courant statorique obtenus par L'ondelette db 44	42
Figure III.13 : Courant de démarrage statorique (a): moteur sain (b): moteur avec défaut	43
Figure III.14 : Approximations et détails du courant statorique obtenus par l'ondelette db44 (a): moteur sain (b): moteur avec défaut	44

Liste des Tableaux

Chapitre I : Étude et simulation de la machine asynchrone à l'état sain

Tableau I.1: Inductances de la machine asynchrone à cage **09**

Chapitre II : Étude et simulation de la machine asynchrone avec défaut d'excentricité mixte

Tableau II.1: Possibilité d'apparition de défaut sur le moteur à induction **20**

Chapitre III : Étude et application de la technique ondelette pour la détection d'un défaut d'excentricité

Tableau III.1 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Courant statorique) **40**

Tableau III.2 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Couple électromagnétique) **40**

Tableau III.3 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Vitesse de rotation) **40**

Tableau III.4 : Bande de fréquences associées aux détails et approximation **41**

Notations et symboles

MAS	Machine asynchrone
TOD	Transformée d'ondelette discrète
N_s	Nombre de spires statoriques par phase
N_r	Nombre de barres rotorique
k	Entier naturel
e_0	Epaisseur de l'entrefer [m]
f_s	Fréquence d'alimentation [Hz]
f_{bc}	Fréquence de la barre cassée [Hz]
f_{exc}	Fréquence d'excentricité [Hz]
f_{cc}	Fréquence de court-circuit [Hz]
f_{rot}	Fréquence de rotation du rotor [Hz]
μ_0	Perméabilité magnétique de l'air
l	Longueur du rotor
L_{sp}	Inductance principale d'une phase statorique [H]
L_{fs}	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_{sp}	Inductance cyclique statorique [H]
L_{rc}	Inductance cyclique rotorique [H]
I_e	Courant dans l'anneau de court- circuit [A]
I_{bk}	Courant de la barre k [A]
I_{rk}	Courant de maille rotorique k [A]
I_a, I_b, I_c	Courants des phases statorique [A]
V_{abc}	Tensions des phases statorique [V]
φ_{rk}	Flux magnétique crée par une maille rotorique k [Wb]
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques [H]

M_{rr}	Inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes[H]
M_{sr}	Inductances mutuelles entre phases statorique et maille rotorique[H]
θ_r	Position du rotor [rd]
$[L_s]$	Matrice des inductances du stator
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles
$[R_s]$	Matrice des résistances statoriques
$[\Phi_{abc}]$	Vecteur des flux du stator
$[V_{sabc}]$	Vecteur de tensions statoriques
$[i_{sabc}]$	Vecteur de courants statoriques
$[i_{rk}]$	Vecteur de courants dans les mailles rotoriques
a	Angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]
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_b	Résistance d'une barre rotorique [Ω]
d, q	Indices pour les composantes de park directe
C_e	Couple électromagnétique [N.m]
C_r	Couple de charge
J	Moment d'inertie [Kg.m ²]
F	Coefficient de frottement
P	Opérateur de Laplace
p	Nombre de paires de pôles
β	Angle de contact
θ	Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator
g	Glissement
x	Vecteur d'état
D_c	Diamètre du palier
D_b	Diamètre de la bille (Ball)

n_b	Nombre d'éléments roulants
a_1	Quantité d'excentricité statique
a_2	Quantité d'excentricité dynamique

Résumé

Le travail effectué dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine du diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage d'écuriel. L'utilisation de cette machine occupe une place très importante dans l'industrie. Le diagnostic des défauts de cette machine est donc très important pour plusieurs raisons, notamment l'amélioration de la qualité de la production, la continuité de la production et la réduction des coûts...etc. Dans ce travail, le défaut d'excentricité dans la machine asynchrone a été simulé et diagnostiqué en utilisant deux techniques d'analyse. La première technique s'appelle la transformée de Fourier rapide, cette analyse n'est utilisée qu'en régime permanent (ou signaux stationnaires). La seconde méthode, appelée l'analyse par la transformée en ondelette discrète, est utilisée dans un régime permanent et transitoire (stationnaire et non-stationnaire). Les résultats de simulation obtenus ont montré la possibilité de diagnostiquer le défaut à l'aide de ces deux méthodes proposées.

Mots clés : Diagnostic, Machine asynchrone, Traitement du signal, Fourier, Ondelettes.

Abstract:

The work carried out in this falls within the field of fault diagnosis in rotating machines, of the three-phase squirrel-cage asynchronous machine. The asynchronous machine plays an important role in industry. Fault diagnosis on this machine is therefore very important for a number of reasons, including improving production quality, ensuring production continuity and reducing costs...etc. In this work, the eccentricity fault in the asynchronous machine was simulated and diagnosed using two analysis techniques. The first technique is called the fast Fourier transform, this technique is only used in steady state (or stationary signals). The second method, called discrete wavelet transform, is used in a permanent and transient (stationary and non-stationary) regime. The simulation results obtained showed the possibility of diagnosing the fault using these two proposed methods.

Keywords: Diagnosis, Asynchronous machine, Signal processing, Fourier, Wavelets.

ملخص :

العمل المنفذ في هذه المذكرة يقع ضمن مجال تشخيص الأعطال في الآلات الغير متزامنة ذات قفص سنجاب ثلاثي الأطوار. يحتل استخدام الآلة غير المتزامنة مكانة مهمة للغاية في الصناعة. لذلك فإن تشخيص أعطال هذه الآلة مهم جداً لعدة أسباب ، منها تحسين جودة الإنتاج واستمرارية الإنتاج وخفض التكلفة ... إلخ. في هذا العمل ، تمت محاكاة وتشخيص خطأ الانحراف في الآلة غير المتزامنة باستخدام تقنيتي تحليل. تسمى التقنية الأولى تحويل فورييه السريع ، وتستخدم هذه التقنية فقط في حالة ثابتة (أو إشارات ثابتة). الطريقة الثانية ، والتي تسمى التحويل المويجي المنفصل ، تستخدم في حالة ثابتة وغير ثابتة (أو إشارات ثابتة وغير ثابتة). أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها إمكانية تشخيص الخطأ باستخدام هاتين الطريقتين المقترحتين..

الكلمات المفتاحية: التشخيص ، آلة غير متزامنة ، معالجة الإشارات ، فورييه ، المويجات.

Introduction

Générale

Introduction générale

La sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail et des équipements est l'une des priorités les plus importantes dans tous les secteurs industriels [1].

Dans l'industrie, les machines asynchrones sont largement utilisées car elles sont plus robustes et moins chères que les autres machines. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective. Cette machine peut être affectée par des défaillances électriques ou mécaniques dans le stator ou le rotor, ou les deux en même temps [2].

Dans ce mémoire, nous intéressons à la détection d'un défaut d'excentricité mixte dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et de diagnostic des défauts dépendent de la nature des signaux extraits de cette machine. La méthode de diagnostic proposée dans ce travail est basée sur l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier rapide (FFT) et de l'ondelette (TOD).

Dans ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la définition de la machine asynchrone et à quelques concepts de base liés à sa construction. Et aussi, le premier chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation à l'aide du modèle réduit de la machine à l'état sain.

❖ Le deuxième chapitre traite les divers défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone, ainsi que la simulation de la machine asynchrone avec un défaut d'excentricité mixte.

❖ Le troisième chapitre est consacré à l'application de la FFT et de l'analyse par ondelette afin de diagnostiquer le défaut d'excentricité mixte dans la machine.

Enfin le travail est terminé par une conclusion mentionnant les divers résultats obtenus et les perspectives futures pour l'amélioration de ce travail.

Chapitre I

Étude et simulation

de la machine

asynchrone à l'état

sain

I.1 Introduction

Un moteur asynchrone, également appelé moteur à induction, est une machine tournante qui fonctionne sur courant alternatif. Le terme asynchrone signifie que le rotor ne fonctionne pas à la même vitesse que le champ statorique [3]. Selon le nombre de phases d'alimentation, ces moteurs asynchrones peuvent être divisés en deux types :

- ✓ Moteur asynchrone monophasé.
- ✓ Moteur asynchrone triphasé.

Dans ce chapitre, nous commencerons par la définition de la machine asynchrone et nous introduirons quelques concepts de base liés à sa construction. Enfin, nous étudierons et modéliserons cette machine dans l'état sain. Quelques résultats de simulation seront présentés pour valider le modèle utilisé.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

Dans cette section, nous donnons quelques détails sur les éléments qui composent les machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. D'un point de vue mécanique, les machines asynchrones triphasées se composent de trois éléments principaux [4] :

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

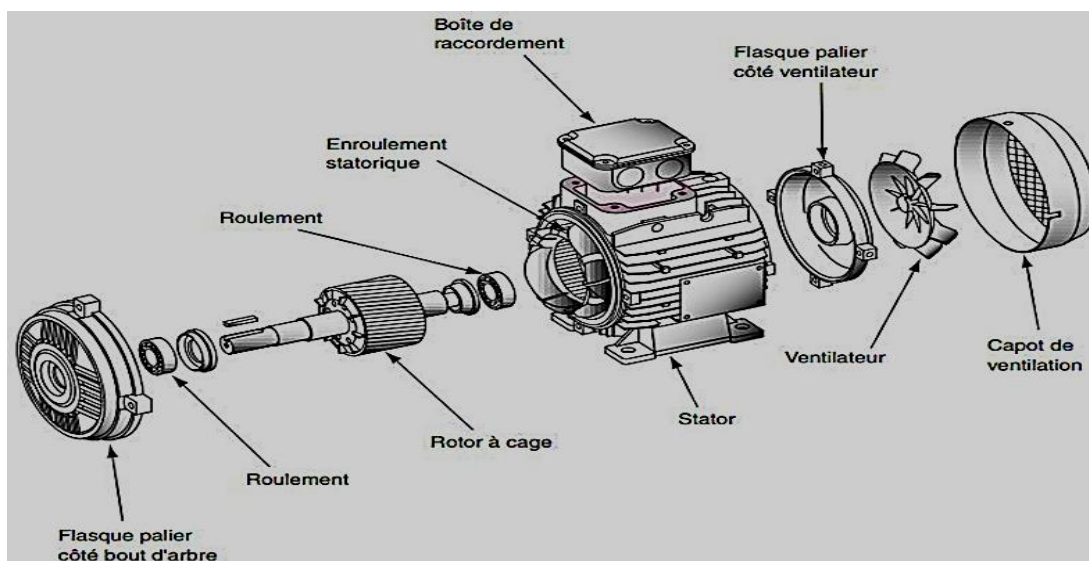


Figure I.1 Constitution de la machine asynchrone [3, 5]

I.2.1 Stator

La figure I.2 représente le stator de la machine asynchrone. C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse, sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité munies d'encoches, des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulement qui comportent autant de circuit qu'il y a de phase sur le réseau d'alimentation [6].

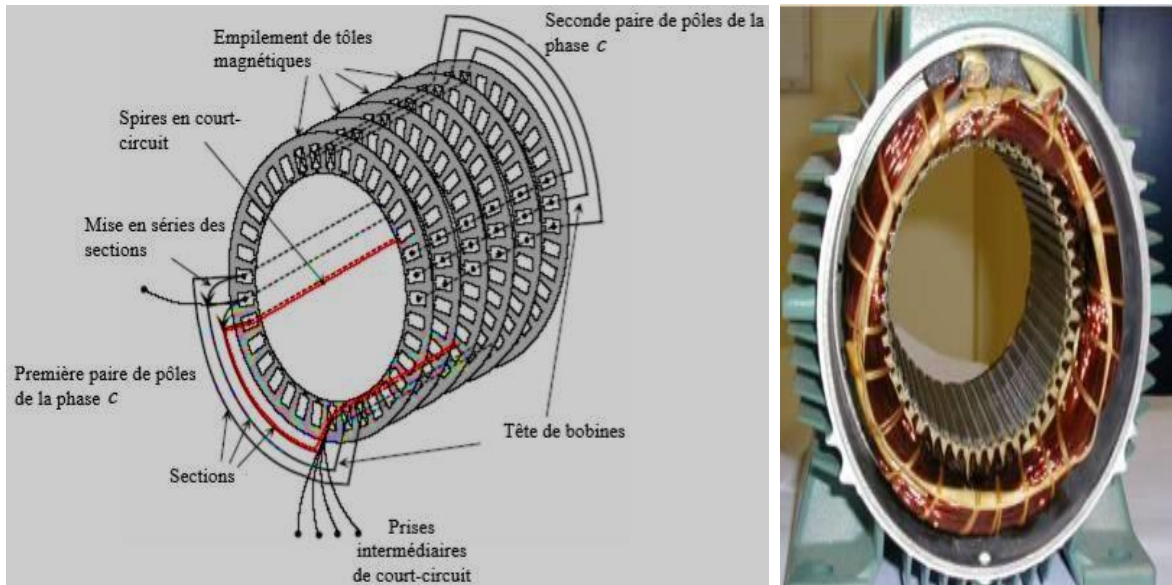


Figure I.2 Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite) [7]

I.2.2 Rotor

C'est la partie mobile de moteur. Il est placé à l'intérieur du stator et est constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Parmi les types les plus utilisés on distingue [6] :

- ❖ Le rotor bobine (rotor à bagues)
- ❖ Le rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).

I.2.2.1 Cage d'écureuil

Les encoches de ce type de rotor comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies (court-circuitées) entre elles par des anneaux. Dans le cas des moteurs de faible et de moyenne puissance, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation [8].



Figure.I.3 Rotor à cage d'écureuil [8]

I.2.2.2 Arbre

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation [9].

I.2.3 Paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements assurent le guidage en rotation libre de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique. L'ensemble ainsi établi constitue, alors, la machine asynchrone [10].

I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone peut s'expliquer par les points suivants [11] :

- Les trois enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme.
- Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant.
- Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits d'après la loi de Lenz ('les courants induits s'opposent par leur effet à la cause qui leur donnent naissance').
- Les barres du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation.
- De par son principe, la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme.

