

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électrotechnique

N° :...../2023

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electromécanique**

**SPECIALITE : Electromécanique**

### **Thème**

**Simulation des différents défauts de roulement de la  
machine asynchrone dans l'environnement  
MATLAB/SIMULINK**

**Présenté Par :**

**BOUDJEDJOU MOHAMMED EL AMINE**

**AMIRA YAAKOUB**

**Encadré Par :**

**BOUKHENAF MASSAOUD**

**Date de soutenance : 11/07/2023**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : A.Rezig**

**Grade : Pr.**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : M.Boukhenaf**

**Grade : MCB**

**Univ MSB jijel**

**Examineur : M.Hadef**

**Grade : MCA**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2022 /2023**

A decorative border of repeating floral motifs surrounds the text.

# *Dédicace*

**Je dédie ce modeste travail**

**A :**

**Mes chers parents**

**Merci pour tout, vous êtes piliers et ma force  
dans la vie**

**A mes chers frères et sœurs**

**A toute la famille**

**A tous mes amis**

**MOHAMMED EL AMINE**

A decorative border of repeating floral motifs surrounds the text. The motifs are stylized, resembling small flowers or leaves, arranged in a continuous line.

# *Dédicaces*

**Je dédie ce modeste travail**

**A :**

**Mes chers parents**

**Merci pour tout, vous êtes piliers et ma force  
dans la vie**

**A mes chers frères et sœurs**

**A toute la famille**

**A tous mes amis**

**YAAKOUB**

A decorative border of repeating floral motifs surrounds the text. The motifs are stylized, resembling small flowers or leaves, and are arranged in a continuous line along the top, bottom, and sides of the page.

# *Remerciements*

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous Exprimons Notre plus Grande Gratitude Et Notre Respect à notre encadreur Mr. BOUKHENAF Messaoud, pour tous ces judicieux conseils, son temps qu'il nous a consacré et pour nous avoir guidé et soutenu avec patience et indulgence.

Notre Remerciement S'étend Aussi Aux Membres Du Jury D'avoir Accepté d'examiner et de juger notre travail.

Enfin nous en profitons pour remercier tous nos collègues pour tout le plaisir que nous avons eu au cours des cinq dernières années.

## Résumé

Les entrainements électriques à base de la machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnement dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine. Ce travail d'initiation à la recherche traite la simulation des défauts de roulement dans une machine asynchrone. Généralement, une surveillance vibratoire peut être mise en place mais cette méthode de surveillance est souvent onéreuse du fait de la chaîne de mesure. Une approche, est basée sur l'analyse et le traitement des courants statoriques, est alors proposée afin de mettre en évidence l'efficacité et la robustesse de cette dernière. Un modèle de simulation (qd0) de la machine asynchrone est alors utilisé pour simuler les défauts de roulement. De plus, le couple est également visualisé pour fournir des indications sur la présence d'un défaut mécanique. Un outil de la maintenance conditionnelle utilisée pour la détection des défauts mécaniques est la densité spectrale de puissance. Les résultats de simulations prouvent parfaitement le niveau d'efficacité de chaque méthode utilisée.

## Abstract

The electric drives based on the asynchronous machine are widely used in industrial applications due to their low cost, their performance and their robustness. However, degraded operating modes may appear during the life of the machine. This introductory research work deals with the simulation of rolling defects in an asynchronous machine. Generally, vibration monitoring can be implemented but this monitoring method is often expensive because of the measurement chain. An approach, based on the analysis and processing of stator currents, is then proposed in order to highlight the efficiency and robustness of the latter. A simulation model (qd0) of the asynchronous machine is then used to simulate the rolling defects. In addition, the torque is also visualized to provide indications on the presence of a mechanical fault. A conditional maintenance tool used for the detection of mechanical defects is the power spectral density. The results of simulations perfectly prove the level of efficiency of each method used.

## المخلص

تستخدم المحركات الكهربائية القائمة على الآلة غير المتزامنة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية نظرا لتكلفتها المنخفضة وأدائها ومثابرتها. ومع ذلك، قد تظهر أوضاع التشغيل المتدهورة أثناء عمر الماكينة. يتناول هذا العمل البحثي التمهيدي محاكاة العيوب المتدرجة في آلة غير متزامنة. بشكل عام، يمكن تنفيذ مراقبة الاهتزاز ولكن طريقة المراقبة هذه غالبا ما تكون باهظة الثمن بسبب سلسلة القياس. ثم يتم اقتراح نهج، يعتمد على تحليل ومعالجة التيارات الثابتة، من

أجل تسليط الضوء على كفاءة ومثانة هذا الأخير. ثم يتم استخدام نموذج محاكاة ( التربيعية المباشرة 0) من الجهاز غير المتزامن لمحاكاة العيوب المتداول. بالإضافة إلى ذلك ، يتم تصور عزم الدوران أيضا لتوفير مؤشرات على وجود عطل ميكانيكي. أداة الصيانة الشرطية المستخدمة للكشف عن العيوب الميكانيكية هي الكثافة الطيفية للطاقة. نتائج المحاكاة تثبت تماما مستوى كفاءة كل طريقة مستخدمة.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I: DEFAILLANCES ET SYNTHESE DES METHODES DE DIAGNOSTIC DU MOTEUR ASYNCHRONE .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Construction de la machine asynchrone .....</b>	<b>3</b>
I.2.1 Le stator .....	4
I.2.2 Le rotor .....	5
I.2.3 Les paliers .....	6
<b>I.3 Défaillance machine asynchrone.....</b>	<b>6</b>
I.3.1 Défaillances au rotor .....	6
I.3.2 Défaillances au stator.....	8
I.3.3 Défaillances d'ordre mécanique .....	11
<b>I.4 Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone .....</b>	<b>12</b>
I.4.1 Surveillance de la machine asynchrone .....	12
I.4.2 Surveillance à travers l'analyse des courants statoriques .....	13
<b>I.5 Méthodes de diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones.....</b>	<b>14</b>
I.5.1 Analyse de la densité spectrale de puissance (DSP) du courant statorique pour la détection des défauts.....	14
I.5.2 La transformée de Hilbert .....	15
I.5.3 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	16
I.5.4 Transformée De Fourier (FFT) .....	16
I.5.5 Analyse du module du vecteur de Park.....	17
I.5.6 Analyse spectrale du module du vecteur de Park (EPVA).....	19
I.5.7 Analyse spectrale de la puissance électrique .....	19
<b>I.6 Conclusion .....</b>	<b>20</b>
<b>CHAPITRE II: MODELISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE A INDUCTION..</b>	<b>21</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3 Modélisation et simulation de la machine asynchrone à l'état sain :.....</b>	<b>23</b>
II.3.1 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone qd0 : .....	25
II.3.2 Réduction de la matrice des inductances .....	30
<b>II.4 Modélisation et simulation de la machine asynchrone avec défaut de roulement.</b>	<b>38</b>

II.4.1	Origines des raies dues au défaut roulement en présence d'un défaut.....	39
II.4.2	Fréquence des défauts de la bague intérieure.....	40
II.4.3	Fréquence des défauts de la cage.....	41
II.4.4	Fréquence des défauts de la bague extérieure.....	41
II.4.5	La fréquence des défauts à bille.....	41
<b>II.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE III: RESULTATS DE SIMULATION.....</b>		<b>43</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>44</b>
<b>III.2</b>	<b>Les paramètres de la machine.....</b>	<b>44</b>
<b>III.3</b>	<b>Fréquences cinématiques caractéristiques.....</b>	<b>44</b>
<b>III.4</b>	<b>Résultats de simulation :.....</b>	<b>45</b>
III.4.1	Analyse des grandeurs mécanique (couple électromagnétique).....	46
III.4.2	L'analyse du courant d'une phase statorique dans le régime permanent.....	50
<b>III.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>55</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>51</b>



## Listes des Figures

Figure I-1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurueil .....	4
Figure I-2 Stator d'une machine asynchrone basse tension.....	5
Figure I-3 Rotor à cage d'écurueil .....	5
Figure I-4 Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique .....	8
Figure I-5 Les défauts statoriques .....	9
Figure I-6 Démodulation basé sur la transformée de Hilbert.....	15
Figure I-7 Illustration du théorème de Bedrosian .....	16
Figure I-8 Vecteur de Park des courants statoriques (Cas d'un moteur sain).....	18
Figure I-9 Vecteur de Park des courants statoriques (Cas d'un moteur avec défaut) .....	18
Figure II-1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée. ....	22
Figure II-2 Schéma Simulink de la tension d'alimentation statorique triphasée .....	25
Figure II-3 Relation entre abc et qdo.....	25
Figure II-4 Schéma de la transformation de Park .....	29
Figure II-5 Schéma transformation de Park inverse.....	29
Figure II-6 Schéma bloc l'axe q .....	34
Figure II-7 Schéma bloc de l'axe d .....	36
Figure II-8 Schéma couple électromagnétique .....	38
Figure II-9 Schéma Zéro séquence.....	38
Figure II-10 Les composants du roulement .....	39
Figure II-11 Schéma bloc du couple électromagnétique avec défaut des roulements .....	40
Figure II-12 Schéma des défauts roulement .....	42
Figure III-1 Evolution temporelle de couple à l'état sain.....	46
Figure III-2 Evolution temporelle de couple en présence défaut de la bague intérieure.....	47
Figure III-3 Densité spectrale de puissance de couple en présence défaut de la bague .....	47
Figure III-4 Evolution temporelle de couple avec défaut de la bague extérieure .....	48
Figure III-5 Densité spectrale de puissance de couple en présence défaut de la bague extérieure.....	48
Figure III-6 Evolution temporelle de couple en présence défaut de la bille .....	49
Figure III-7 Densité spectrale de puissance de couple en présence défaut de la bille.....	49
Figure III-8 Evolution du courant statorique d'une phase à vide et en charge .....	51
Figure III-9 Densité spectrale de puissance de courant statorique à l'état sain .....	51
Figure III-10 Evolution temporelle de courant statorique en présence défaut de la bague intérieure .....	52
Figure III-11 Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence défaut de la bague intérieure .....	52
Figure III-12 Evolution temporelle du courant d'une phase statorique en présence d'un défaut de la bague externe .....	53
Figure III-13 Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence d'un défaut de la bague externe.....	54
Figure III-14 Evolution temporelle du courant statorique en présence défaut de la bille .....	54
Figure III-15 Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence défaut de la bille .....	55

## Liste des tableaux

Tableau I-1 La signature fréquentielle de certains défauts .....	13
Tableau III-1 Les paramètres de la machine .....	44
Tableau III-2 caractéristiques du roulement à bille .....	45

# Liste des abréviations

EPVA: (Extended Park's Vector Approach)

FFT: Frequency Fourier Transform

MCSA: Motor Current Signature Analysis

MI: Motor Induction

MAS: Machine Asynchrone

DSP : Densité Spectrale Puissance

P : Puissance instantanée

M : Indice de modulation

$V_{LL}$  : Valeur efficace de la tension entre phase de l'alimentation

$I_L$  : Courant de ligne.