Le rapport $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ est appelé glissement de la machine asynchrone. (1.1)

avec :

Ω_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

Ω : vitesse de rotation du rotor ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

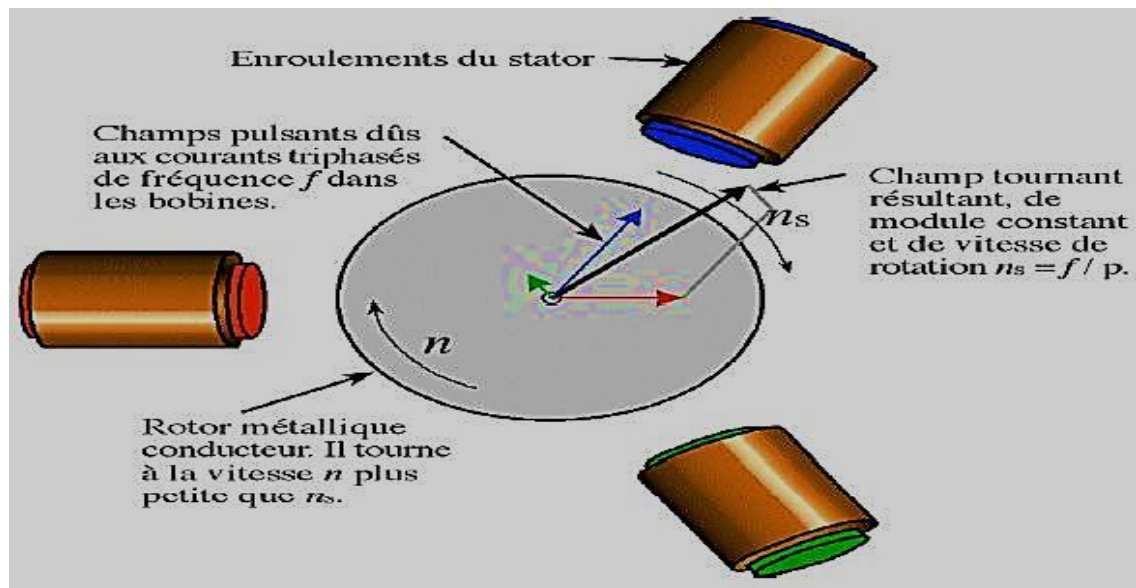


Figure.I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone triphasée [11]

I.4 Modèle multi-enroulements

I.4.1 Hypothèses simplificatrices

La réalisation d'un modèle de simulation pour une machine asynchrone est assez difficile. Certains chercheurs ont fait des hypothèses afin de simplifier le modèle de la machine asynchrone, notamment [12] :

- La caractéristique du circuit magnétique est linéaire (perméabilité relative du fer très grande devant 1) : Cette hypothèse permet d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotorique,
- l'effet de peau est négligeable,
- les barres rotoriques sont isolées les unes des autres : cette hypothèse permet d'éliminer les courants d'inter-barres et leurs effets au sein de la cage rotorique,
- les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligeables dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le modèle prendra en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique les plus importants ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques.

I.4.2 Équations de tensions au stator

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. Ces bobines sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer [12, 13].

On déduit pour l'ensemble des phases statoriques et sous forme matricielle les équations des tensions et des flux [13, 14] :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \\ [\phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \end{cases} \quad (1.2)$$

Avec :

$[V_{sabc}] = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T$: Vecteur des tensions statoriques,

$[i_{sabc}] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$: Vecteur des courant statorique,

$[i_{rk}] = [i_{r0} i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)}]^T$: Vecteur du courant dans les mailles rotorique,

$[N_r]$: Nombre de barres,

$[\phi_{sabc}]$: Vecteur des flux du stator,

$[R_s]$: Matrice des résistances du stator,

$[L_s]$: Matrice des inductances du stator,

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles.

Avec :

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

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{pmatrix}$$

Ainsi que la matrice mutuelle stator-rotor [13]:

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

avec :

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

α : Angle électrique entre deux mailles rotorique [rd].

I.4.3 Équations des tensions au rotor

La figure I.5 montre un schéma de la structure de la cage rotorique [14].

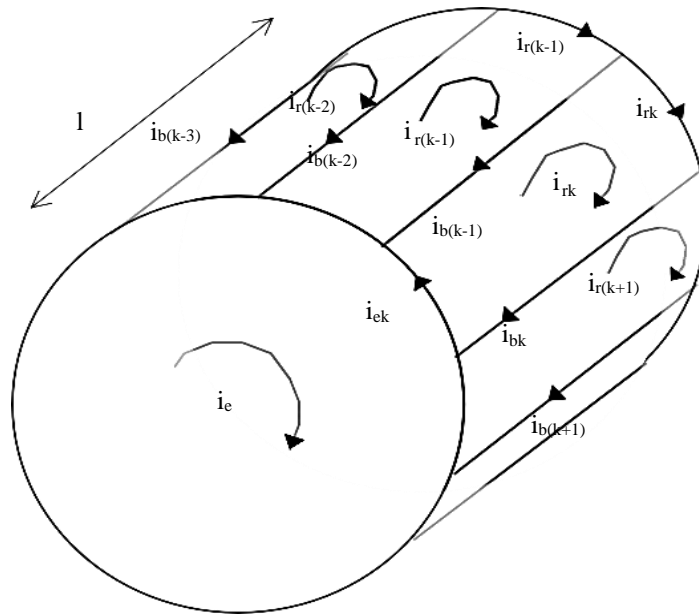


Figure I.5 Structure multi-enroulements du rotor [14]

Sachant que [13, 15] :

$$\begin{cases} I_{ek} = I_{rk} - I_e \\ I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k+1)} \end{cases} \quad (1.3)$$

L'équation de tension pour une maille "k" de la cage rotorique est donnée par [13, 15] :

$$-R_{b(k-1)}I_{r(k-1)} + R_{bk}I_{bk} + \frac{R_e}{N_r}I_{ek} + \frac{R_e}{N_r}I_{rk} + \frac{d}{dt}\phi_{rk} = 0 \quad (1.4)$$

Avec :

i_{rk} : Courant de maille k,

i_{bk} : Courant de la barre k,

i_e : Courant dans l'anneau de court-circuit,

R_b : Résistance d'une barre rotorique,

Φ_{rk} : Flux magnétique crée par une maille rotorique k,

R_e : Résistance totale de l'anneau de court-circuit

I.4.4 Calcul des inductances

Les expressions de toutes les inductances qui ont été extraits par la modélisation sont énumérées dans le tableau I.1 [13].

Tableau I.1 Inductances de la machine asynchrone à cage [13]

INDUCTANCES	EXPRSIONS
Inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 Rl}{e\pi p^2}$
Inductance mutuelle entre phases statoriques	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
Inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} + L_{sc} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
Inductance principale d'une maille rotorique.	$L_{rp} = \frac{(N_r - 1)}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} Rl$
Inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} Rl$
Inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_b$
Inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a"	$M_{rksa} = M_{sr} \cos(p\omega_r t + ka)$ avec : $M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s \cdot Rl}{ep^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$

Avec :

$$\alpha = p \frac{2\pi}{Nr}$$

R : Rayant moyen de l'entrefer,

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air,

l : Longueur du rotor,

N_s : Nombre de spires par phase statorique,

N_r : Nombre de barres rotoriques.

Remarque :

Les étapes de la modélisation sont présentées en détail dans [13, 14].

I.5 Modèle équivalent de la machine de taille réduit

La représentation d'état fait apparaître un système d'ordre très élevé, car il est constitué du nombre de phases statoriques, du nombre de phases rotoriques et des équations électromécaniques. Le rang du système est donc N_r+3 . Il est donc nécessaire de réduire la taille des matrices dans le but de réduire le temps de simulation. Pour ce faire, on utilise la matrice de Park étendue au système rotorique. Ce qui permet de passer d'une modélisation à n-phases "multi enroulement" à une modélisation diphasée équivalente écrite de la façon suivante [13]:

$$[T_{3 \times n}(\theta_r)] = \frac{2}{n} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & & \dots & & \dots & & \frac{1}{2} \\ \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - k.p.\frac{2\pi}{n}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r - (n-1).p.\frac{2\pi}{n}\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin\left(\theta_r - k.p.\frac{2\pi}{n}\right) & \dots & -\sin\left(\theta_r - (n-1).p.\frac{2\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

La matrice inverse est donnée par :

$$[T_{3 \times n}(\theta_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ 1 & \cos\left(\theta_r - k.p.\frac{2\pi}{n}\right) & -\sin\left(\theta_r - k.p.\frac{2\pi}{n}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\theta_r - (n-1).k.p.\frac{2\pi}{n}\right) & -\sin\left(\theta_r - (n-1).k.p.\frac{2\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

avec

$$k \in [0 \dots (n-1)], k \in N$$

L'application de la transformation donne [13]:

$$[X_{odqs}] = [T_{3 \times 3}(\theta_s)][X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T_{3 \times 3}(\theta_s)]^{-1} [X_{odqs}] \quad (1.7)$$

$$[X_{odqr}] = [T_{3Nr}(\theta_r)][X_{rk}] \Rightarrow [X_{rk}] = [T_{3Nr}(\theta_r)]^{-1} [X_{odqr}] \quad (1.8)$$

Avec :

$[X]$: vecteur d'état.

En choisissant un référentiel lié au rotor et après simplifications, on obtient un modèle de la machine réduit dont la forme canonique est [13] :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2}\omega M_{sr} & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2}\omega M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Avec :

$$L_{rc} = L_{rq} - M_{rr} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_e(1 - \cos a)$$

$$R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos a)$$

Le couple électromagnétique en fonction des courants s'exprime par [13]:

$$C_e = \frac{3}{4} p N_r M_{sr} (I_{ds} I_{qr} - I_{qs} I_{dr}) \quad (1.10)$$

L'équation du mouvement de la machine est donnée par la formule suivante [13]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - F\Omega) \quad (1.11)$$

I.6 Résultats de simulation

Afin de permettre l'observation et l'interprétation des grandeurs électriques et mécaniques de la machine asynchrone, nous avons simulé la machine dans un environnement Matlab/Simulink. Les paramètres sont donnés dans l'annexe.

Nous avons effectué des simulations dans les cas suivants :

- Au début, la machine n'est pas chargée, à l'instant $t=1$ s, la machine est chargée avec un couple égal à 3.5 N.m,
- Nous avons changé les charges afin de tester la machine (changement de charge).

a) Démarrage à vide avec introduction du couple de charge

Dans cette simulation, un couple nominal d'environ 3,5 Nm est appliqué à la machine à l'instant $t = 1$ seconde. La machine est alimentée directement par le réseau (sous une tension nominale).

Pour illustrer le comportement du modèle simulé, un couple de 3.5 Nm est appliqué à la machine à l'instant $t=1$ s. Ce couple représente le couple nominal de la machine réelle étudiée. Les figures I.6 à I.10 donnent des simulations du modèle de moteur asynchrone en état sain. Ces figures sont les suivantes : courant statorique, couple électromagnétique, vitesse de rotation, courant I_{ds} et courant I_{qs} .

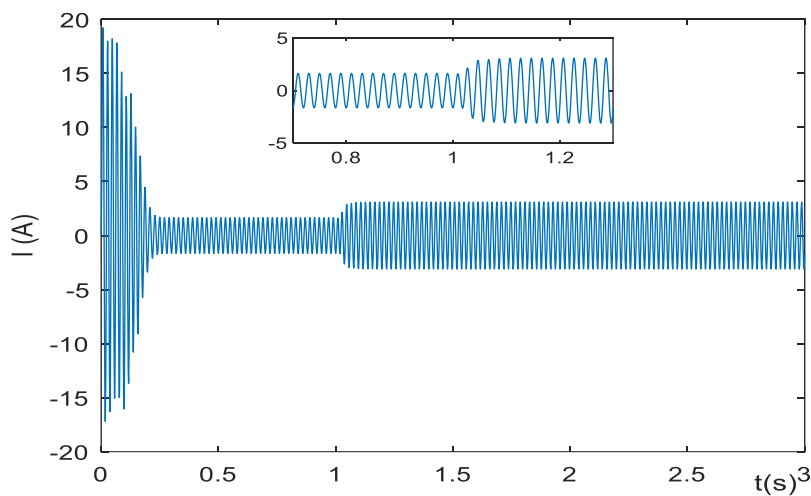


Figure I.6 Courant statorique de la phase (a).

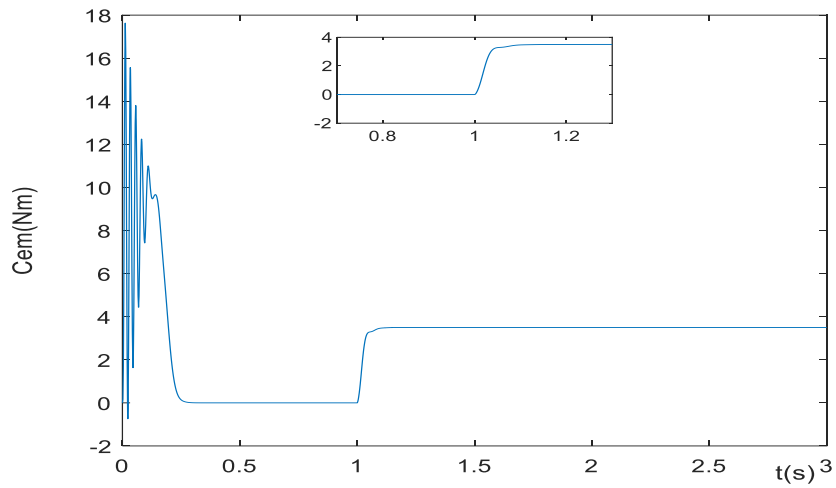


Figure I.7 Couple électromagnétique.

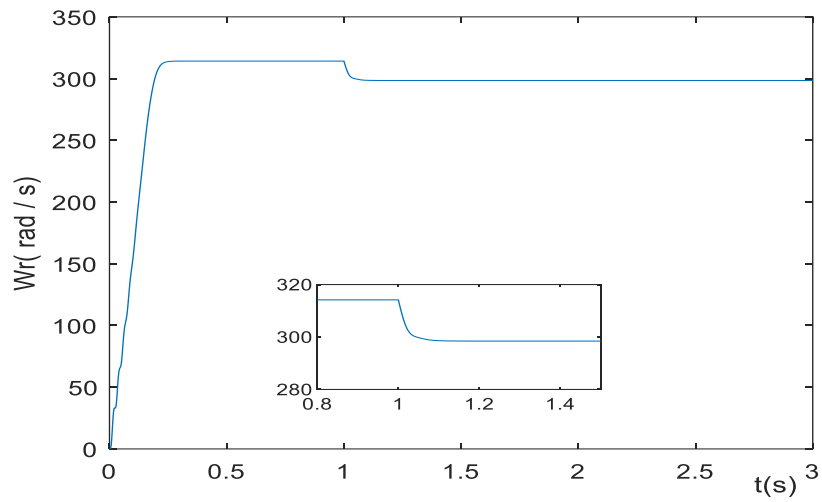


Figure I.8 Vitesse de rotation

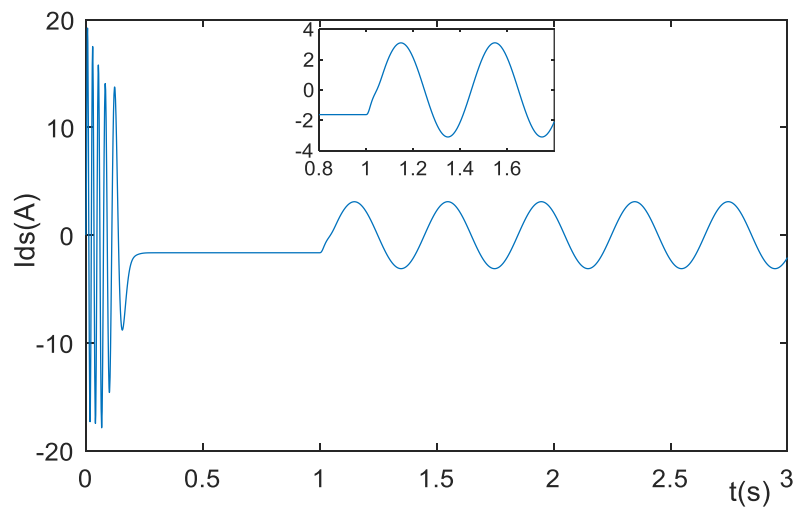


Figure I.9 Courant I_{ds} .

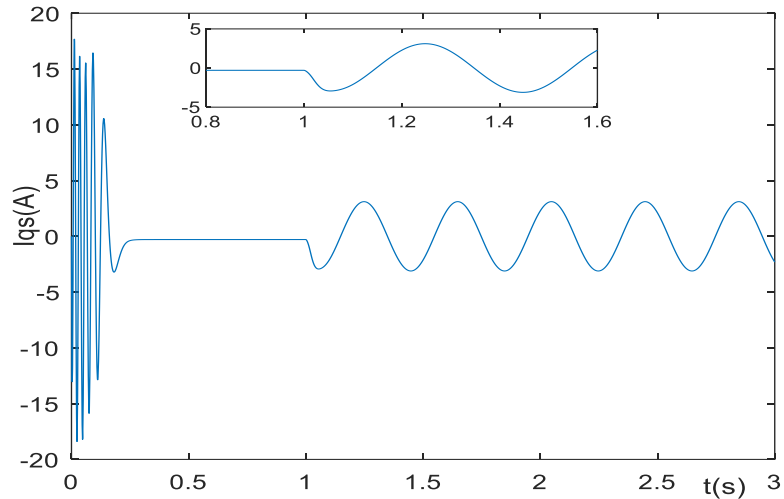


Figure I.10 Courant I_{qs} .

b) Variation de la charge (C_r)

Nous avons simulé la machine comme suit :

- La machine est alimentée directement par le réseau (sous une tension nominale).
- $C_r = 3.5 \text{ Nm}$ à $t = 1 \text{ s}$,
- à $t = 2 \text{ s}$, $C_r = 2 \text{ Nm}$.

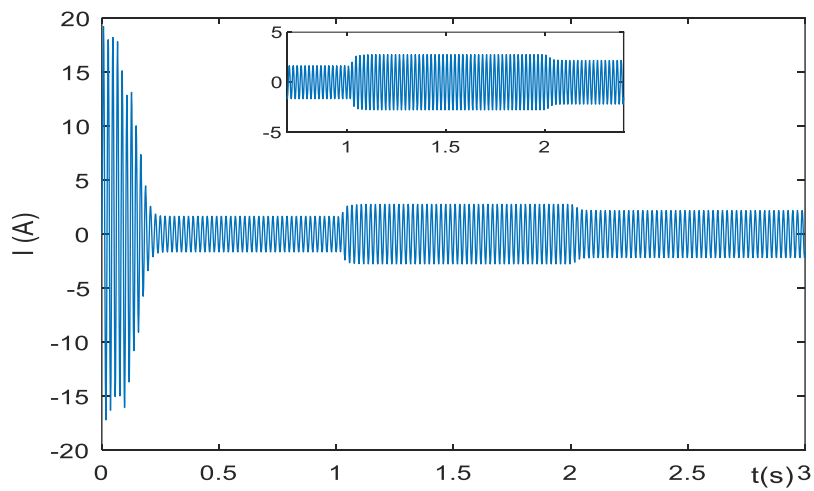


Figure I.11 Courant statorique de la phase (a).

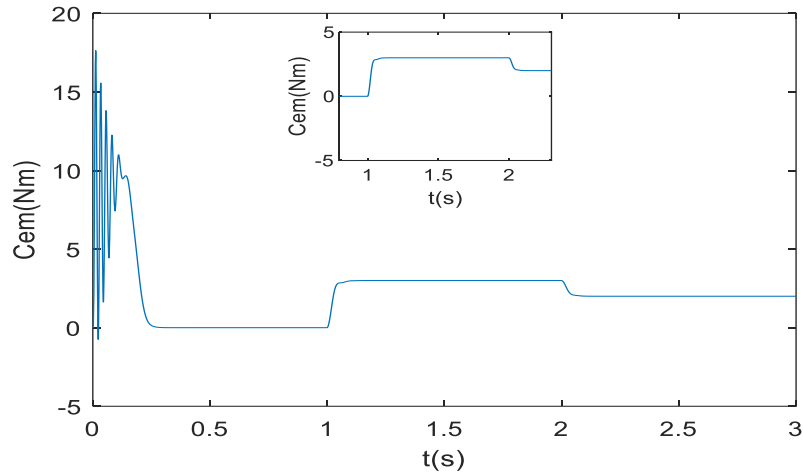


Figure I.12 Couple électromagnétique .

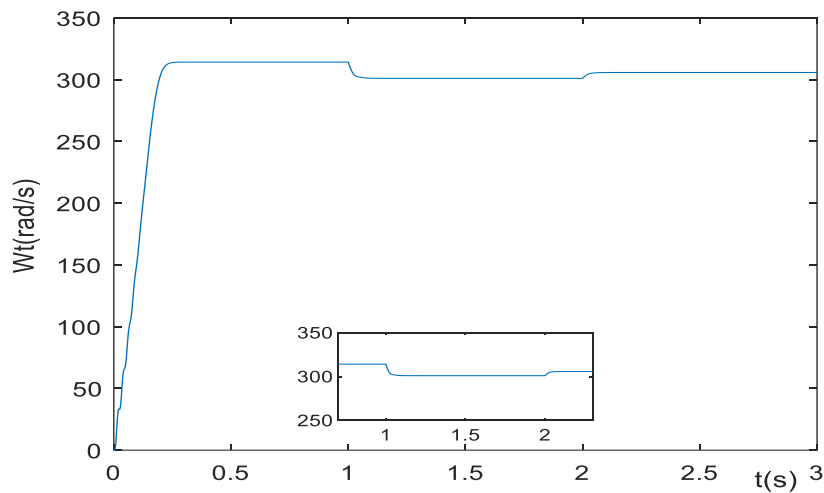


Figure I.13 Vitesse de rotation .

À partir des résultats obtenus, nous pouvons noter ce qui suit :

- Le courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation sont tous affectés par le changement de charge.
- Pendant la phase de démarrage, le courant statorique et le couple électromagnétique contiennent une série d'oscillations de grande amplitude.
- Le couple atteint sa valeur maximale puis diminue jusqu'à la valeur du couple résistant.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des définitions pour les différents composants qui constituent la machine asynchrone, ainsi que les principes de base de son fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté la modélisation et la simulation de cette machine dans un état sain. Grâce aux résultats de simulation obtenus, on peut dire que ces résultats prouvent l'efficacité de cette simulation. Il est possible de comprendre le comportement et le fonctionnement de la machine grâce à ces simulations. Le défaut d'excentricité est l'un des défauts les plus importants affectant une machine asynchrone, ce qui sera l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre II

Étude et simulation

de la machine

asynchrone avec

défaut d'excentricité

mixte

II.1 Introduction

La machine asynchrone se caractérise par sa robustesse, sa fiabilité et son faible coût. Malgré la robustesse de cette machine, elle est affectée par plusieurs défauts, notamment, le court-circuit d'une ou plusieurs spires des enroulements de phase statorique, rupture des barres rotorique, anomalies de l'entrefer statique ou dynamique (l'excentricité) et défaillances des roulements. L'excentricité est l'un des défauts les plus courants qui apparaissent dans les moteurs. Ce défaut peut être divisé en trois types : statique, dynamique et mixte (la somme des deux phénomènes statique et dynamique) [16].

Dans ce chapitre, nous introduirons quelques concepts liés à la défaillance et à la surveillance des défaillances. Enfin, nous présenterons un modèle qui simule le défaut d'excentricité mixte afin de comprendre le comportement de la machine asynchrone avec ce défaut.

II.2 Concepts et définitions

II.2.1 Maintenance

Le terme " maintenance " peut être défini de plusieurs manières, selon son domaine d'application. AFNOR (Association Française de Normalisation) par la norme NF EN 13306 (avril 2001) définit la maintenance comme étant l'ensemble des actions techniques, administratives et management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [17].

II.2.2 Défaut

Afin de gérer et de soutenir les processus industriels, la compréhension de la notion de défaut est essentielle pour contrôler ces processus. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en l'absence de défaut [18].

II.2.3 Défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. Le défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa fonction principale [18].

II.2.4 Panne

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance et d'un défaut [18].

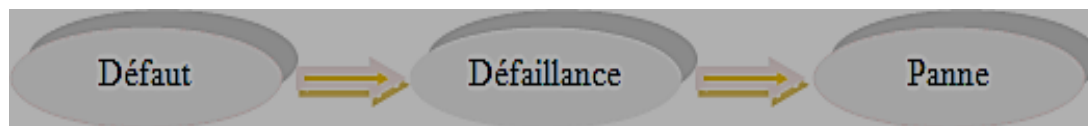


Figure II.1 Action de panne [18]

II.2.5 Supervision

La supervision comporte trois fonctions : la détection, la localisation et la décision [18] :

- **Détection**

La détection consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.

- **Localisation**

La localisation détermine les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne.

- **Décision**

Afin de déterminer les actions exactes à entreprendre.

II.3 Divers types de défauts

La machine à induction est affectée par diverses conditions indésirables, ce qui la rend sensible à différents types de dysfonctionnements. Parmi les causes de défaillance des machines à induction, on trouve : conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, la nature de la charge et le calendrier de maintenance. À cet égard, les défauts de ces machines peuvent être classés en trois catégories [16] :

❖ **Défauts électriques** : tout type de défaut ayant une source électrique est appelé défaut électrique. Les défauts sous cette classification sont : tension ou courant d'alimentation de déséquilibre, surtensions ou surintensités, séquence de phase inverse, défaut à la terre, surcharge, défaut de court-circuit entre spires ou entre phases.

❖ **Défauts mécaniques** : on cite : rupture ou cassure des barres ou d'anneaux de court-circuit, excentricité, défauts de roulement, déséquilibre de masse, frottement stator/rotor, déplacement des conducteurs.

❖ **Défauts liés à l'environnement** : la température ambiante ainsi que l'humidité externe affecteront les performances de la machine. Les vibrations de la machine sont dues à des défauts d'installation, à des défauts de fondations, etc...

Consistait à spécifier le pourcentage de différents défauts par rapport au nombre total de défauts. L'étude de l'IEEE a été réalisée sur différents moteurs dans des applications industrielles. Sous le parrainage d'EPRI, une étude a été menée par « General Electric Company » sur la base du rapport du constructeur du moteur. Selon leur rapport, les principaux défauts du moteur sont présentés dans le (tableau II.1) [16].

Tableau II.1 Possibilité d'apparition de défaut sur le moteur à induction [16]

<i>Étudié par</i>	Défaut de roulement	Défaut statorique	Défaut rotorique	<i>Autre</i>
IEEE	42 %	28 %	8 %	22 %
EPRI	41 %	36 %	9 %	14 %

II.3.1 Défauts de court-circuit

Le défaut de court-circuit entre les spires est l'un des types les plus importants de ce défaut (défaut de court-circuit), où ce défaut se produit dans le stator du moteur asynchrone. Il a, en général, pour origine un défaut d'isolation dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation importante du courant circulant dans les spires en court-circuit. Le défaut de court-circuit entraîne des risques importants, notamment l'émission de fumée, parfois même l'apparition d'incendies importants [19]. Les différents types de courts-circuits sont représentés dans la figure II.2.