$\omega_{osc}$  : Pulsation d'oscillation (pulsation de défaut).

$\omega$  : Pulsation des courants d'alimentation.

$\varphi$  : Déphasage entre le courant absorbé par le moteur et la tension d'alimentation.

$\theta_r$  : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique dans l'espace électrique.

$S_a, S_b, S_c$  Enroulements du stator

$R_a, R_b, R_c$  Enroulements du rotor

$r_s$  : Résistance par phase du stator

$r_r$  : Résistance par phase du rotor

$[L_{ss}]$ : Représente la matrice d'inductance statorique

$[L_{rr}]$ : Représente la matrice d'inductance rotorique

$[L_{sr}^{abc}]$ : Représente la matrice des inductances mutuelles stator-rotor

$L_{ls}$  : Inductance de fuite statorique par phase.

$L_{lr}$  : Inductance de fuite rotoriques par phase.

$L_{ss}, L_{rr}$  : Inductances statorique et rotorique.

$L_{sm}$  : Inductance mutuelle statorique.

$L_{rm}$  : Inductance mutuelle rotorique.

$L_{sr}, L_{rs}$  : Valeurs maximales des inductances mutuelles, respectivement du stator

$P_{in}$  : Puissance à l'entrée de la machine à induction

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique transmise au rotor

$P_{loss}$  : Puissance de perte dans le cuivre

$P_{mm}$  : Représente le taux d'échange de l'énergie du champ magnétique entre les enroulements

$T_{em}$  : Couple électromécanique

$\omega_{rm}$  : Vitesse angulaire mécanique du rotor

$E$  : Représente le taux d'énergie converti en travail mécanique

$L_m$  : Inductance magnétisante lié au stator

$N_r$  : Nombre de spire rotorique

$N_s$  : Nombre de spire statorique

$i \frac{d\phi}{dt}$  : Taux de l'échange de l'énergie magnétique entre les enroulements

$P$  : Nombre de pôles de la machine

$\omega_{rm}, \omega_r$  : Les vitesses de rotation mécanique et électrique du rotor

$\omega_b$  : Valeur de base de la fréquence angulaire

$f$  : Fréquence d'alimentation

$T_{load}$  : Couple mécanique appliqué par la charge

$T_{damp}$  : Couple de frottement dans le sens opposé à la rotation du rotor

H : Constante d'inertie

$d$  : Diamètre de l'élément roulant

$D$  : Diamètre primitif

Z : Nombre d'éléments roulants

$\alpha$  : Angle de contact

$f_{bo}$  : Fréquence caractéristique de la bague externe

$f_r$  : Fréquence de rotation mécanique du rotor

$f_{bi}$  : Fréquence caractéristique de la bague interne

$f_c$  : Fréquence caractéristique de la cage

$f_b$  : Fréquence caractéristique de la bille

$\phi_{ds}$  : Flux statorique de l'axe d

$\phi_{qs}$  : Flux statorique de l'axe q

$i_{qs}$  : Courant statorique de l'axe q

$i_{ds}$  : Courant statorique de l'axe d

$\phi_{dr}$  : Flux rotorique de l'axe d

$\phi_{qr}$  : Flux rotorique de l'axe q

$i_{qr}$  : Courant rotorique de l'axe q

$i_{dr}$  : Courant rotorique de l'axe d

$V_{as}$  : Tension statorique de phase a

$V_{bs}$  : Tension statorique de phase b

$V_{cs}$  : Tension statorique de phase c

$i_{as}$  : Courant statorique de phase a

$i_{bs}$  : Courant statorique de phase b

$i_{cs}$  : Courant statorique de phase c

$f_r$  : Fréquence de rotation

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Dans de nombreux secteurs industriels, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont des enjeux majeurs pour assurer une continuité optimale de l'outil de production. Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoquera des pertes économiques considérables. Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter n'importe quel défaut ou changement dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale.

Dans la pratique scientifique et technique, les algorithmes de diagnostic de la machine à l'induction sont testés sur des bancs d'essai à l'aide d'équipements défectueux réels, qui ne sont pas toujours disponibles. Les tests sur des modèles mathématiques peuvent être une étape préliminaire dans le débogage des algorithmes de diagnostic [1]. Ce type de débogage permet d'apporter des ajustements supplémentaires au programme de microcontrôleur avant les expériences sur le terrain. Par conséquent, le développement de modèle de défaillance de moteur à l'induction est l'une des tâches les plus importantes dans le développement global des algorithmes de diagnostic des moteurs.

La modélisation mathématique d'un moteur asynchrone est une étape importante pour la conception et la maintenance des systèmes d'entraînement de moteur. Il valide le processus et minimise les erreurs de conception pendant le processus de fabrication et de test. Cette modélisation est généralement réalisée à l'aide de SIMULINK/MATLAB.

Notre travail sera structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre présente la constitution de la machine asynchrone. Ensuite, le principe de fonctionnement du moteur est détaillé, ainsi que les différentes défaillances auxquelles il peut être sujet. Ce chapitre se termine en abordant les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts du moteur.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter un modèle de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil à l'état sain, et lorsqu'il présente un défaut mécanique (défaut de roulement). L'outil informatique utilisé pour faire cette simulation est MATLAB/SIMULINK.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation obtenus à partir du modèle approuvé. Les résultats sont analysés et interprétés pour évaluer le comportement du moteur dans des conditions saines et en présence des défauts.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives portant sur l'ensemble du travail effectué.



**Chapitre I: Défaillances et Synthèse des  
Méthodes de Diagnostic du Moteur  
Asynchrone**

## **I.1 Introduction**

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Les machines asynchrones triphasées à cage d'écurueil sont les plus fréquemment utilisées en raison de leur robustesse, de leur simplicité de construction et de leur bas coût. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leur durée de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes. Les contraintes industrielles en fiabilité, disponibilité et sécurité des équipements sont par ailleurs très fortes. C'est pourquoi il est intéressant d'estimer l'état de santé de ces machines [2].

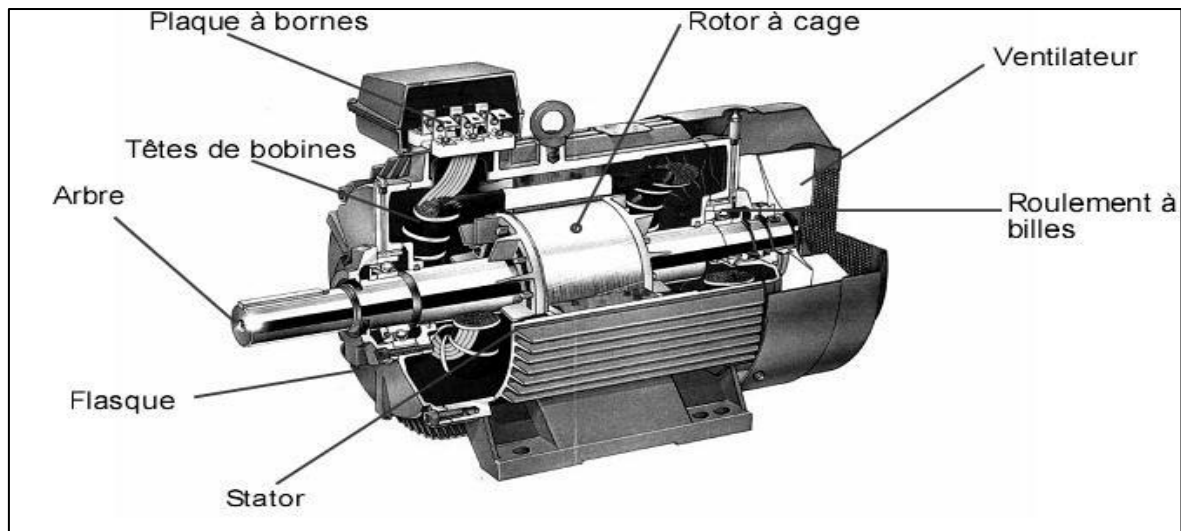
En premier lieu, nous nous intéresserons aux différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone et provoquer des pannes afin d'analyser et comprendre les effets de ces défauts sur le comportement de la machine.

Actuellement, dans le domaine industriel, il existe plusieurs outils classiques de surveillance et de diagnostic des systèmes d'entraînements électriques utilisant des méthodes d'analyse vibratoire ou acoustique. Mais ces méthodes sont spécialisées dans la surveillance des défauts qui apparaissent au niveau des roulements, elles présentent des difficultés tels que la fixation des capteurs, donc l'accessibilité à l'information et aussi le problème de dissocier les différents types de défauts qui peuvent affecter la machine. De nouvelles approches utilisant les techniques de l'automatique, méthodes que nous développerons dans le cadre de notre travail, permettent de s'affranchir de ces problèmes.

## **I.2 Construction de la machine asynchrone**

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes [3] :

- 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* Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

### I.2.1 Le stator

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

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

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur (la figure I.2) les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.

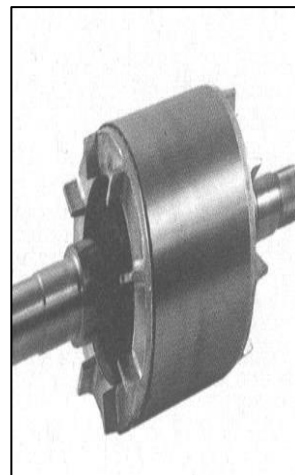
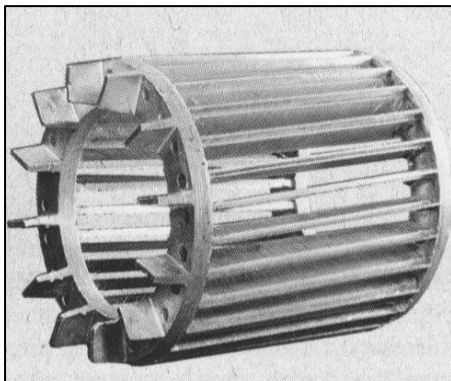


*Figure I-2 Stator d'une machine asynchrone basse tension*

### I.2.2 Le rotor

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

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



*Figure I-3 Rotor à cage d'écureuil*

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait. Nous donnons une photographie en (Figure I.3) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoches au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre (la figure I.1).

### I.2.3 Les paliers

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

## I.3 Défaillance machine asynchrone

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes [4]:

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survoltage d'alimentation...
- Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.

### I.3.1 Défaillances au rotor

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte. Ces défaillances sont essentiellement dues à un problème : [5]

- Thermique (surcharge,)
- Electromagnétique
- Résiduel (déformation,)
- Dynamique (arbre de transmission,)
- Mécanique (roulement,...)
- Environnemental (agression,...)