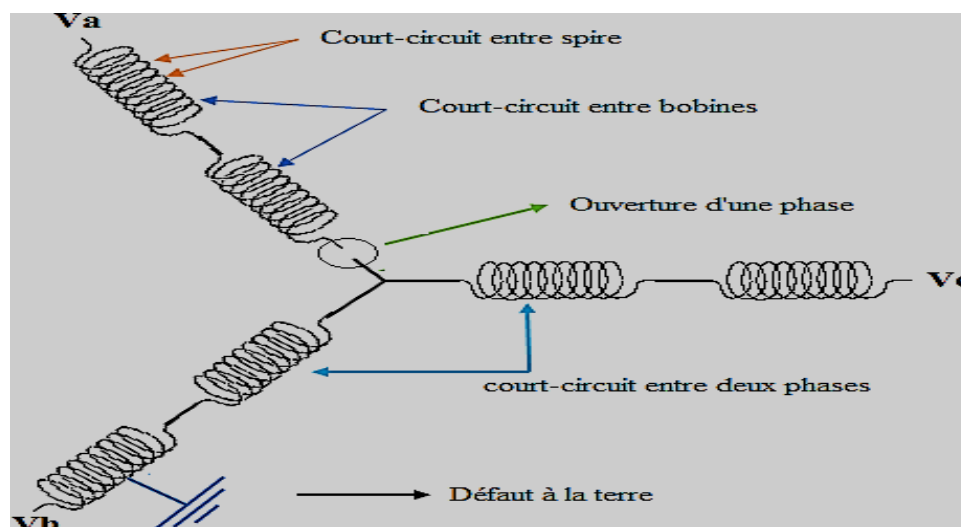


Figure II.2 Différents types de défauts d'enroulement statorique [20]

Selon [16, 20], le courant statorique a un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator, où les fréquences additionnelles sont données par :

$$f_{cc} = fs \left[\frac{k(1-g)}{p} \pm m \right] \quad (2.1)$$

Avec :

- ❖ f_{cc} : fréquence de court-circuit,
- ❖ fs : fréquence d'alimentation,
- ❖ k : entier naturel ($k=1, 2, 3, \dots$),
- ❖ $m = 1, 3, 5, \dots$,
- ❖ p : nombre de pair de pôles,
- ❖ g : glissement.

II.3.2 Cassures des barres et des portions d'anneaux

La cage d'écureuil étant parfois constituée d'une matière de faible soudabilité, telle que l'aluminium, des cassures peuvent apparaître au niveau de la soudure entre les barres et les anneaux de court-circuit, (figure II.3). La détection de ces défaillances est difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Le courant que conduisait une barre cassée, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [21].

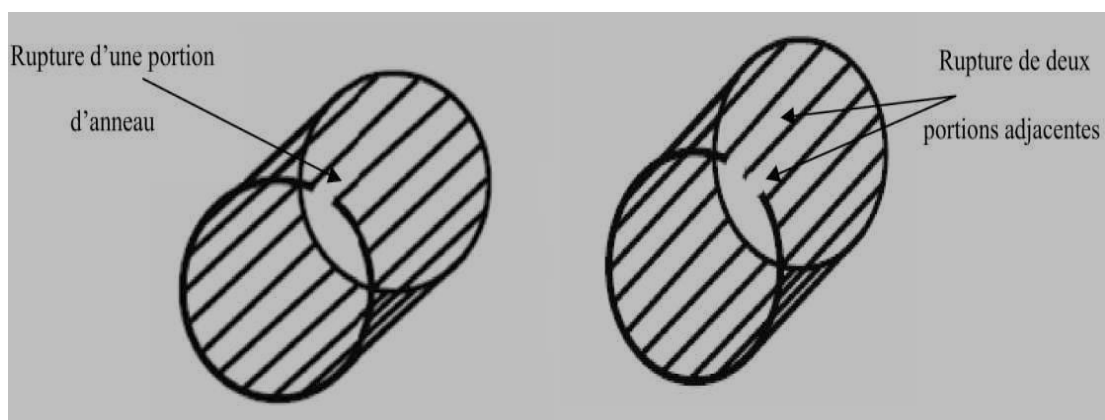


Figure II.3 Rupture d'une barre et d'une portion d'anneau de court-circuit [21]

En effet, si un défaut de rupture de barre apparaît, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences [16] :

$$f_{bc} = f_s [1 \pm 2k.g] \quad (2.2)$$

avec:

- ❖ f_{bc} : fréquence de la barre cassée,
- ❖ f_s : fréquence d'alimentation,
- ❖ g : glissement,
- ❖ k : entier naturel.

II.3.3 Défaut d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité, décentrement du rotor par rapport au stator, d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [22].

Selon la figure (II.4), trois catégories d'excentricité sont distinguées.

Les fréquences induites proches du fondamental sont données par :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm \frac{k(1-g)}{p} \right] (Hz) \quad (2.3)$$

avec :

- ❖ f_{exc} : fréquence d'excentricité
- ❖ k : entiere naturel (1,2, 3,.....)
- ❖ g : le glissement,
- ❖ p : nombre de paires de pôles,
- ❖ f_s : fréquence d'alimentation.

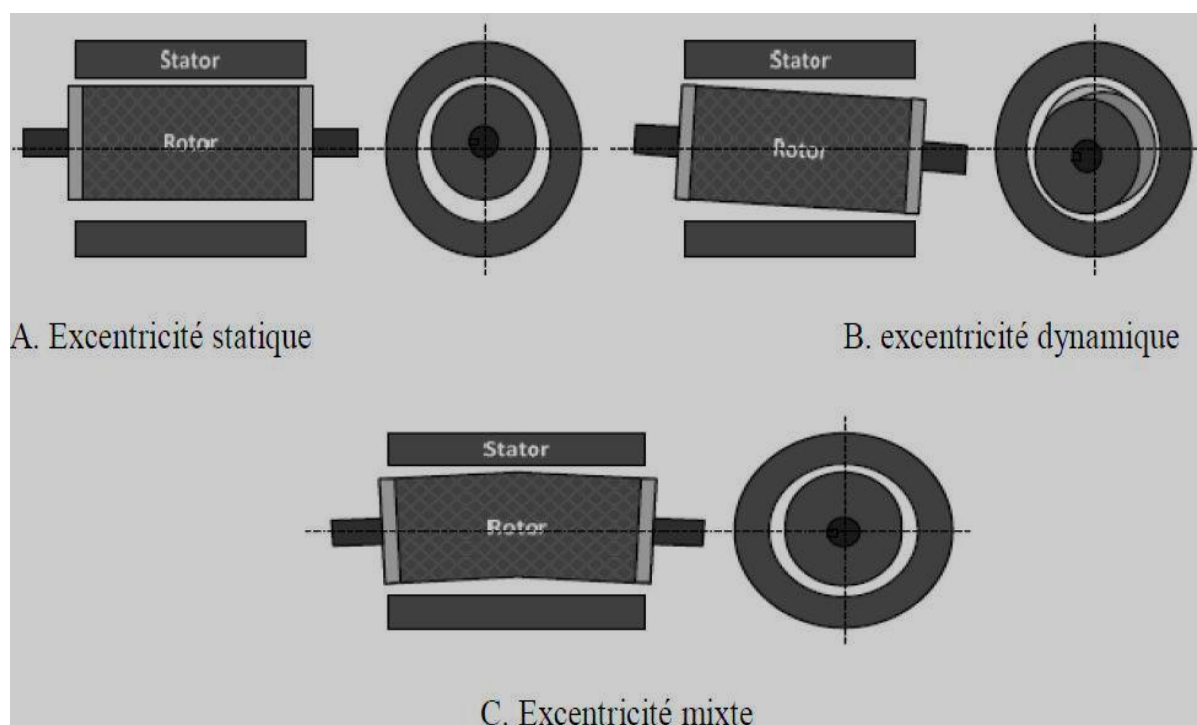


Figure II.4 Types d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte [23].

Il existe trois types d'excentricité [23] :

- ❖ *L'excentricité statique* correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator.
- ❖ *L'excentricité dynamique* correspond, elle, à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.
- ❖ *L'excentricité mixte* est la somme des deux cas présentés ci-avant (la plus fréquente).

II.3.4 Défaut de roulement

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques, les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication, les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement causés par un enroulement abîmé, écaillé ou fissuré peuvent créer des perturbations au sein de la machine, nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui pour des vitesses importantes peut provoquer la détérioration de ces derniers, Figure II.5 [21].

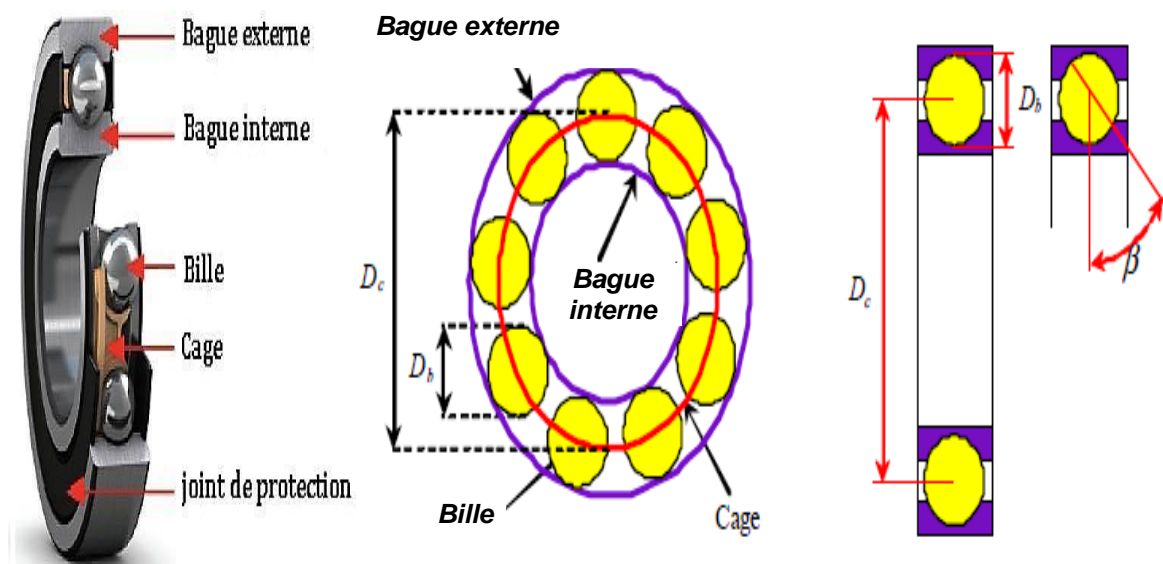


Figure II.5 Dimensions du roulement à billes [23]

Les fréquences de défaillance des roulements à billes sont les suivantes [16] :

- défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{D_c}{D_b} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_c} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

- défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{D_b}{D_c} \cos(\beta) \right] \quad (2.5)$$

- défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos(\beta) \right] \quad (2.6)$$

où :

- ❖ f_{rot} : fréquence de rotation du rotor,
- ❖ n_b : nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles),
- ❖ β : angle de contact,
- ❖ D_c : Diamètre du palier,
- ❖ D_b : Diamètre de la bille (Ball),
- ❖ β : angle de contact de la bille avec la cage.

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

$$\begin{cases} f_{b.int} = 0.6n_b f_{rot} \\ f_{b.ext} = 0.4n_b f_{rot} \end{cases} \quad (2.7)$$

II.4 Étude de défauts d'excentricité mixte

II.4.1 Entrefer

Pour traiter le défaut d'excentricité, on doit utiliser une expression de l'entrefer qui tient compte de ce type de défaut [24, 25]. La fonction de l'entrefer se présente sous la forme (2.8).

$$e(\theta_r, \phi) = e_0 [1 - a_1 \cos(\phi) - a_2 \cos(\phi - \theta_r)] \quad (2.8)$$

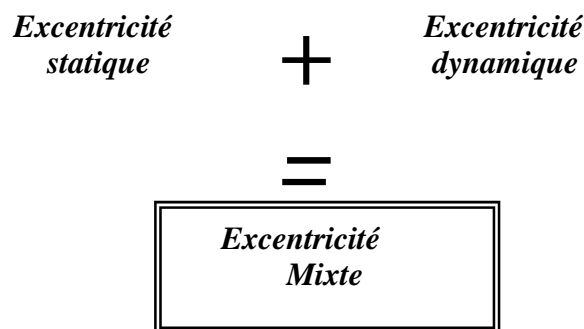


Figure II.6 Excentricité mixte [24]

a_1 : Quantité d'excentricité statique ;

a_2 : Quantité d'excentricité dynamique.

La fonction inverse de l'entrefer est de la forme suivante [25] :

$$e^{-1}(\theta_r, \phi) = \frac{1}{e_0 [1 - a_3 \cos(\phi - \theta_r')]} \quad (2.9)$$

Avec :

$$a_3 = \sqrt{a_1^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_r') + a_2^2} \quad (2.10)$$

$$\theta_r' = \arctan\left(\frac{a_2 \sin(\theta_r)}{a_1 + a_2 \cos(\theta_r)}\right) \quad (2.11)$$

Donc, on peut l'écrire comme suite :

$$e^{-1}(\theta_r, \phi) = G_0 + G_1 \cos(\phi - \theta_r) \quad (2.12)$$

$$G_0 = \frac{1}{e_0 \sqrt{1 - a_3^2}} \quad (2.13)$$

$$G_1 = \frac{2}{e_0 \sqrt{1 - a_3^2}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - a_3^2}}{a_3} \right) \quad (2.14)$$

II.5 Résultats de simulation

Nous avons effectué les simulations comme suit :

- le démarrage de la machine est effectué à vide,
- à l'instant $t=1$ s, on charge la machine avec un couple de 3.5 Nm,
- à l'instant $t = 2$ s, nous avons introduit un défaut d'excentricité mixte.

Dans cette partie, nous présentons les courbes suivantes : couple électromagnétique, vitesse de rotation, courant statorique, courant Ids et courant Iqs.

a) Pour : $a_1 = 0,1$ et $a_2 = 0,05$

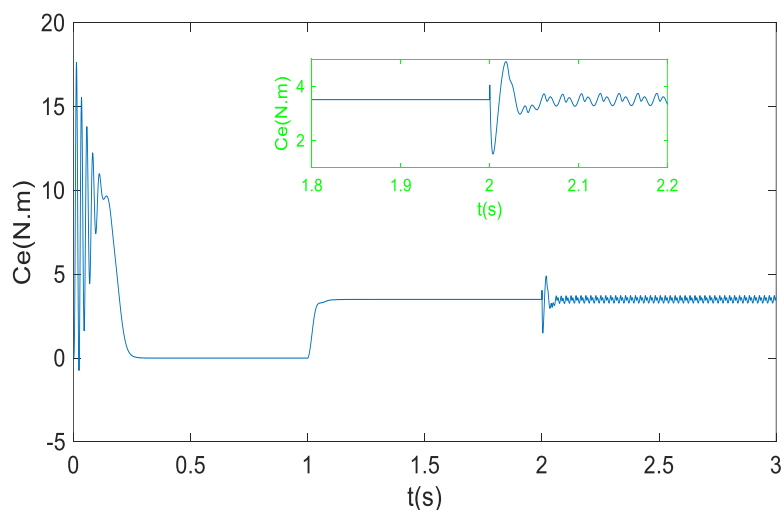


Figure II.7 Couple électromagnétique

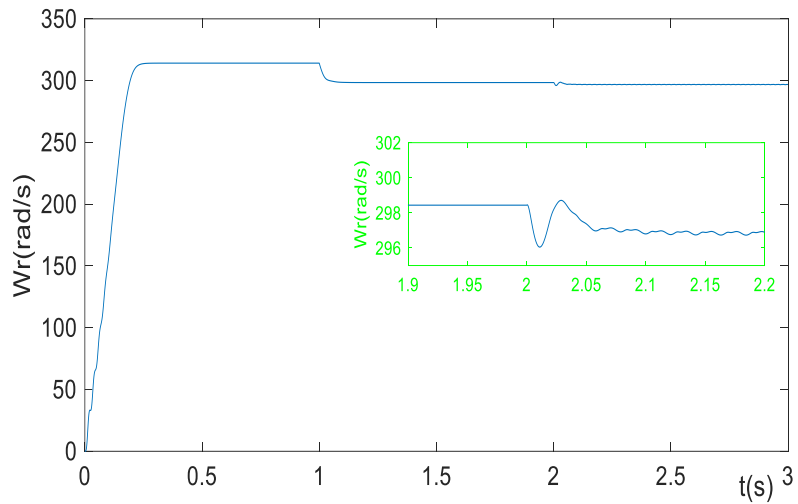


Figure II.8 Vitesse de rotation

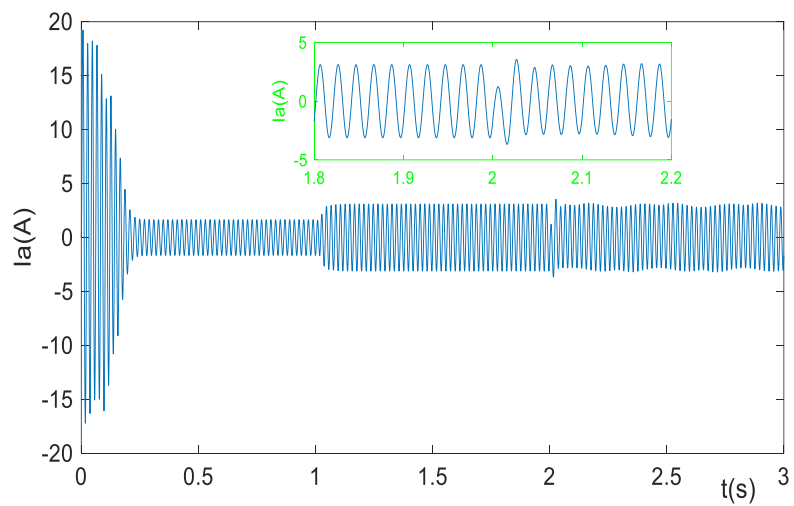


Figure II.9 Courant statorique

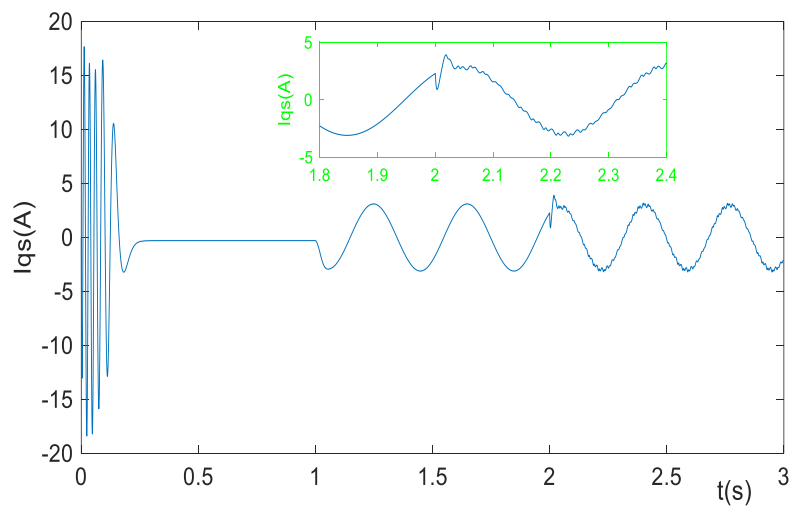


Figure II.10 Courant I_{qs}

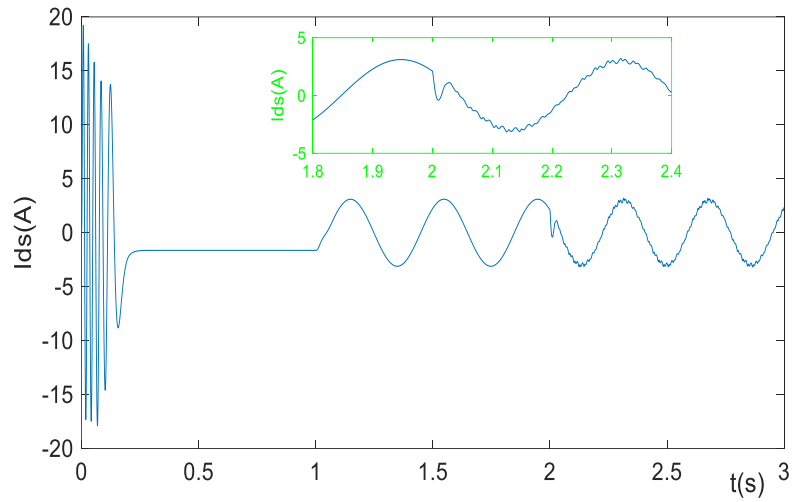


Figure II.11 Courant Ids

- Pour : $a_1 = 0,15$ et $a_2 = 0,1$

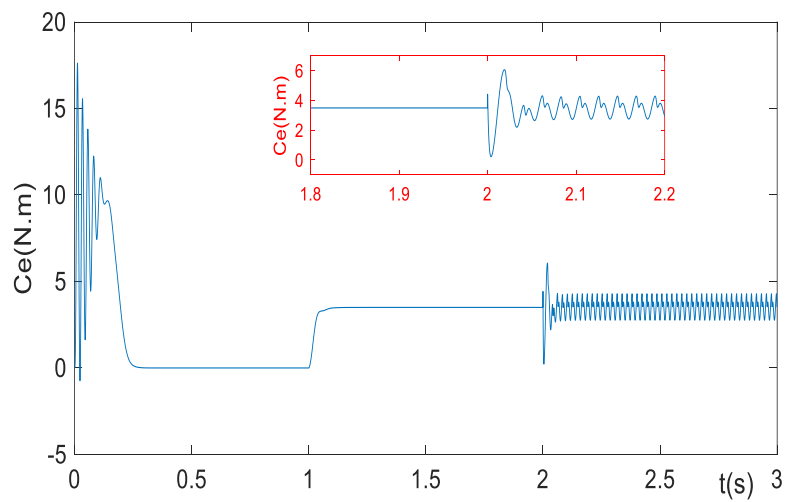


Figure II.12 Couple électromagnétique

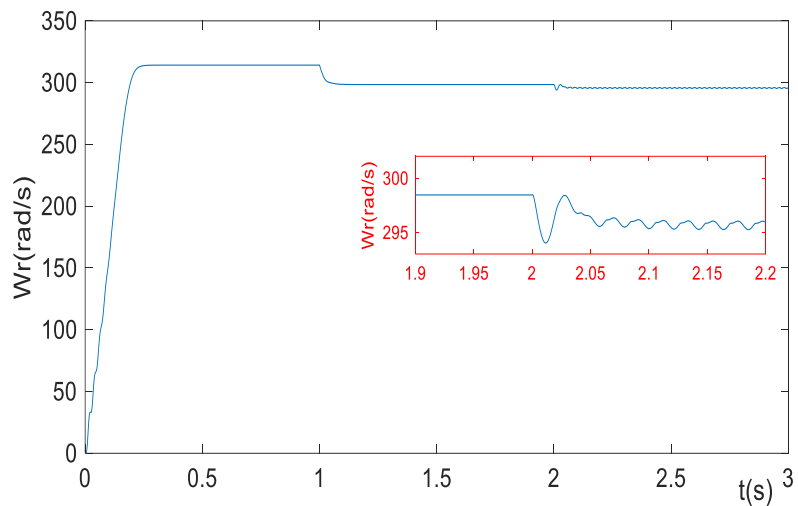


Figure II.13 Vitesse de rotation

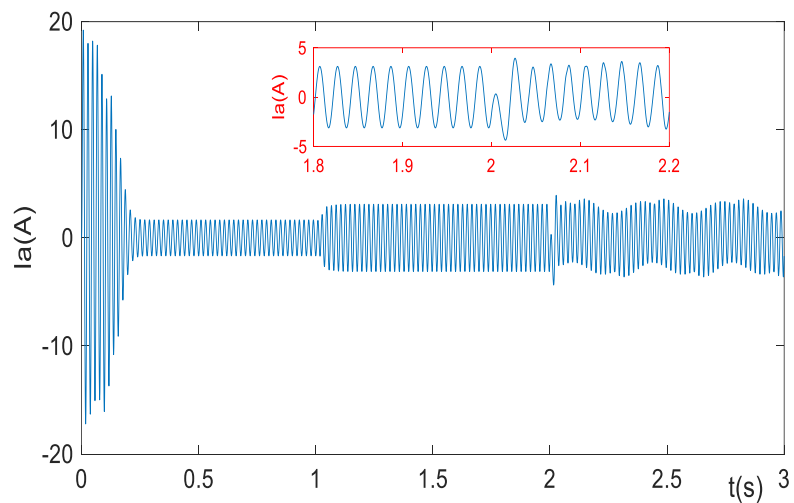


Figure II.14 Courant statorique

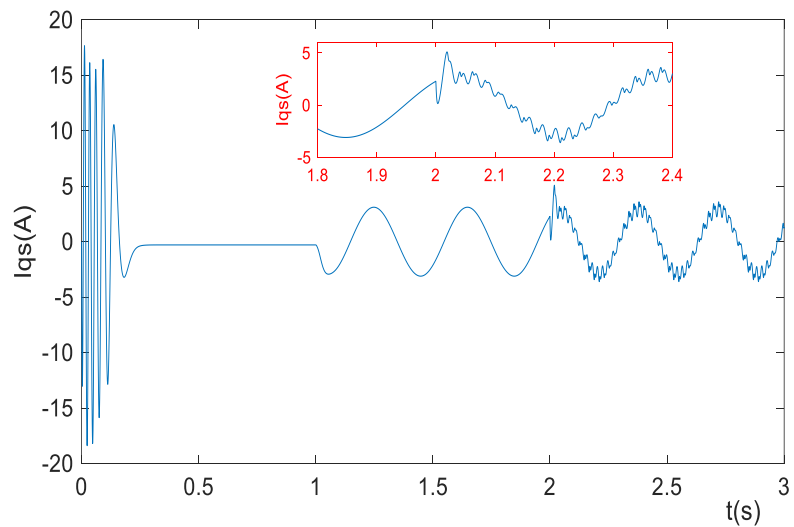


Figure II.15 Courant Iqs

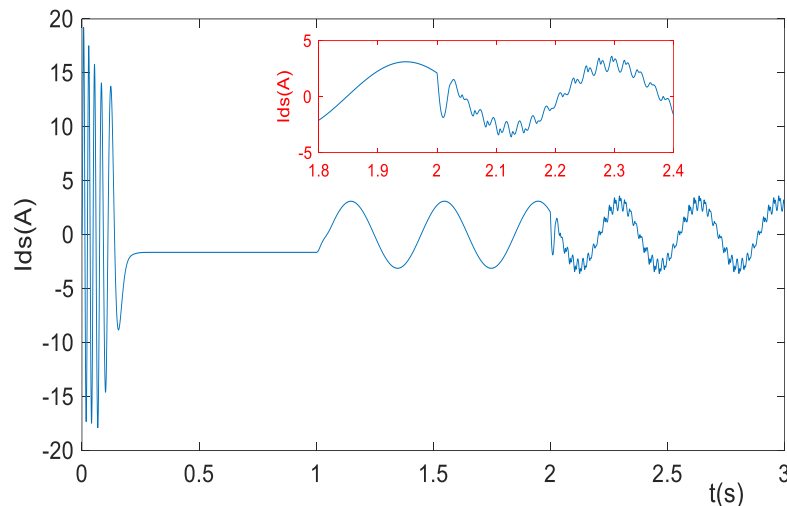


Figure II.16 Courant Ids

Lorsque la machine présente un défaut, on constate :

- l'apparition d'oscillations sur les courbes de vitesse et de couple,
- si l'on augmente le pourcentage de défaut, la vitesse diminue légèrement et le couple présente des oscillations plus importantes,
- des perturbations apparaissent dans le courant du stator et évoluent en fonction du taux de défaillance (pourcentage de défaut).