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

### ***Rupture de barres rotoriques***

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [5]

### ***Rupture de portion d'anneau***

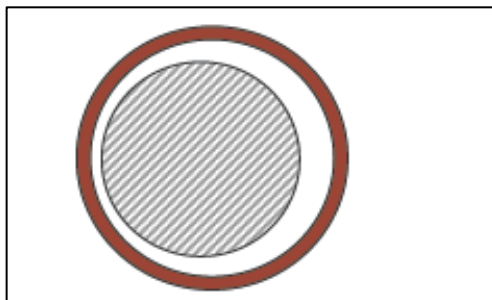
La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [5]

### *Excentricité*

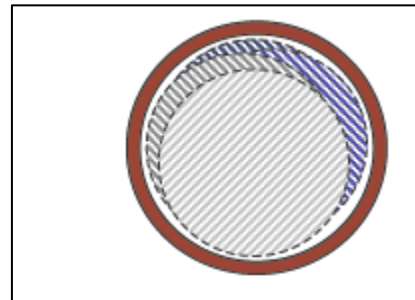
L'excentricité de la machine est définie comme une asymétrie dans l'entrefer du vide qui existe entre le stator et le rotor. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est permis par d'autre utilisateur. [5]

L'excentricité se répartie en deux catégories. Excentricité statique et excentricité dynamique.

- L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. Elle résulte soit d'une imperfection dans l'alésage du stator, soit d'un mauvais positionnement du rotor et/ou du stator à l'assemblage. Supposant que l'arbre du rotor est suffisamment raide, le niveau de l'excentricité statique ne change pas.
- L'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator. Elle peut être provoquée par plusieurs facteurs, tels que des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement, résonance mécanique à la vitesse critique, ou aussi à des pièces endommagées à la fabrication.



*a) Excentricité statique*



*b) Excentricité dynamique*

**Figure I-4** Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

### **I.3.2 Défaillances au stator**

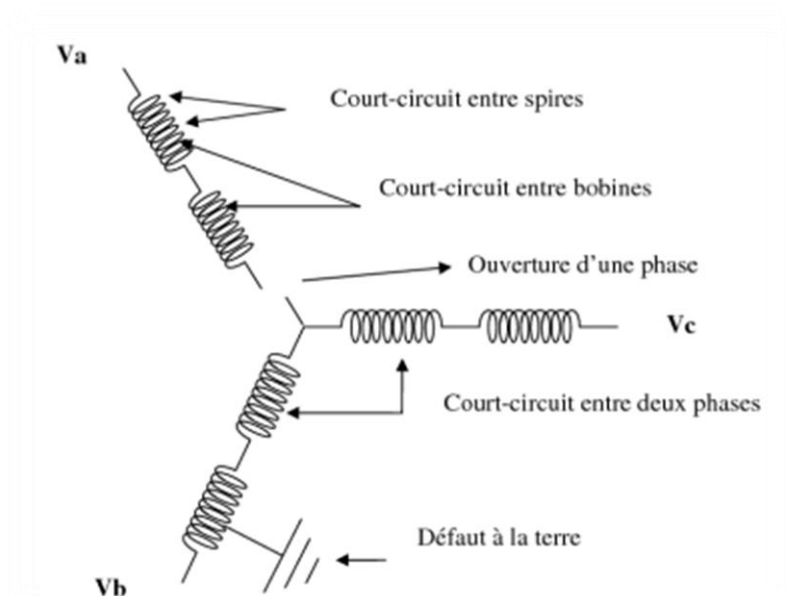
Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème : [6]

- thermique (surcharge,...).
- électrique (diélectrique,...).
- mécanique (bobinage,...).
- environnemental (agression,...).

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

comme suit :

- Court-circuit entre spires ;
- Court-circuit entre bobines ;
- Déséquilibre d'alimentation.
- Défaut d'isolant.



*Figure I-5 Les défauts statoriques*

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages.

En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile, poussière et humidité viennent de déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs.

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

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer un court-circuit. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, ...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. [6] De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les



différentes causes pour ce type de défaut sont : [7]

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

### *Court-circuit entre spires*

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [7]

### *Court-circuit entre phases*

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre

des courants de phases.

### ***Défaut de circuit magnétique***

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant [8], etc...

### **I.3.3 Défaillances d'ordre mécanique**

Les défaillances mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Les défauts qui sont les plus récurrents d'ordre mécanique peuvent être définis comme suit :

- Défauts des roulements à billes.
- Défauts de l'arbre moteur.
- Défauts créés par les flasques.

Ces différents problèmes sont traités d'une manière complète dans les ouvrages. [9]

### ***Défauts des roulements***

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix. [10]

Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure
- Défaut de bague intérieure
- Défaut de bille
- Défaut à cage

### ***Défauts de l'arbre moteur***

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [10].

### ***Défauts créés par les flasques***

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [10]

## **I.4 Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone**

L'amélioration de la fiabilité et la disponibilité de la machine asynchrone dans les différentes applications industrielles nécessitent la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance adéquate. [11] Afin de diminuer les coûts de la maintenance et de l'arrêt du processus en cas de défaillance, il est obligatoire de mettre en place une surveillance en temps réel du dispositif.

### **I.4.1 Surveillance de la machine asynchrone**

La surveillance de la machine asynchrone peut être réalisée en mesurant les vibrations au niveau de la machine. En effet, tous les défauts introduisent des vibrations supplémentaires sur le système électromécanique. Ces vibrations excessives sont utilisées comme indicateur de défauts dans différents domaines industriels tels que les éoliennes, la traction électrique, etc. Or, ces techniques sont onéreuses et nécessitent des capteurs supplémentaires. [11]

Les défauts de la machine asynchrone peuvent conduire à des oscillations de couple et un déséquilibre au rotor. Par conséquent, la surveillance du couple a été proposée pour la

détection des défauts Toutefois, l'installation des capteurs de couple doit être réalisée sur l'arbre rotor ce qui rend le système de surveillance complexe et coûteux. La surveillance des roulements peut être réalisée en se basant la température. La température du roulement ne doit pas augmenter de plus de 45°C. Cependant, la température peut être affectée par d'autres paramètres tels que l'environnement, la vitesse de rotation, le couple développé, etc. L'analyse de la composition, le contenu, la taille et la classification des particules d'usure dans l'huile de lubrification des roulements et de nombreux autres composants de la machine asynchrone permettent de déterminer leur état de fonctionnement. De nombreuses autres méthodes existent telles que la surveillance des émissions acoustiques, la surveillance des flux, etc. Néanmoins, ces techniques sont plus compliquées à mettre en œuvre dans des applications réelles et nécessitent des capteurs supplémentaires, ce qui augmente le prix, la complexité du système de surveillance et peut diminuer la fiabilité de l'ensemble du système puisque ces éléments sont également assujettis à des défaillances.

#### **I.4.2 Surveillance à travers l'analyse des courants statoriques**

Les défauts qui peuvent survenir sur des machines électriques ont un impact direct sur le contenu fréquentiel des courants statoriques ou rotoriques [11]. Le Tableau I.1 donne, dans le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, la signature fréquentielle de certains défauts.

**Tableau I-1 La signature fréquentielle de certains défauts**

<b>Défauts</b>	<b>Signatures fréquentielles</b>
Excentricité	$f_{exc} = f_s [1 \pm k (\frac{1-s}{n})]$
Rupture de barre rotorique	$f_{brb} = f_s [1 \pm 2k_s]$
Défauts de roulement	$f_{bng} = f_s \pm kf_d$
Oscillation de couple	$f_{osc} = f_s [1 \pm k (1-s)/n]$

$f_s$  : Fréquence fondamentale d'alimentation.

$f_d$  : Fréquence dépendant de l'élément défaillant et de la géométrie du roulement.

P : Nombre de pair de pôles.

s : glissement.

k= 1, 2, 3,....

L'extraction de l'information contenue dans les signaux discrets concernant le défaut nécessite le passage du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. La transformée de Fourier rapide (FFT) est l'un des outils utilisés dans le cas des signaux stationnaires (machines fonctionnant en régime permanent, défauts impactant des composantes fréquentielles constantes au cours du temps, glissement constant (couple de charge constant)). Ces approches souffrent d'une mauvaise résolution en cas d'acquisition sur une courte durée. Des connaissances a priori sur le signal permettent d'exploiter des méthodes paramétriques afin d'améliorer la résolution fréquentielle. Cela est dû à leur capacité à distinguer des raies spectrales très proches. Ces techniques sont généralement appelées méthodes à haute résolution et comprennent trois sous-classes : les méthodes de prédiction linéaire, les techniques de sous-espace et l'estimation par le maximum de vraisemblance.

### **I.5 Méthodes de diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones**

Actuellement, dans le domaine industriel, il existe plusieurs outils classiques de surveillance et de diagnostic des systèmes d'entraînements électriques utilisant des méthodes d'analyse vibratoire ou acoustique. Mais ces méthodes sont spécialisées dans la surveillance des défauts qui apparaissent au niveau des roulements, elles présentent des problèmes de fixation des capteurs, donc l'accessibilité à l'information et aussi le problème de dissocier les différents types de défauts qui peuvent affecter la machine. De nouvelles approches utilisant les techniques de l'automatique, méthodes que nous développerons dans le cadre de notre travail, permettent de s'affranchir de ces problèmes.

#### **I.5.1 Analyse de la densité spectrale de puissance (DSP) du courant statorique pour la détection des défauts**

Un signal est un support de l'information mesurée par un capteur et destinée à un récepteur. Dans le cas des machines asynchrones, les courants statoriques ou rotoriques sont mesurés principalement pour réaliser du contrôle/commande. Ces mêmes courants peuvent être utilisés pour réaliser le diagnostic et la surveillance de ces systèmes. En environnement stationnaire, la recherche de la signature du défaut est réalisée en utilisant des techniques d'estimation de la densité spectrale de puissance. [11] Ces techniques regroupent deux classes qui sont le périodogramme et ses extensions et les techniques à haute résolution (MUSIC et ESPRIT).

Les techniques d'analyse spectrale sont illustrées pour des signaux issus d'un banc expérimental avec un défaut de rupture de barres. Les courants statoriques triphasés sont échantillonnés à une fréquence  $f_s = 1\text{KHz}$  d'échantillonnage de et pendant  $t = 1\text{s}$ .

### I.5.2 La transformée de Hilbert

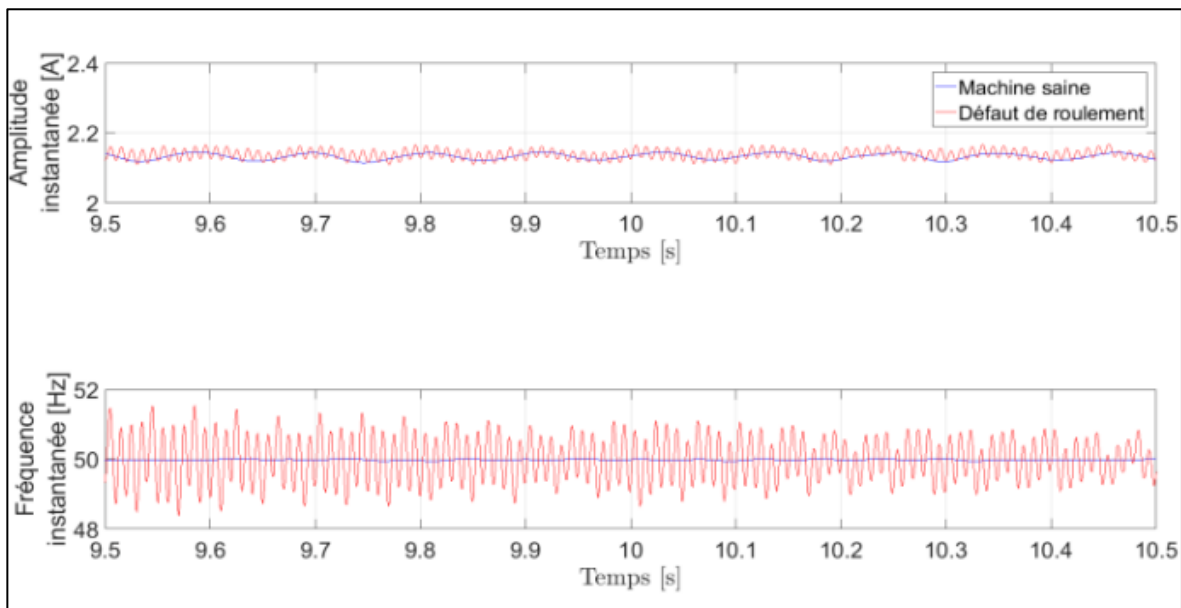
La transformée de Hilbert permet de calculer le signal analytique et est définie pour un signal discret comme suit :[11]

$$y_2^n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[n-m]x[n] \quad (I.1)$$

Où la réponse impulsionnelle est donnée par :

$$h[n] = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{n}, & n \neq 0 \\ 0, & n=0 \end{cases} \quad (I.2)$$

Les résultats de simulation en utilisant la transformée de Hilbert sont données sur la (figure I.6) Les mêmes conclusions que celles déduite dans le cas du démodulateur synchrone peuvent être présentées.



**Figure I-6** Démodulation basé sur la transformée de Hilbert

L'estimation de la fréquence instantanée et de l'amplitude instantanée est possible et unique si et seulement si le spectre de  $a[n]$  et de  $\cos(\phi[n])$  son disjoint. Il est à noter que la transformée de la transformée de Hilbert peut être calculée en utilisant la FFT.

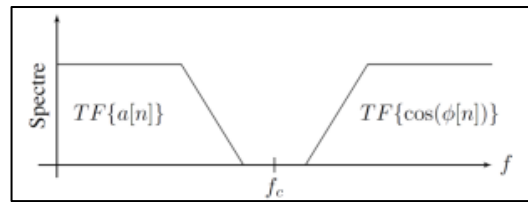


Figure I-7 Illustration du théorème de Bedrosian

### I.5.3 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [12]

Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA).

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une  $F_{mm}$  pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est (sf), cette  $F_{mm}$  produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence  $(1-2s)f$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1+2s)f$ .

### I.5.4 Transformée De Fourier (FFT)

La défaillance de la machine à induction provoque l'apparition et/ou la modification d'harmoniques au niveau des spectres des signaux, la Transformée de Fourier (FFT) est une méthode non paramétrique dédiée à l'analyse des phénomènes stationnaires.

La composante à la fréquence  $f$  d'un signal temporel  $x(t)$  s'exprime par :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi f.t} dt \quad (\text{I.3})$$

L'analyse d'un signal se fait sur un intervalle connu, ce qui engendre la nécessité de choix d'une fenêtre de pondération pour l'analyse (fenêtre de Blackmann, de Hanning,...), plus la taille de la fenêtre qui aura une influence sur la résolution.

Par contre, la FFT nécessite un volume de calcul important et présente des limites lors de l'analyse en régime transitoire, car elle est utilisée pour l'analyse en régime permanent [13]

### **I.5.5 Analyse du module du vecteur de Park**

Cette technique de diagnostic basée sur une représentation en deux dimensions du courant du moteur peut être utilisée pour détecter et localiser les défauts dans les moteurs asynchrones. Le courant du stator est représenté par deux composantes perpendiculaires  $i_d(t)$  et  $i_q(t)$  en fonction des courants de phase de l'alimentation  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$ . En fonction des variables de phase du réseau ( $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$ ), le moteur composantes actuelles du vecteur de Park ( $i_d(t)$ ,  $i_q(t)$ ). Ces composantes peuvent être calculées grâce à la transformation de Park [14] :

$$\begin{cases} i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c(t) \\ i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c(t) \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Dans des conditions idéales, les courants triphasés conduisent à un vecteur de Park avec les composants suivants : [14]

$$\begin{cases} i_d(t) = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{m+} \sin \omega t \\ i_q(t) = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{m+} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

$i_{m+}$  : Valeur maximale du courant de phase d'alimentation (A)

$\omega$ : Angular supply fréquence (rads)

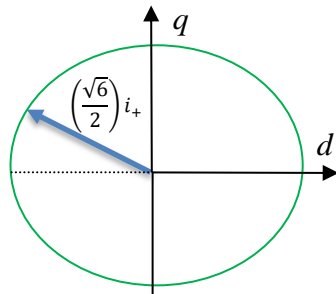
$t$ : Time variable (s)

La représentation correspondante est un lieu circulaire centré à l'origine des coordonnées. Dans des conditions anormales, ne sont plus valides et par conséquent l'image



observée diffère du motif de référence. La philosophie de fonctionnement de l'approche vectorielle de Park est donc basée sur l'identification d'un motif de signature unique dans les chiffres obtenus, correspondant au vecteur de Park actuel du moteur en représentation.

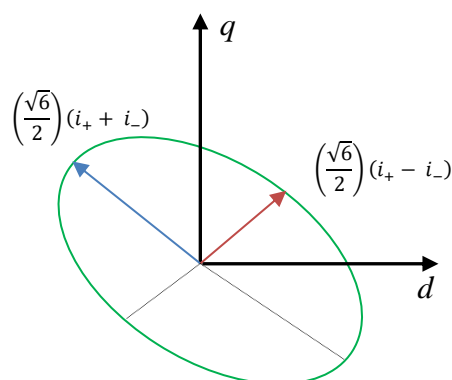
Un simple calcul du module du vecteur de Park montre qu'il est constant. La méthode du vecteur de Park consiste à tracer le courant  $i_q(t)$  en fonction du courant  $i_d(t)$ . Dans le cas idéal



d'un moteur sain, ce tracé est représenté un cercle parfait ayant comme rayon le module du vecteur de Park (figure I.8).

**Figure I-8** Vecteur de Park des courants statoriques (Cas d'un moteur sain)

Dans des conditions anormales (rotor défaillant, une barre cassée), les équations (I.4 et I.5) ne sont plus valables. De ce fait, le module du vecteur de Park contient une partie dominante continue et une alternative, dont l'existence est directement liée à l'asymétrie due au défaut, voir figure (I.9).



**Figure I-9** Vecteur de Park des courants statoriques (Cas d'un moteur avec défaut)

### **I.5.6 Analyse spectrale du module du vecteur de Park (EPVA)**

L'analyse spectrale du module du vecteur de Park, connue sous le nom de « EPVA », (Extended Park's Vector Approach), traite de la signature du module du vecteur de Park en cas de défaillance du moteur.

Afin de discriminer l'information contenue dans le module du vecteur de Park actuel, une nouvelle technique a été introduite, la soi-disant EPVA (Extended Park's Vector Approach). , qui est le résultat d'une analyse spectrale du niveau alternatif du courant d'alimentation du moteur. Cette nouvelle mise en œuvre de l'approche vectorielle du Park combine la simplicité de l'ancienne technique et le détaillé tel qu'il donné par l'analyse spectrale ,De plus, en tenant compte de la courant dans les trois phases, l'EPVA fournit un spectre plus significatif que celui obtenu par le moteur conventionnel analyse spectrale actuelle.[14]

### **I.5.7 Analyse spectrale de la puissance électrique**

Dans ce cas, à la place du courant statorique, la puissance instantanée est utilisée comme un moyen pour la détection de défauts mécaniques dans un système d'entraînement par l'analyse de signature [15]. Il a été démontré que le volume des informations transportées par la puissance instantanée, qui est le produit de la tension d'alimentation et du courant du moteur, est plus élevé que celui déduit uniquement du courant. En fait, outre la composante du fondamental et les deux composantes des bandes latérales classiques, le spectre de la puissance instantanée contient une composante supplémentaire directement liée à la modulation la fréquence, comme le montre les relations suivantes :

$$p(t) = p_0(t) + \frac{MV_{LL}I_L}{2} \left\{ \cos \left[ (2\omega - \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + \cos \left[ (2\omega + \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + 2 \cos \left( \varphi + \frac{\pi}{6} \right) \cos(\omega_{osc}t) \right\} \quad (I.6)$$

Avec :

$$p_o(t) = V_{LL}I_L \left[ \cos \left( 2\omega t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right) + \cos \left( \varphi + \frac{\pi}{6} \right) \right] \quad (I.7)$$

## **I.6 Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition.

En fin de chapitre nous avons présenté un état de l'art des différentes méthodes de diagnostic des défauts dans le moteur asynchrone. Dans un premier temps nous nous sommes intéressés aux méthodes de diagnostic basées sur la mesure de signaux électriques, vibratoires, rendant directement compte de l'état de la machine. Les techniques utilisées sont l'analyse de la signature du courant, l'analyse spectrale du module de Park du courant ou du flux, la puissance spectrale du courant ou du flux et analyse spectrale de la puissance instantanée.

Ces méthodes donnent un large éventail de signatures plus ou moins pertinentes vis-à-vis des différents défauts pouvant se produire sur un moteur électrique. Ces méthodes ne doivent pas être mises en concurrence, mais au contraire peuvent être utilisées de manière complémentaire pour tirer une partie de leurs avantages respectifs.

## **Chapitre II: Modélisation et simulation de la Machine à Induction**

## II.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et mécaniques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible.

Plusieurs voies de modélisation existent. Elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de faire le diagnostic.

La mise au point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle capable tenir compte de sa structure et rendre compte du comportement transitoire de celle-ci. Pour ce faire, il faut s'orienter vers le modèle du repère qd0 afin de pouvoir représenter une description mieux adaptée aux défauts.