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques définitions sur les défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Ensuite, nous avons présenté un modèle qui permet de simuler la machine asynchrone triphasée à cage avec un défaut d'excentricité mixte. Les résultats obtenus par simulation permettent de démontrer la validité et la fiabilité de ce modèle. Pour diagnostiquer le défaut mentionné précédemment, il existe plusieurs méthodes. Nous proposons d'utiliser la technique des ondelettes (TO) pour diagnostiquer ce défaut, ce qui fera l'objet du dernier chapitre.

Chapitre III

Étude et application

de la technique

ondelette pour la

détection d'un défaut

d'excentricité

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous fournirons quelques définitions et concepts de base liés aux activités de maintenance et aux méthodes de diagnostic les plus courantes.

Nous allons utiliser deux techniques différentes pour diagnostiquer le défaut d'excentricité dans la machine asynchrone. La première méthode est basée sur l'analyse par FFT (Transformée de Fourier Rapide) et la seconde est appelée TOD (Transformée en ondelette). En effet, la méthode TOD a été utilisée pour compléter les lacunes de la méthode FFT.

Dans ce chapitre, nous ferons quelques simulations afin de diagnostiquer et de détecter le défaut, où nous utiliserons l'analyse de plusieurs grandeurs, dont le courant électrique, qui est un élément important pour l'analyse du défaut.

III.2 Maintenance

La maintenance c'est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise [26].

III.2.1 But de la maintenance

On peut diviser l'objectif de la maintenance en deux types [26] :

a) Objectifs financiers

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance,
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

b) Objectifs opérationnels

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles,
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum,
- Augmenter la durée de vie des équipements.

III.2.2 Types de la maintenance

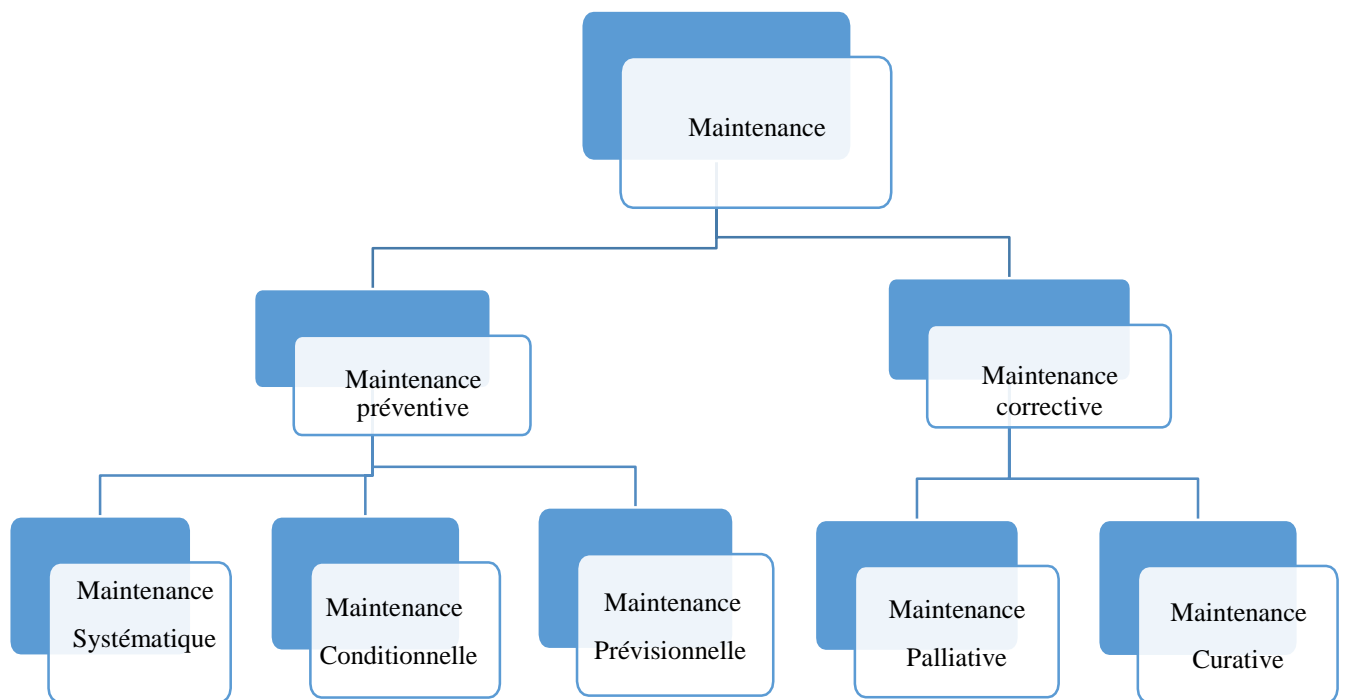


Figure III.1 Différents type de la maintenance [27]

a) Maintenance corrective

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité [28].

b) Maintenance préventive

La maintenance préventive effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation service rendu. Elle doit permettre d'éviter des défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter [29].

III.3 Quelques méthodes de diagnostic

III.3.1 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les

vibrations de la machine fournissent des informations pratiquement sur tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques [26].

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients [26]:

- Problème d'accessibilité.
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant [26].

III.3.2 Méthodes avec modèle

Ces méthodes utilisent les observateurs pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique. Généralement, les observateurs sont utilisés dans les systèmes du contrôle pour réduire l'incohérence entre les systèmes modélisés et mesurés causée par des erreurs du bruit ou de modèle. Ils peuvent être utilisés pour le diagnostic et la détection des défauts si les paramètres du processus sont connus et les défauts peuvent être modélisés comme des changements de variables d'état du système surveillé. La figure III.2 représente le schéma de principe de l'estimation d'état à partir des grandeurs mesurées [16]

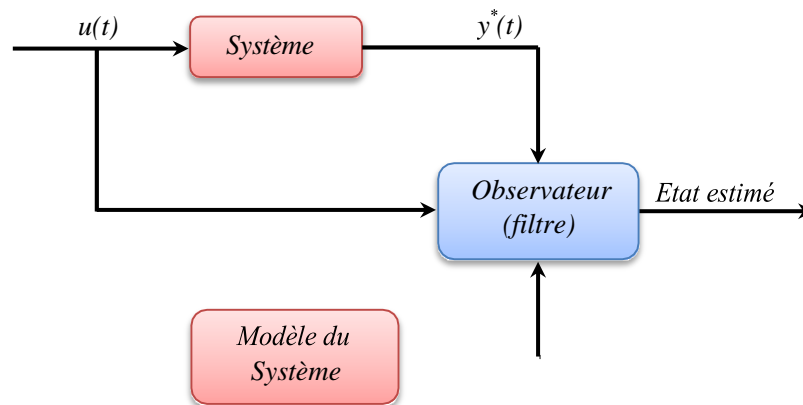


Figure III.2 : Principe de l'estimation d'état [16]

La méthode de diagnostic à l'aide du modèle peut être divisée en trois catégories [16] :

- Techniques d'estimation d'état,
- Technique de génération des résidus,
- Techniques d'identification.

III.3.3 Méthodes sans modèle

III.3.3.1 Approche signal

Cette méthode repose sur le traitement du signal. Parmi les grandeurs les plus importantes qui peuvent être accessibles, mesurées et analysées pour une machine asynchrone, nous trouvons [28]:

- tensions statoriques ,
- couple électromagnétique,
- courant statorique.

a) Diagnostic par l'analyse du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [26].

III.4 Quelques techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic

III.4.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [1, 26] :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (3.1)$$

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f)e^{-2\pi f t} df \quad (3.2)$$



Figure III.3 : Représentation temporelle vers fréquentielle [1]

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par [1, 26]:

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{\frac{2\pi fkt}{NT}} \quad (3.3)$$

Et sa relation inverse est donnée par :

$$x(KT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi fkt}{NT}} \quad (3.4)$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$.

III.4.2 Transformée en Ondelette (TO)

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique [1, 26].

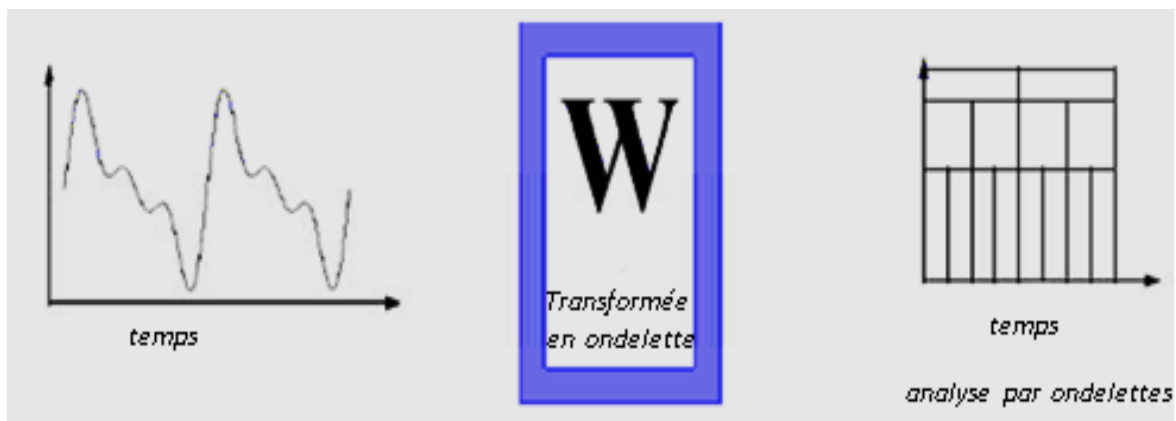


Figure III.4 : Représentation temporelle vers ondelette [1].

III.5 Résultats de simulation

III.5.1 Analyse par FFT

Les signaux à analyser dans cette simulation sont : couple électromagnétique, vitesse de rotation et courant statorique.

Les signaux sont acquis pour une fréquence d'échantillonnage de 10kHz.

- **Moteur sain**

Les figures suivantes (III.5, III.6 et III.7) montrent l'analyse spectrale du couple électromagnétique, de la vitesse de rotation et du courant statorique effectuée par FFT en régime permanent (stationnaire) (à charge nominale $C_r=3,5N.m$)

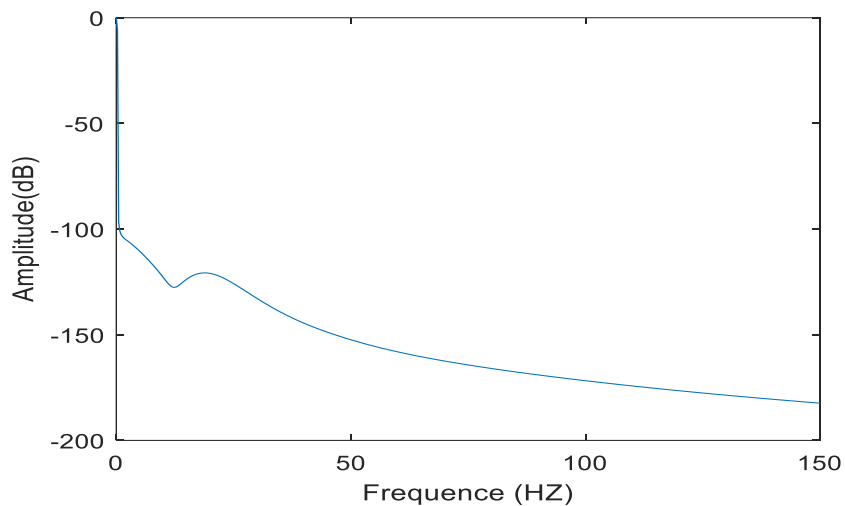


Figure III.5 Couple électromagnétique à l'état sain

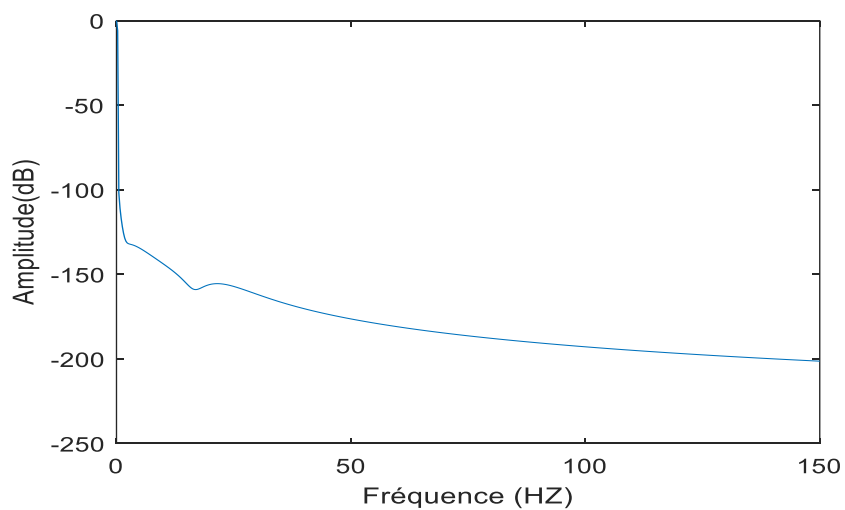


Figure III.6 Vitesse de rotation à l'état sain

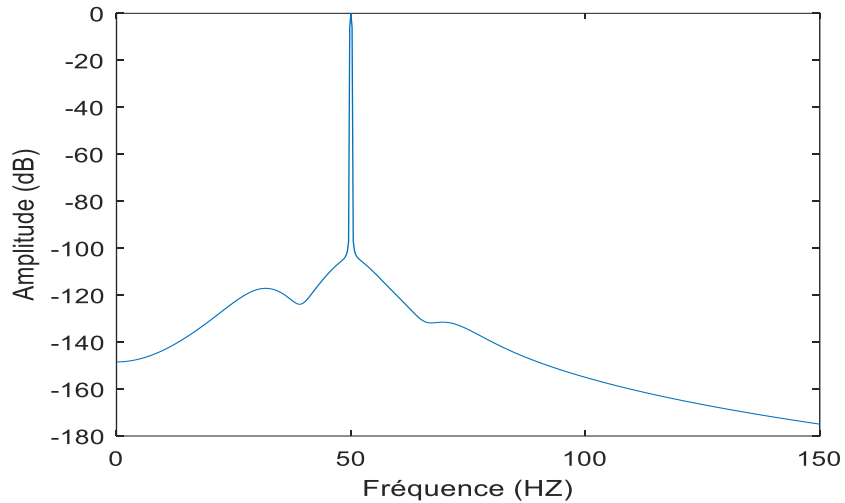


Figure III.7 Courant statorique à l'état sain

- **Moteur avec d'un défaut d'excentricité mixte**

Les figures (III.8, III.9 et III.10) montrent l'analyse spectrale de différentes grandeurs de la machine lorsqu'on applique le défaut d'excentricité mixte.