## II.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :

Le modèle de la MAS triphasé est illustré par le schéma de la Fig. (II.1) avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator:  $S_a, S_b, S_c$ . Et pour les trois enroulements rotoriques  $R_a, R_b, R_c$ , et  $\theta_r$  Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique dans l'espace électrique. [16]

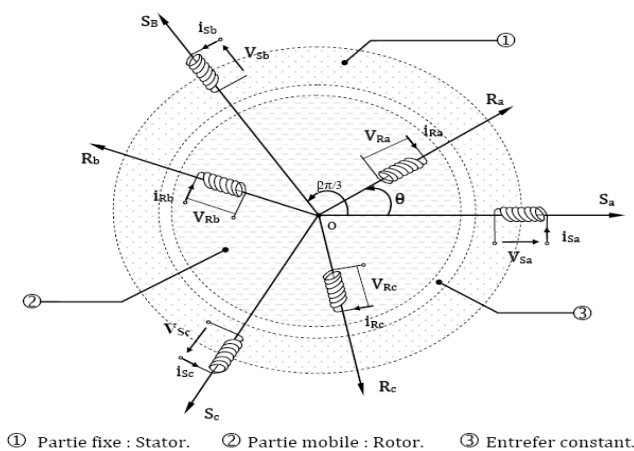


Figure II-1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

### II.3 Modélisation et simulation de la machine asynchrone à l'état sain :

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont :

*Loi de Faraday*

La loi de Faraday dit que la force électromotrice induite dans un bobinage fermé placé dans un champ magnétique est proportionnelle à la variation au cours du temps du flux du champ magnétique qui entre dans le circuit

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

En appliquant la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine asynchrone et Nous obtenons des équations de tension statoriques et rotoriques Respectivement :

$$V_s^{abc} = r_s i_s^{abc} + \frac{d\phi_s^{abc}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$V_r^{abc} = r_r i_r^{abc} + \frac{d\phi_r^{abc}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

On définit de même, par changement d'indices les vecteurs rotoriques les flux couplés statoriques et rotoriques sont obtenus à partir des inductances propres et mutuelles :

$$\phi_s^{abc} = L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \quad (\text{II.4})$$

$$\phi_r^{abc} = L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc}$$

Avec :

$$\mathbf{L}_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\mathbf{L}_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = \left[ \mathbf{L}_{rs}^{abc} \right]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les équations ci-dessus montrent que les équations de tension du stator et du rotor sont Couplés l'un à l'autre par les termes d'inductance mutuelle, qui sont une fonction de l'angle du rotor, En introduisant (II.7) dans (II.4) et (II.6), on obtient :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_s^{abc} = r_s \mathbf{i}_s^{abc} + \frac{d}{dt} \left( L_{ss} \mathbf{i}_s^{abc} + L_{sr} \mathbf{i}_r^{abc} \right) \\ \mathbf{V}_r^{abc} = r_r \mathbf{i}_r^{abc} + \frac{d}{dt} \left( L_{sr} \mathbf{i}_s^{abc} + L_{rr} \mathbf{i}_r^{abc} \right) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Du fait des termes trigonométriques contenus dans la matrice des inductances mutuelles  $[\mathbf{L}_{sr}]$ , les coefficients des équations différentielles sont des variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables.

Au Simulink on peut écrit le modèle de bloc de l'alimentation sous forme :

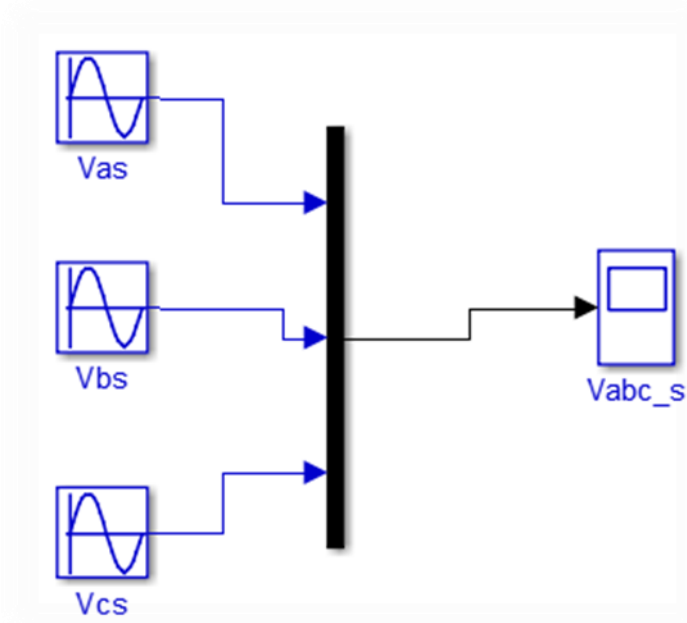


Figure II-2 Schéma Simulink de la tension d'alimentation statorique triphasée

$$V_{as} = V_m \cos \omega_e t \tag{II.9}$$

$$V_{bs} = V_m \cos \left( \omega_e t - \frac{2\pi}{3} \right) \tag{II.10}$$

$$V_{cs} = V_m \cos \left( \omega_e t + \frac{2\pi}{3} \right) \tag{II.11}$$

### II.3.1 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone qd0 :

La transformation du Park est bien connue transformation triphasée à biphasée dans l'analyse des machines synchrones. L'équation de transformation est de la forme : [17]

$$[f_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta)] [f_{abc}] \tag{II.12}$$

où la matrice de transformation dq0 est définie comme :

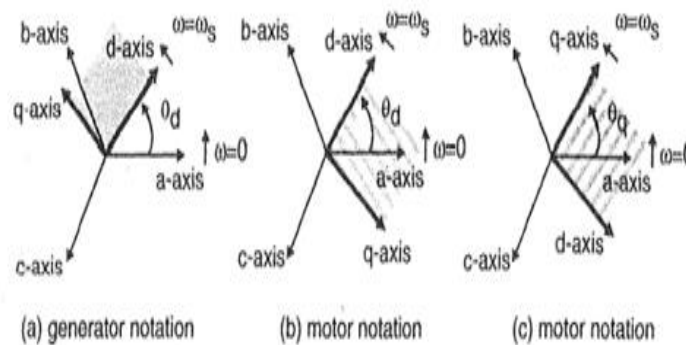


Figure II-3 Relation entre abc et qdo



$$[T_{dq0}(\theta_d)] = \begin{pmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_d & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

et son inverse est donné par :

$$[T_{dq0}(\theta_d)]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & 1 \\ \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

d'autres utilisent une transformation dq0 dans laquelle l'axe q précède l'axe d et la transformation est généralement exprimée en termes d'angle,  $\theta_q$ , entre l'axe q et l'axe a, comme indiqué dans la figure (II.3).

La transformation de Park est utilisée pour transformer les quantités de stator d'une machine synchrone en un cadre de référence qd0 qui est fixé au rotor, avec un axe d positif aligné avec l'axe magnétique de l'enroulement de champ. L'axe q positif est défini comme menant l'axe d positif de  $\frac{\pi}{2}$  dans la transformation de park d'origine. La tension interne  $\omega L_{af} i_f$  est le long de l'axe q positif.

Certains auteurs définissent l'axe q comme étant en retard sur l'axe d de  $\pi/2$ . Défini de la manière, l'axe q coïncide avec la tension induite, qui est le négatif de la tension interne. La transformation avec l'axe q en retard sur l'axe d est donnée par :

$$[T_{dq0}(\theta_d)] = \begin{pmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_d & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

D'autres utilisent une transformation dq0 dans laquelle l'axe q précède l'axe d et la transformation est généralement exprimée en termes d'angle  $\theta_q$ , entre l'axe q et l'axe a, comme le montre (la figure II.2-II.3).

$$[F_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta_d)][F_{abc}]$$

Où :

$$[T_{qd0}(\theta_d)] = \begin{pmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta_d & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Cette matrice est orthogonale, c'est-à-dire  $[T_{qd0}]^T = [T_{qd0}]^{-1}$

La fonction de transformation inverse de Park peut s'écrire

$$[T_{qd0}(\theta_d)]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_d & \sin \theta_d & 1 \\ \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

la relation  $\theta_q$  et  $\theta_d$ , qui est définie dans la transformation du Park d'origine est :

$$\theta_q = \theta_d + \frac{\pi}{2}$$

en remplaçant la relation ci-dessus par  $[Tdq0(\theta_q)]$  et  $[Tdq0(\theta_d)]$  sont fondamentalement les mêmes, à l'exception de l'ordre des variables d et q.

Les éléments de la vectrice colonne  $f_{qd0}$  et  $f_{abc}$  peuvent être les tensions, courants ou le flux de la machine,  $[T_{qd0}]$  Est la matrice de transformation  $qd0$  La transformation inverse est utilisée pour retrouver les grandeurs triphasées correspondant.

Les fonctions de transformation (2.12) et (2.14) sont appliqués aux tensions, aux Courants et aux résistances dans l'équation. (2.3) et l'équation (2.4). Cela donne :

$$V_s^{qd0} = T_{qd0}(\theta) r_s T_{qd0}^{-1}(\theta) i_s^{qd0} + T_{qd0}(\theta) \frac{d}{dt} [T_{qd0}^{-1}(\theta) \phi_s^{qd0}] \quad (\text{II.17})$$

Le terme dérivé temporel suivant peut-être exprimé comme

$$\frac{d\left[T_{qd0}^{-1}(\theta)\phi_s^{qd0}\right]}{dt} = \frac{d\left[T_{qd0}^{-1}(\theta)\right]}{dt} \cdot \phi_s^{qd0} + T_{qd0}^{-1}(\theta) \cdot \frac{d(\phi_s^{qd0})}{dt} \quad (\text{II.18})$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_s^{qd0} \\ \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_s^{qd0} + T_{qd0}^{-1}(\theta) \cdot \frac{d(\phi_s^{qd0})}{dt} \\ \phi_s^{qd0} \end{bmatrix}$$

$$V_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r) r_r T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) i_r^{qd0} + T_{qd0}(\theta - \theta_r) \frac{d}{dt} \left[ T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) \phi_r^{qd0} \right] \quad (\text{II.19})$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue le modèle de la machine

$$V_s^{qd0} = r_s^{qd0} i_s^{qd0} + E_s^{qd0} + \frac{d\phi_s^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.20})$$

$$V_r^{qd0} = r_r^{qd0} i_r^{qd0} + E_r^{qd0} + \frac{d\phi_r^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$E_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_s^{qd0} \quad E_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_r^{qd0}$$

$$r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad r_r^{qd0} = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \omega_r = \frac{d(\theta_r)}{dt}$$

Les termes  $i_r$  sont les tensions produisant des pertes de cuivre, les termes E

Représentent le taux d'énergie converti en travail mécanique, les termes  $\frac{d}{dt}$  représentent le taux d'échange du champ magnétique entre les enroulements. On peut écrire le modèle de transformation de Park et Park inverse sous forme :

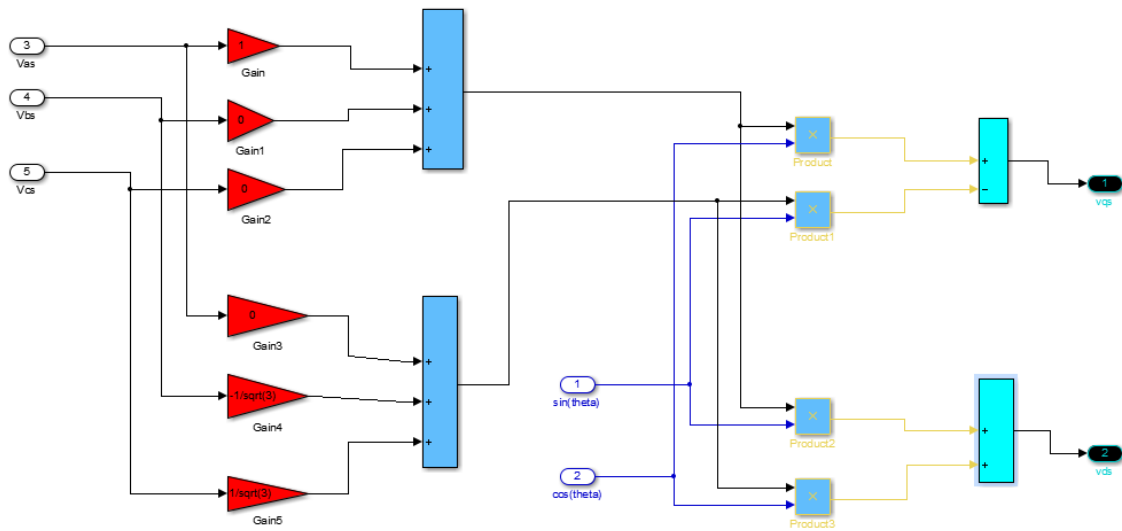


Figure II-4 Schéma de la transformation de Park

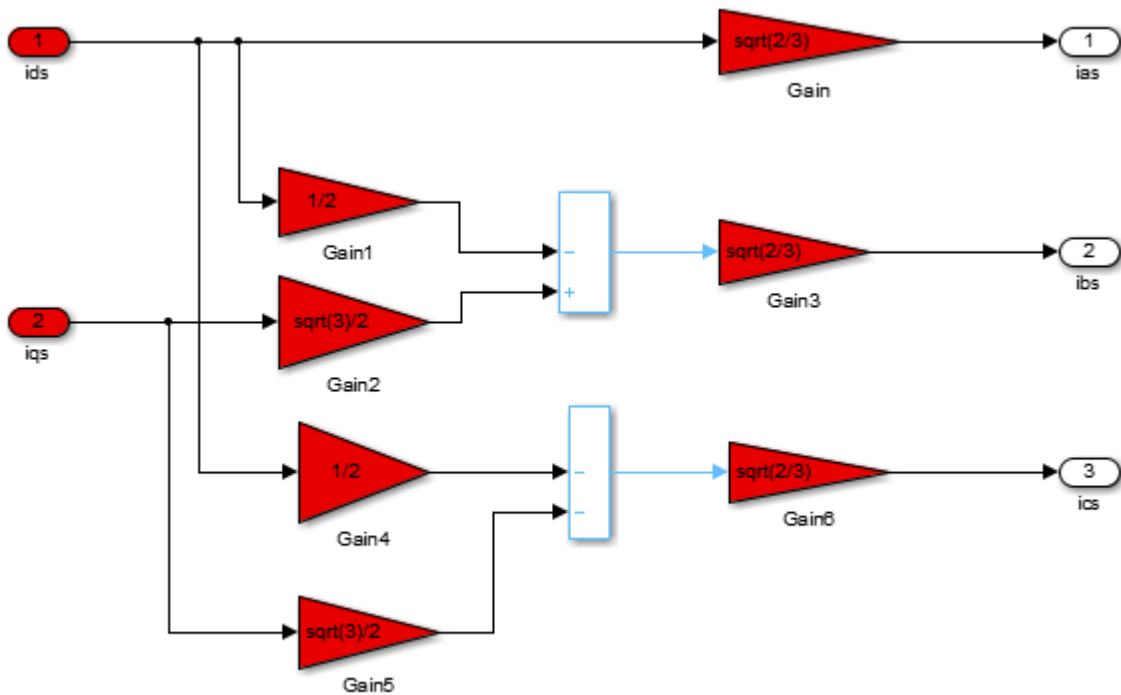


Figure II-5 Schéma transformation de Park inverse

Transformation de Park

$$V_{qs} = V_{as} \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{bs} \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{cs} \sin \theta \quad (\text{II.22})$$

$$V_{ds} = V_{as} \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{bs} \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{cs} \sin \theta \quad (\text{II.23})$$

Transformation de Park inverse

$$i_{as} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{ds} \quad (\text{II.24})$$

$$i_{bs} = \left[ -\frac{1}{2} i_{ds} + \frac{\sqrt{2}}{3} i_{qs} \right] \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{II.25})$$

$$i_{cs} = \left[ -\frac{1}{2} i_{ds} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} \right] \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{II.26})$$

### II.3.2 Réduction de la matrice des inductances

Les transformations établissent des relations entre les flux dans le repère qdo et les flux dans le repère abc :

Au stator :

$$\phi_s^{qd0} = T_{qd0}(\theta) \left( L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \right) \quad (\text{II.27})$$

En appliquant la transformation du Park aux équations de liaison ci-dessus, obtenir

$$\omega_r = \frac{d(\theta_r)}{dt} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{2}{3} L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss} - L_{sm}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss} - L_{sm}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss}) + 3L_{sm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$L_{sm} = L_{ss} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} L_{ss}$$

L'équation ci-dessus peut être écrite de la manière suivante

$$\begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \\ i_r^{qd0} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \\ i_{0r} \\ i_{0s} \end{bmatrix}$$

De même, nous pouvons obtenir les liens du rotor flux dans le cadre de référence qd0

$$\phi_r^{qd0} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qd0} \\ i_r^{qd0} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{qd0} \\ i_{0r} \\ i_{0s} \end{bmatrix}$$

Alors équation (II.20) est obtenu en exprimant les deux équations ci-dessus ensemble de manière compacte

Au rotor :

$$\phi_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r) \left( L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc} \right) \quad (\text{II.28})$$

Après le calcul, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{0s} \\ \phi'_{qr} \\ \phi'_{dr} \\ \phi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ts} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ts} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ts} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{tr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{tr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{tr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

On constate :

D'une part, que la transformation de Park rend les coefficients de la matrice des Inductances indépendants du temps.

D'autre part, que le nombre de paramètres électromagnétiques se réduit.

$L_m$  : Inductance magnétisante liée au stator, nous pouvons exprimer cette inductance en

Fonction de nombre de spire :  $N_s$  et  $N_r$  :

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{2N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \left( \frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{rr} \quad (\text{II.30})$$

$N_s$  et  $N_r$  sont le nombre de spires dans le stator et le rotor

On remplace l'équation (II.19) et (II.21) dans (II.28) pour former toutes les équations

De tension de la machine dans le repère qd0.

$$P_{in} = V_{as} i_{as} + V_{bs} i_{bs} + V_{cs} i_{cs} + V'_{ar} i'_{ar} + V'_{br} i'_{br} + V'_{cr} i'_{cr} \quad (\text{II.31})$$

En appliquant la transformation de Park sur l'équation (II.12) on obtient :

$$P_{in} = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{qs} + V_{ds} i_{ds} + 2V_{0s} i_{0s} + V'_{qr} i'_{qr} + V'_{dr} i'_{dr} + 2V'_{0r} i'_{0r}) \quad (\text{II.32})$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left[ r_s i_{qs}^2 + \omega \phi_{ds} i_{qs} + \frac{d}{dt} (\phi_{qs} i_{qs}) + r_s i_{ds}^2 - \omega \phi_{qs} i_{ds} + \frac{d}{dt} (\phi_{ds} i_{ds}) \right. \\ \left. + 2r_s i_{0s}^2 + 2 \frac{d}{dt} (\phi_{0s} i_{0s}) + r_r i_{qr}^2 + (\omega - \omega_r) \phi'_{dr} i'_{qr} + \frac{d}{dt} (\phi'_{qr} i'_{qr}) \right]$$

$$\begin{aligned}
& +r_r i_{dr}'^2 - (\omega - \omega_r) \phi_{qr}' i_{dr}' + \frac{d}{dt} (\phi_{dr}' i_{dr}') + 2r_r i_{0r}'^2 + 2 \frac{d}{dt} (\phi_{0r}' i_{0r}') \\
& = \frac{3}{2} (r_s i_{qs}'^2 + r_s i_{ds}'^2 + 2r_s i_{0s}'^2 + r_r i_{qr}'^2 + r_r i_{0r}'^2) + \frac{3}{2} [\omega (\phi_{ds}' i_{qs}' - \phi_{qs}' i_{ds}') + (\omega - \omega_r) (\phi_{dr}' i_{qr}' - \phi_{qr}' i_{0r}')] \\
& + \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (\phi_{qs}' i_{qs}' + \phi_{ds}' i_{ds}' + 2\phi_{0s}' i_{0s}' + \phi_{qr}' i_{qr}' + \phi_{dr}' i_{dr}' + 2\phi_{0r}' i_{0r}')
\end{aligned}$$

Le  $i^2 r$  terme est les pertes de cuivre,

$i \frac{d\phi}{dt}$  Sont le taux de l'échange de l'énergie magnétique entre les enroulements,

$\omega \phi i$  Termes représentent le taux d'énergie converti en travail mécanique.

Le couple électromécanique développé par la machine est donnée par la somme de  $\omega \phi i$  termes divisés par la vitesse mécanique

vitesse angulaire mécanique du rotor  $\omega_{rm} = \frac{2}{P} \omega_r$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_r} [\omega (\phi_{ds}' i_{qs}' - \phi_{qs}' i_{ds}') + (\omega - \omega_r) (\phi_{dr}' i_{qr}' - \phi_{qr}' i_{0r}')] \quad (\text{II.33})$$

L'équation du couple électromécanique dans le repère qd0 est donnée par :

Avec P est le nombre de pôles de la machine et  $\omega_{rm}$ ,  $\omega_r$  respectivement les vitesses de rotation mécanique et électrique du rotor :

$$\omega_{rm} = \frac{2}{P} \omega_r \quad (\text{II.34})$$

L'équation de couple peut également être exprimée en utilisant la relation de flux dans l'équation. (II.28)

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{ds}' i_{qs}' - \phi_{qs}' i_{ds}') \quad (\text{II.35})$$

Les paramètres de la machine sont toujours déterminés en fonction  $\phi$  et X, dans les expériences, ces quantités ont la relation suivante :

$$\phi(pu) = \omega_b \phi \quad \text{et} \quad X(pu) = \omega_b L$$

L'équation de la vitesse du rotor :



$$\frac{d\left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)}{dt} = \frac{1}{2H} (T_{em} - T_{load} - T_{damp}) \tag{II.36}$$

Où  $\omega_b$  est la valeur de base de la fréquence angulaire calculée par  $\omega_b = 2\pi f$ ,  $f$  est la fréquence d'alimentation.  $p$  est le nombre de pôles de la machine.  $T_{load}$  Est le couple mécanique appliqué par la charge,  $T_{damp}$  est le couple d'amortissement dans le sens opposé à la rotation du rotor, et  $H$  est la constante d'inertie.