Avec :

$$a_1 = 0,1 \text{ et } a_2 = 0,05$$

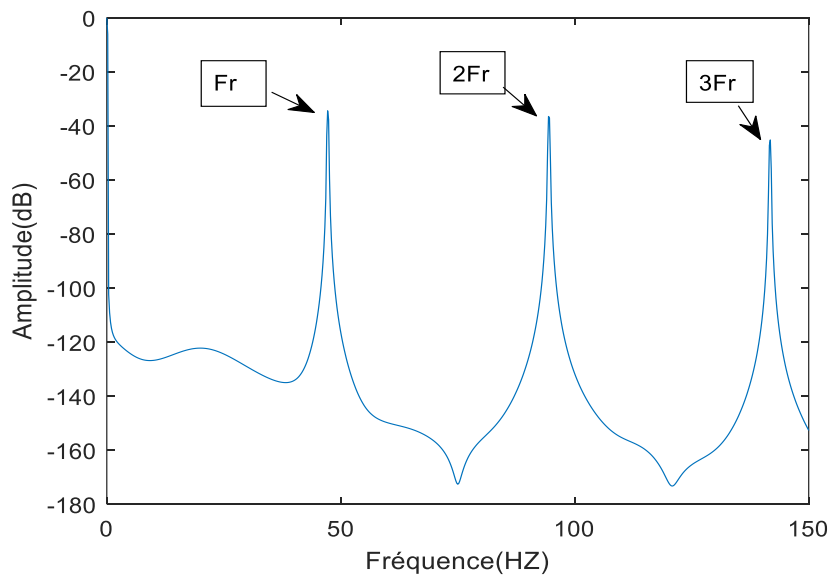


Figure III.8 Couple électromagnétique en défaut

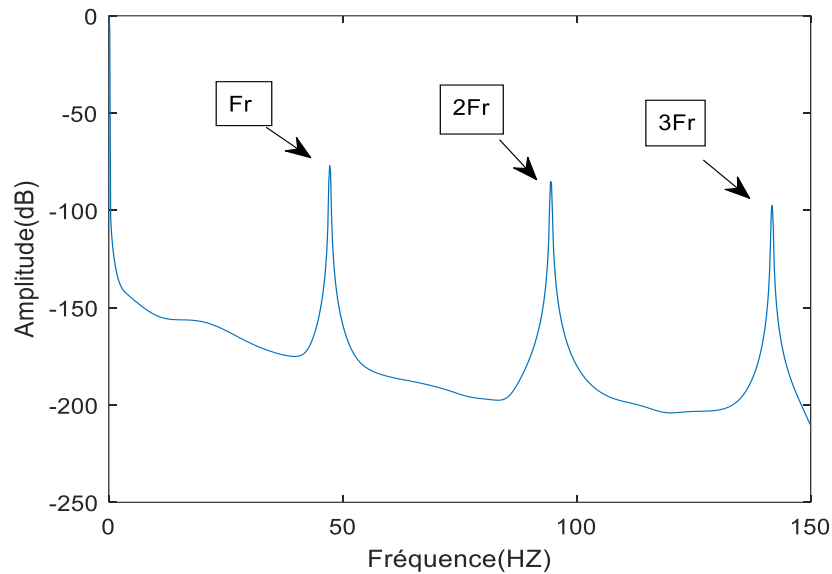


Figure III.9 Vitesse de rotation en défaut

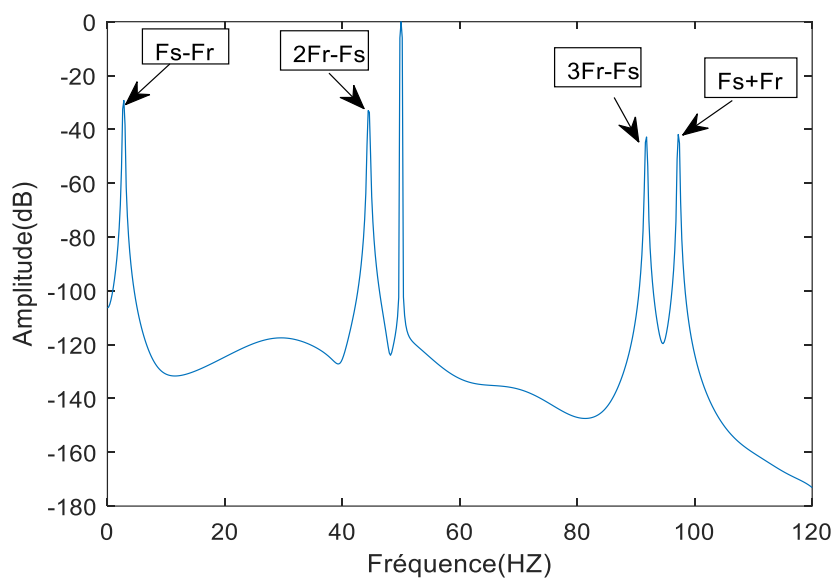


Figure III.10 Analyse spectrale par FFT du courant statorique en défaut

D'après les figures (III.8, III.9 et III.10), on constate la présence des harmoniques, où elles apparaissent en raison de la présence d'un défaut d'excentricité mixte.

Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 montrent les amplitudes et les fréquences des défauts en analysant le courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation par FFT.

On remarque que les fréquences des raies latérales déduites correspondent aux valeurs théoriques (calculées).

Tableau 3.1 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Courant statorique)

$f_s = 50 \text{ Hz}$ $f_r = 47.13$	$f_s + f_r$	$f_s - f_r$	$3f_r - f_s$	$2f_r - f_s$
f calculée (Hz)	97.13	2.87	91.39	44.26
f déduite (Hz)	97.2	2.8	91.8	44.4
Amplitude (dB)	-41.9	-29.26	-42.83	-33.03

Tableau 3.2 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Couple électromagnétique)

$f_s = 50 \text{ Hz}$ $f_r = 47.13$	f_r	$2f_r$	$3f_r$
f calculée (Hz)	47.13	94.26	141.39
f déduite (Hz)	47.2	94.4	141.6
Amplitude (dB)	-34.38	-36.46	-45.16

Tableau 3.3 : Fréquences de défaut calculées et déduites (Vitesse de rotation)

$f_s = 50 \text{ Hz}$ $f_r = 47.13$	f_r	$2f_r$	$3f_r$
f calculée (Hz)	47.13	94.26	141.39
f déduite (Hz)	47.2	94.4	141.6
Amplitude (dB)	-77.05	-85.15	-97.37

III.5.2 Analyse de défaut d'excentricité par l'ondelette

La transformée en ondelette est introduite pour surmonter les difficultés rencontrées dans la technique FFT. Une technique de fenêtrage avec une taille variable est utilisée pour améliorer l'analyse du signal du courant statorique en régime transitoire ou permanent. L'analyse par les ondelettes permet l'utilisation de longs intervalles de temps dont on veut plus de précision dans les basses fréquences, et de courtes régions pour les hautes fréquences [13].

Le diagnostic des défauts (d'excentricité) dans les machines asynchrones, sur la base d'analyse du courant statorique à l'aide de la transformée en ondelettes, dépend de [13] :

- ❖ l'extraction des informations des signaux transitoires ou permanents,
- ❖ du type de l'ondelette,
- ❖ de l'ordre de l'ondelette,
- ❖ le niveau de décomposition.

À partir de la relation suivante, on peut calculer le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation et les détails en effet, le niveau de décomposition du signal d'approximation qui inclut les harmoniques autour du fondamental, est le nombre entier exprimé par la relation [13] :

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log \left(\frac{f_e}{f} \right)}{\log(2)} \right) + 2 \quad (3.5)$$

Donc pour une fréquence d'échantillonnage de $f_e=10$ kHz, la fréquence d'alimentation $f=50$ Hz le nombre de décomposition est :

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log \left(\frac{10^4}{50} \right)}{\log(2)} \right) + 2 = 9 \text{ niveaux} \quad (3.6)$$

Le tableau (3.4) indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelette multi niveau.

Tableau 3.4 : Bande de fréquences associées aux détails et approximation [16]

Niveau de l'ondelette	Bande de Fréquences
Approximation 9 (a ₉)	[0 – 9.76] Hz
Détail 9 (d ₉)	[9.76 – 19.53] Hz
Détail 8 (d ₈)	[19.53 – 39.06] Hz
Détail 7 (d ₇)	[39.06 – 78.12] Hz
Détail 6 (d ₆)	[78.12– 156.25] Hz
Détail 5 (d ₅)	[156.25 – 312.5] Hz
Détail 4 (d ₄)	[312.5 – 625] Hz
Détail 3 (d ₃)	[625 – 1250] Hz
Détail 2 (d ₂)	[1250 – 2500] Hz
Détail 1 (d ₁)	[2500 – 5000] Hz

• **Défaut en régime permanent**

Nous avons effectué la simulation comme suit :

- le démarrage de la machine est effectué à vide,
- à l'instant $t=1$ s, on charge la machine avec un couple de 3.5 Nm,
- à l'instant $t = 2$ s, nous avons introduit un défaut d'excentricité mixte.

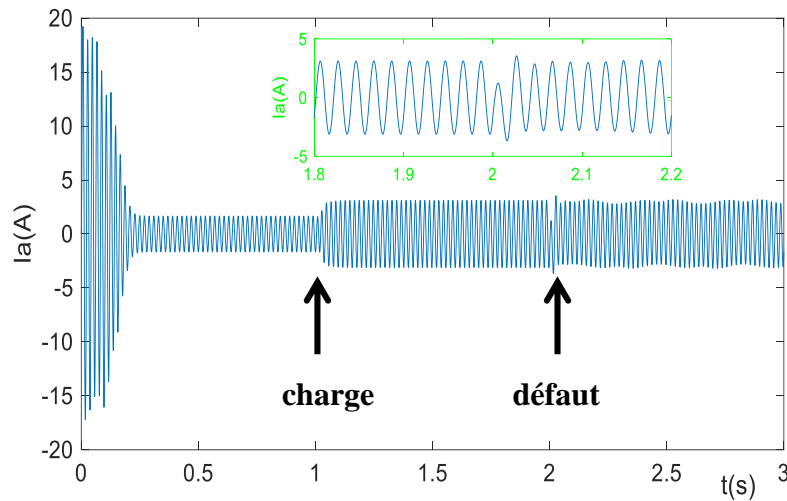


Figure III.11 Courant statorique (machine avec défaut d'excentricité mixte $a_{1=} 0,1$ et $a_{2=} 0,05$)

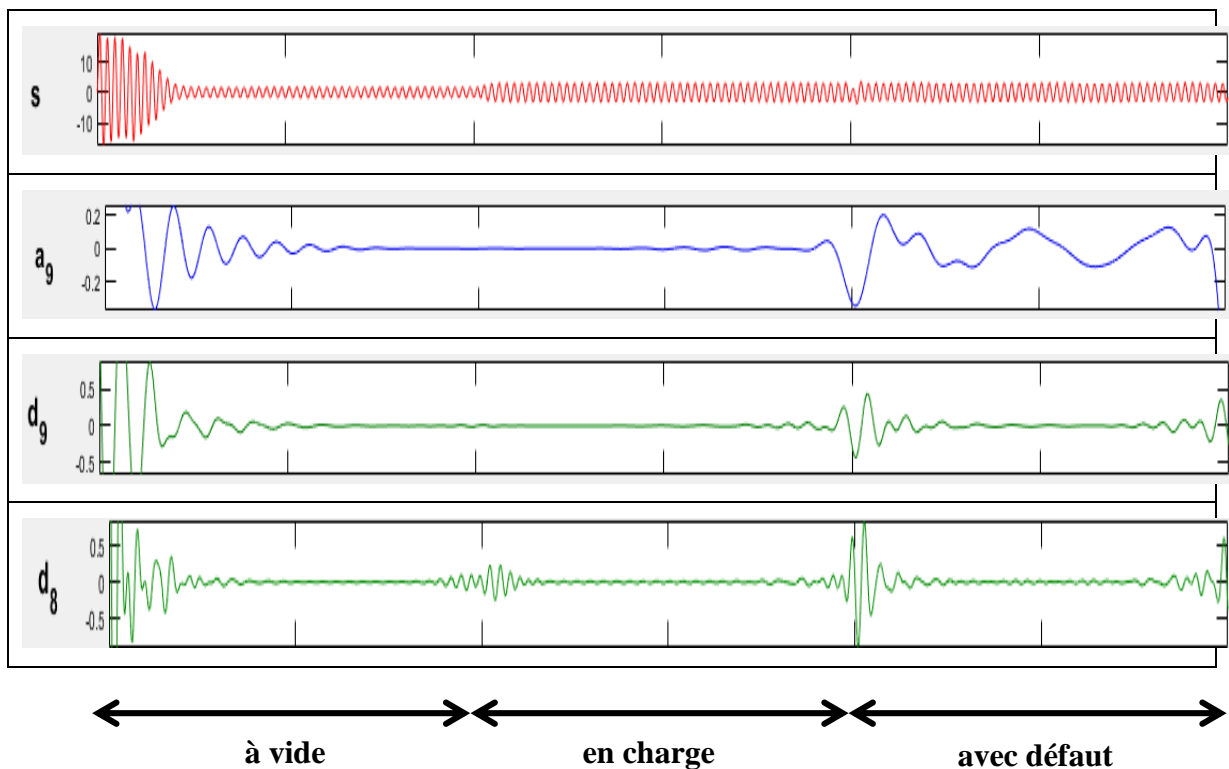
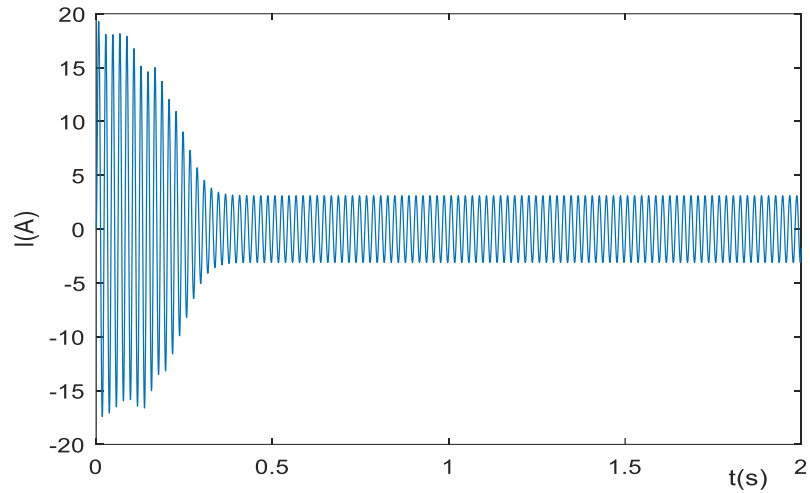