Au Simulink on peut écrire ce modèle bloc (qd0) sous la forme :

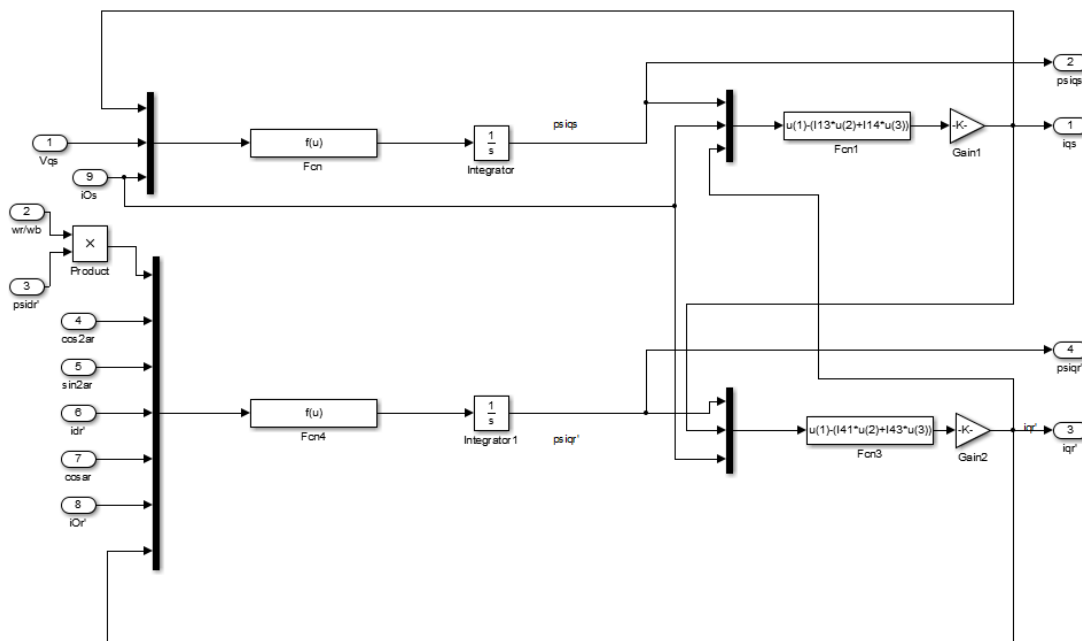


Figure II-6 Schéma bloc l'axe q

Représentons maintenant l'axe  $q$  L'équations du circuit statorique sont données comme :

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_e \phi_{ds} \tag{II.37}$$

Il est nécessaire de changer les variables de flux du système SI en système par unit cette. CES changements donnés comme suit :

$$F_{qs} = \omega_b \phi_{qs} \tag{II.38}$$

On remplacer (2.38) dans (2.37) on trouve :

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dF_{qs}}{dt} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} \quad (\text{II.39})$$

L'équation du flux rotorique l'axe d donne sous forme :

$$\phi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (\text{II.40})$$

$$\phi_{dm} = L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (\text{II.41})$$

Où :  $X_{ls} = \omega_b L_{ls}$  = Réactance de fuite du stator

$X_{lr} = \omega_b L_{lr}$  = Réactance de fuite du rotor

$X_m = \omega_b L_m$  = Réactance magnétisante

Donc :

$$F_{dr} = X_{lr} i_{dr} + F_{dm} \quad (\text{II.42})$$

La variation des flux statorique et rotorique de l'axe q est donnée par les équations suivantes :

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[ V_{qs} - \frac{\omega_e F_{ds}}{\omega_b} + \frac{r_s}{X_{ls}} \left\{ \frac{F_{qr} X_m}{X_{lr}} + F_{qs} \left( \frac{X_m}{X_{ls}} - 1 \right) \right\} \right] \quad (\text{II.43})$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[ \left( \frac{\omega_e - \omega_r}{-\omega_b} \right) F_{dr} + \frac{r_r}{X_{lr}} \left\{ \frac{F_{qs} X_m}{X_{ls}} + F_{qr} \left( \frac{X_m}{X_{lr}} - 1 \right) \right\} \right] \quad (\text{II.44})$$

Flux magnétique de l'axe q est donné par l'équation :

$$F_{qm} = \frac{X_m}{X_{ls}} F_{qs} + \frac{X_m}{X_{lr}} F_{qr} \quad (\text{II.45})$$

$$\text{Où : } X_{m1} = \frac{X_m X_{ls} X_{lr}}{X_{ls} X_{lr} + X_{lr} X_m + X_{ls} X_m}$$

D'autre part le courant écrit sous forme :

$$i_{dr} = \frac{F_{dr} - F_{dm}}{X_{lr}} \quad (\text{II.46})$$

Les équations (II.39) à (II.46) sont utilisées pour obtenir les équations (II.47), (II.48), (II.49), (II.50) :

$$i_{qs} = \frac{F_{qs} - F_{qm}}{X_{ls}} \tag{II.47}$$

$$F_{qs} = X_{ls}i_{qs} + F_{qm} \tag{II.48}$$

$$F_{qr} = X_{lr}i_{qr} + F_{qm} \tag{II.49}$$

$$i_{qr} = \frac{F_{qr} - F_{qm}}{X_{lr}} \tag{II.50}$$

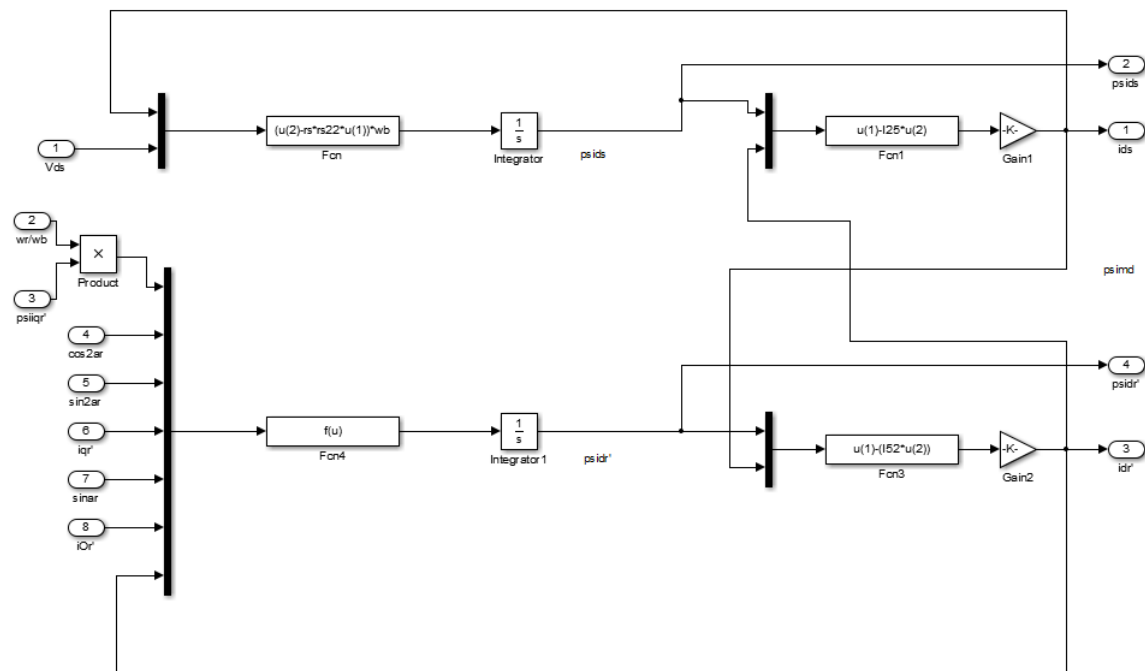


Figure II-7 Schéma bloc de l'axe d

Représentons maintenant l'axe  $d$  L'équations du circuit statorique sont données comme suit :

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_e \phi_{qs} \tag{II.51}$$

Il est nécessaire de changer les variables de flux du système SI en système par unit cette. Ces changements donnés comme suit :

$$F_{ds} = \omega_b \phi_{ds} \tag{II.52}$$

On remplace (II.52) dans (II.53) on trouve :

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{dF_{ds}}{dt} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} \tag{II.53}$$

Les flux rotoriques de l'axe q est donnée sous la forme :

$$\phi_{qr} = L_{lr}i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (\text{II.54})$$

$$\phi_{qm} = L_m(i_{qs} + i_{qr}) \quad (\text{II.55})$$

Où :  $X_{ls} = \omega_b L_{ls}$  = Réactance de fuite du stator

$X_{lr} = \omega_b L_{lr}$  = Réactance de fuite du rotor

$X_m = \omega_b L_m$  = Réactance magnétisante

Donc :

$$F_{qr} = X_{lr}i_{qr} + F_{qm} \quad (\text{II.56})$$

Les variations des flux statorique et rotorique axe d donne par :

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[ V_{ds} - \frac{\omega_e F_{qs}}{\omega_b} + \frac{r_s}{X_{ls}} \left\{ \frac{F_{dr} X_m}{X_{lr}} + F_{ds} \left( \frac{X_m}{X_{ls}} - 1 \right) \right\} \right] \quad (\text{II.57})$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[ \left( \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) F_{qr} + \frac{r_r}{X_{lr}} \left\{ \frac{F_{ds} X_m}{X_{ls}} + F_{dr} \left( \frac{X_m}{X_{lr}} - 1 \right) \right\} \right] \quad (\text{II.58})$$

Flux magnétique l'axe d :

$$F_{dm} = \frac{X_{m1}}{X_{ls}} F_{ds} + \frac{X_{m1}}{X_{lr}} F_{dr} \quad (\text{II.59})$$

$$\text{Où : } X_{m1} = \frac{X_m X_{ls} X_{lr}}{X_{ls} X_{lr} + X_{lr} X_m + X_{ls} X_m}$$