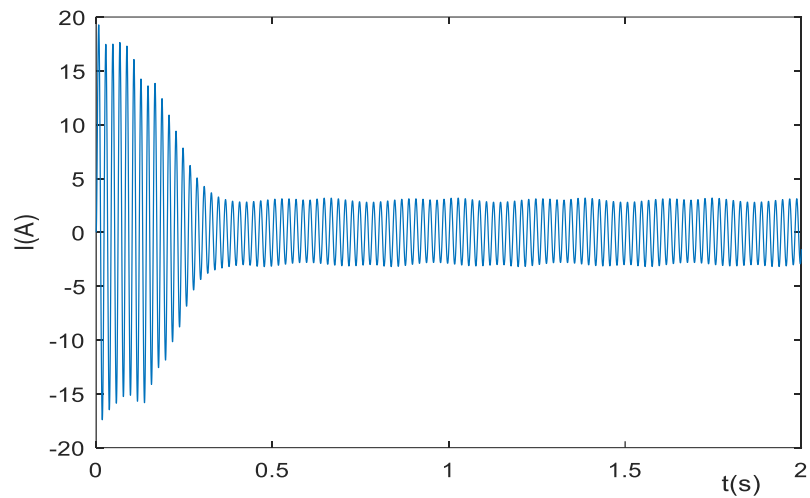
Figure III.12 Approximations et détails du courant statorique obtenus par l'ondelette db44

- **Défaut en régime transitoire**

Dans cette simulation, on considère que la machine est chargée et présente un défaut d'excentricité mixte au démarrage, les résultats de la simulation sont illustrés par les figures III.13.a et III.13.b



(a)

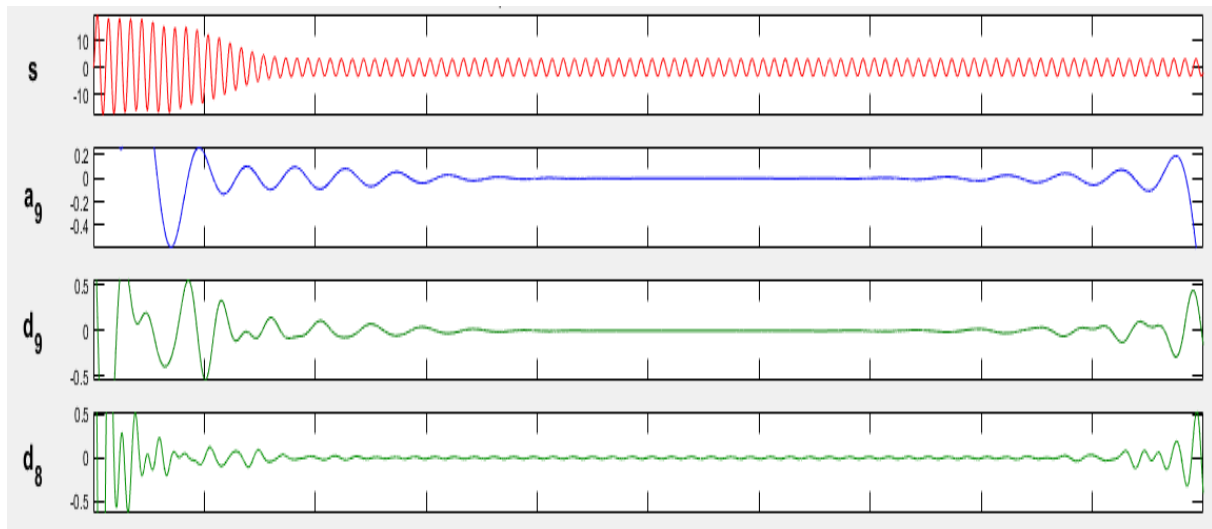


(b)

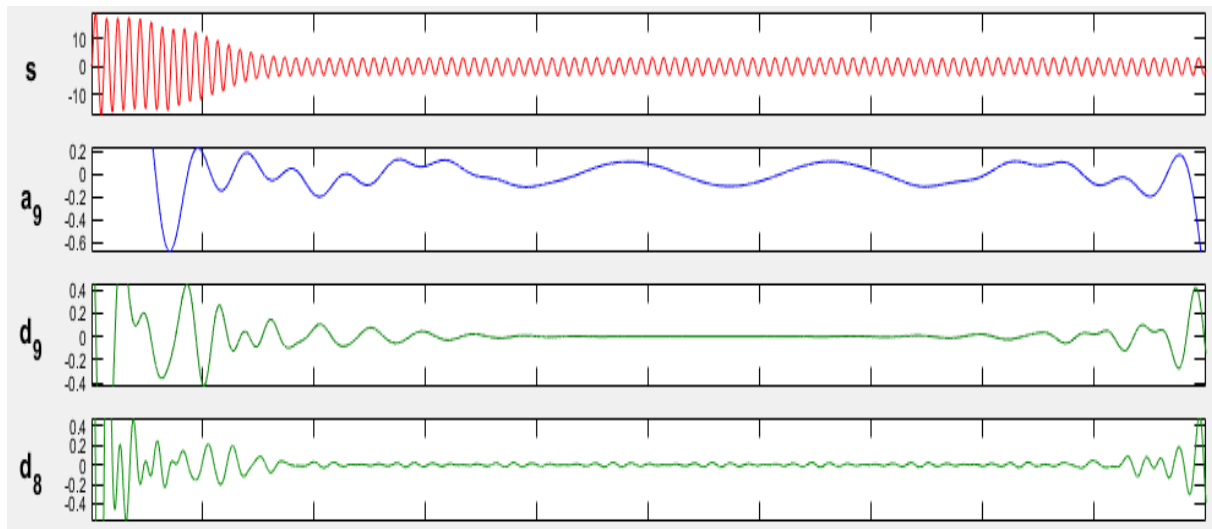
Figure III.13 Courant de démarrage statorique (a): moteur sain (b): moteur avec défaut

Les figures III.13.a et III.13.b illustrent l'analyse en ondelette du courant statorique en état sain et avec défaut.

Par rapport à la machine saine, la machine défectueuse a une plus grande amplitude du coefficient (Approximation) a_9 (figures III.12, III.13.a et III.13.b).



(a)



(b)

Figure III.14 Approximations et détails du courant statorique obtenus par l'ondelette db44

(a): moteur sain (b): moteur avec défaut

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la technique de l'ondelette et la FFT pour diagnostiquer le défaut d'excentricité de la machine asynchrone.

À travers les résultats obtenus, nous considérons que la méthode de diagnostic des défauts via la FFT est très efficace dans les signaux stables ou en état stationnaire. L'un des principaux inconvénients de la FFT est qu'elle est inefficace pour les signaux instables (non-stationnaires). La méthode de l'ondelette est l'une des solutions les plus efficaces à ce problème. À travers les résultats présentés, on peut considérer que cette technique est efficace pour détecter le défaut.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons modélisé la machine asynchrone triphasée à cage d'écuréuil à l'aide du modèle réduit. Ce choix est basé sur la nature du défaut à étudier (d'excentricité) ainsi que sur la facilité d'utilisation de ce modèle.

Il existe plusieurs méthodes pour diagnostiquer et déterminer le défaut, l'analyse des signaux étant l'une des méthodes les plus courantes et les plus utilisées.

L'analyse par ondelettes est une méthode avancée de détection des défauts. En effet, l'analyse par TOD a été utilisée pour remédier à certaines lacunes de l'analyse par FFT.

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques définitions des éléments constitutifs de base de la machine asynchrone, puis nous avons présenté la modélisation et la simulation de cette machine dans un état sain.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone, puis dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la machine asynchrone avec un défaut d'excentricité mixte.

Au début du troisième chapitre, nous avons présenté quelques méthodes de diagnostic des défauts.

Les résultats obtenus montrent que la technique FFT est très efficace pour les signaux stationnaires. De plus, à travers ces résultats obtenus, on peut considérer que la technique TOD est efficace pour la détection et l'identification de défauts dans les signaux stationnaires et non-stationnaires.

Enfin, pour l'amélioration de ce modeste travail, nous suggérons quelques perspectives à savoir :

- implémentation pratique ;
- considération d'autres types de défauts ;
- utilisation de l'intelligence artificielle pour diagnostiquer les défauts.

Annexe

Paramètres 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	longueur	65mm
e_0	épaisseur d'entrefer	0.25mm
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
F	coefficient de frottement	0
J	moment d'inertie	5.4 10 ⁻³ kgm ²

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **H. Cherif**, "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2014
- [2] **F. Hanafi, S. Mehaoua**, "Contribution à l'étude de l'excentricité dans la machine asynchrone triphasée", Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, 2019
- [3] **N. BENAMROUCHE**, " Identification des paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil", Mémoire de Master, Université mouloud Mammeri-Tizi-ouzou, 2012.
- [4] **R. MERAD**, " Outils de Diagnostic Appliqués à la Machine Asynchrone triphasée à cage d'écureuil ", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2005.
- [5] **A. MEFLAH, H. BOUSSAADA**, "Réalisation d'une carte d'acquisition pour le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone", Mémoire de Master ,Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018.
- [6] **N. KADDOURI, M. RAHMANI**, " Commande d'une machine asynchrone par la logique floue", Mémoire de Master. Université Ahmed Draia-Adrar, 2014.
- [7] **M. M'BEIRICK**, "Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d'alimentation (déséquilibre de tension) ", Mémoire de Master. Université Jijel, 2019
- [8] **N. ARKOUB, S. BODE DERE**, " Amélioration des performances du démarrage d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil avec insertion des pièces ferromagnétiques dans les encoches rotoriques", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017
- [9] **Y. HENNEB**, "Adaptation d'un variateur de vitesse à un moteur asynchrone d'entraînement d'une pompe centrifuge pour résolution de problème de pression hydrodynamique" Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2022.
- [10] **A. GHELIS, M. MOUSSAOU** "Diagnostic et pronostic du défaut de rupture d'isolement dans les machines électriques".Mémoire de de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [11] **A. HAMMOUM, M. BENDJAFER**, " Modélisation et simulation d'un variateur de vitesse d'un moteur asynchrone ", Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB .BLIDA, 2015.
- [12] **A. BOUZIDA**, " Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes ", Mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique, 2008.
- [13] **Y. SAKER**, " Commande vectorielle d'une machine asynchrone avec défaut" Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider–Biskra. 2012.
- [14] **A. ABED**, " Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone". Thèse de doctorat. Nancy 1. 2002.
- [15] **M. M. AL-MUSHIAA, Z. AOUKLI**. " Technique de diagnostic des défauts dans les systèmes électriques par les réseaux de neurones (machine asynchrone) ". Mémoire de Master Université Bordj bou arreridj. 2022.

- [16] **T. AMEID**, "Intitulé contrôle et diagnostic de la machine à induction", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
- [17] **N. KHEMCHANE, A. TIZZAOUI**, "Technique de diagnostic statorique d'un moteur asynchrone", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [18] **M. AL. A. GUEHAIZ**, "diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette." Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2019 .
- [19] **S. SAKHARA**, " Diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette", Thèse de Doctorat, Université Badji, Mokhtar Annaba, 2017.
- [20] **M. BELACEL, S. BOUDINA**, "Modélisation et simulation les défauts rotoriques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil", Mémoire de Master, Université Akli mohand Oulhadj Bouira, 2018.
- [21] **R. KACHIDA**, "Contrôle et diagnostic d'une machine à induction sans capteur en utilisant des techniques avancées d'analyse et de traitement", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [22] **S. BAZI**, " Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur" Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2016.
- [23] **L. LABIOD, F. BOUTADJINE**, "Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation)", Mémoire de Master , Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, 2019.
- [24] **H. MERABET**, "Surveillance et détection de défauts d'une machine à induction" Mémoire de Magister, Université Badji, Mokhtar Annaba, 2009.
- [25] **M. DRIF, C. A.J. MARQUES**, " Instantaneous non-active power approach for airgap eccentricity fault diagnosis in three-phase induction motors", Acta Electrotechnica et Informatica Vol. 8, No. 3, 2008, 18–25
- [26] **M. GUEHAIZ**, " Diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [27] **F. BELKACEMI, L. OUALI**, " Mise en place d'un plan de maintenance préventive pour l'amélioration de la disponibilité de la ligne « TAMBOUR » au sein de SAMHA (Brandt) Sétif", Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2018.
- [28] **M. SAHRAOUI**, " Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse de doctorat, Université Mohamed KHIDER Biskra, 2010.
- [29] **A. ADDOUN**, " Optimisation de la maintenance par la méthode AMDEC appliquée au ventilateur de l'entreprise ALZINC", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2015.