Le courant rotorique l'axe q donne par :

$$i_{qr} = \frac{F_{qr} - F_{qm}}{X_{lr}} \quad (\text{II.60})$$

Les équations (II.53) à (II.60) sont utilisées pour obtenir les équations (II.61), (II.62), (II.63), (II.64) :

$$F_{ds} = X_{ls} i_{ds} + F_{dm} \quad (\text{II.61})$$

$$i_{ds} = \frac{F_{ds} - F_{dm}}{X_{ls}} \quad (\text{II.62})$$

$$F_{dr} = X_{lr} i_{dr} + F_{dm} \quad (\text{II.63})$$

$$i_{dr} = \frac{F_{dr} - F_{dm}}{X_{lr}} \tag{II.64}$$

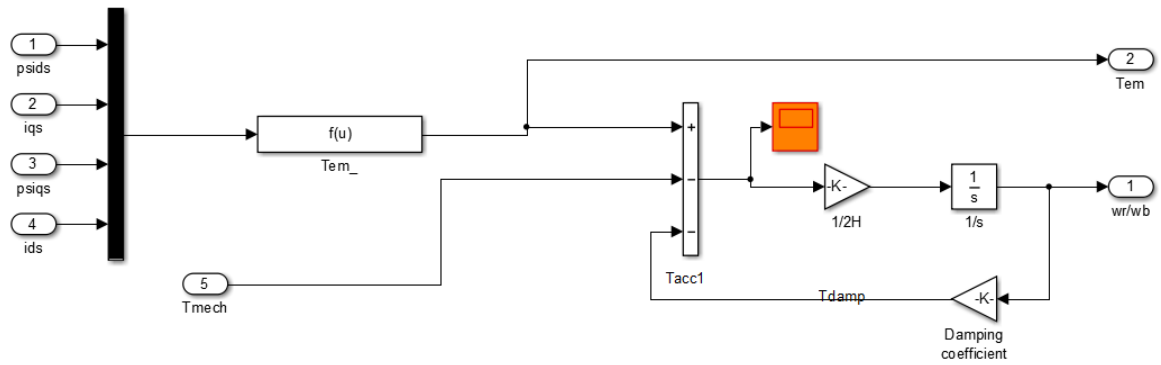


Figure II-8 Schéma couple électromagnétique

$$T_{em} = \frac{3 P}{2} \frac{P}{2} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \tag{II.65}$$

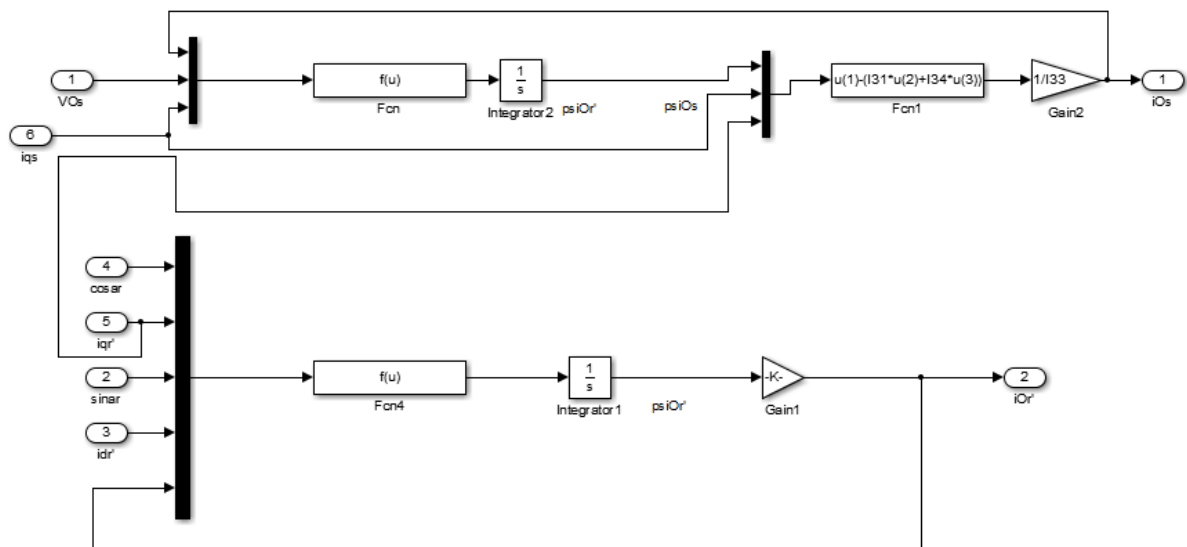


Figure II-9 Schéma Zéro séquence

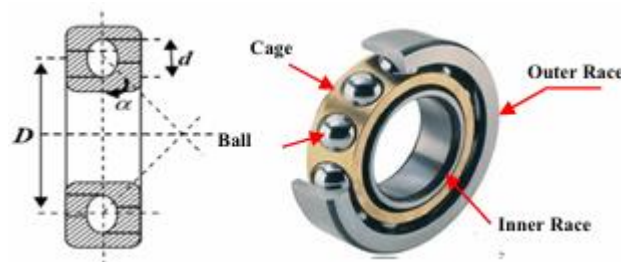
#### II.4 Modélisation et simulation de la machine asynchrone avec défaut de roulement

L'analyse de fréquence est peut-être l'approche la plus largement utilisée pour la détection des défauts de roulement. Comme indiqué dans la section précédente, un roulement

génère des vibrations même s'il est sain. Chaque élément de roulement a une fréquence de rotation caractéristique. [18]

si un composant de roulement est endommagé, l'interaction des défauts dans Le roulement produira des impulsions chaque fois que le défaut surviendra autres composants de roulement. Ces impulsions excitent les naturelles fréquences du système de roulement et des structures de logement de roulement, entraînant une augmentation de l'énergie vibratoire à ces fréquences spécifiques de l'élément.

Ces fréquences caractéristiques de défauts peuvent être calculées à partir d'une analyse cinématique. Considérez un roulement qui a une bague extérieure fixe et une bague intérieure rotative (un cas général pour la plupart des roulements). Supposons que le roulement a un contact de roulement pur, une installation solide et des conditions de fonctionnement stables, avec les paramètres suivants :



**Figure II-10** Les composants du roulement

$d$  = diamètre de l'élément roulant (en m)

$D$  = diamètre primitif (en m),

$Z$  = nombre d'éléments roulants

$\alpha$  = angle de contact (en degrés).

#### II.4.1 Origines des raies dues au défaut roulement en présence d'un défaut

Le couple de charge  $T_{load}$  peut-être écrit comme la somme d'une partie constante et d'une partie oscillante à la fréquence caractéristique  $f$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})$$

$$\frac{d\left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)}{dt} = \frac{1}{2H} (T_{em} - T_{load} - T_{damp})$$

$$T_{em} = T_{load} (1 + \cos 2\pi ft) \tag{II.66}$$

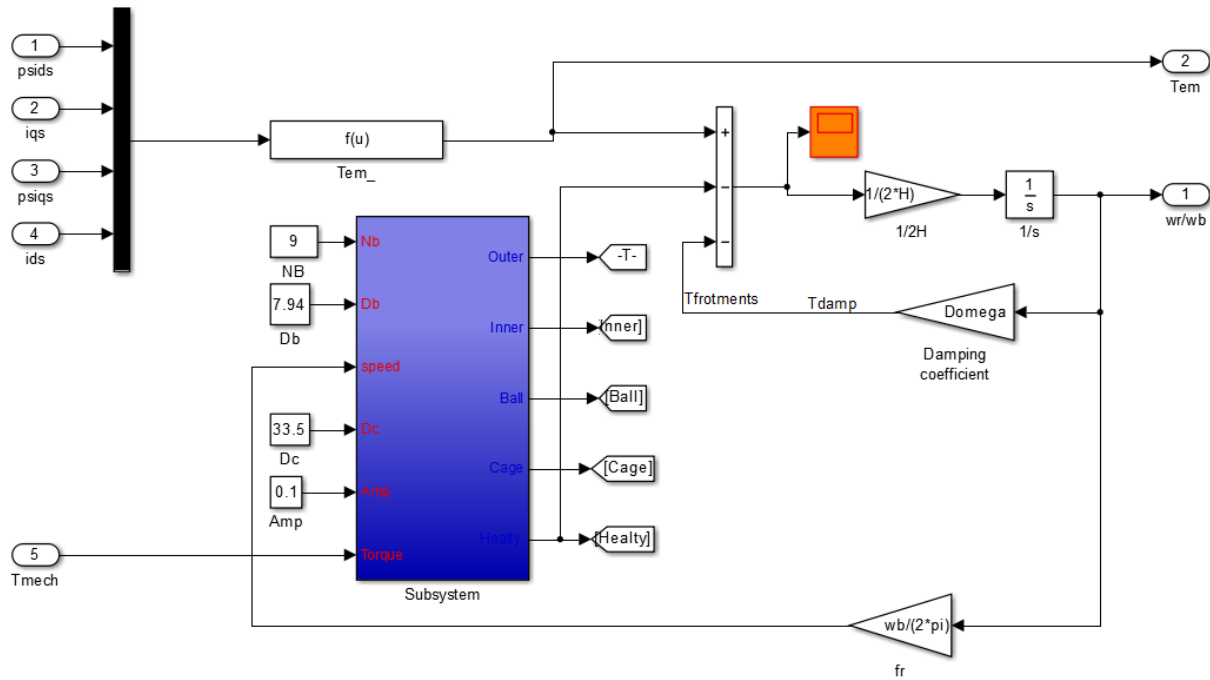


Figure II-11 Schéma bloc du couple électromagnétique avec défaut des roulements

### II.4.2 Fréquence des défauts de la bague intérieure

$$\omega_{id} = Z(\omega_r - \omega_c) = \frac{Z\omega_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D}\right) \tag{II.67}$$

$$f_{id} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D}\right) \tag{II.68}$$

Considérez l'effet de l'angle de contact, la fréquence de défaut de la bague intérieure sera :

$$f_{id} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) (Hz) \tag{II.69}$$

Si la vitesse de rotation de la bague intérieure est  $n \text{ rpm}$ , ou  $\omega_r = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/s}$ , ou  $f_r = \frac{n}{60} \text{ Hz}$

,ces fréquences caractéristiques peuvent être dérivées par les procédures suivantes :

$$V_2 = \frac{V_1}{2} = \omega_r \frac{D-d}{4} \text{ (m/s)} \quad (\text{II.70})$$

### II.4.3 Fréquence des défauts de la cage

$$\omega_c = \frac{V_2}{D/2} = \frac{\omega_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \text{ (rad/s)} \quad (\text{II.71})$$

Ou :

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \text{ (Hz)} \quad (\text{II.72})$$

Considérez l'effet de l'angle de contact, la cage modifiée la fréquence sera :

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \text{ (Hz)} \quad (\text{II.73})$$

### II.4.4 Fréquence des défauts de la bague extérieure

$$\omega_{od} = Z\omega_c = \frac{Z\omega_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \text{ rad/s}$$

(II.74)

Ou :

$$f_{od} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \text{ (Hz)} \quad (\text{II.75})$$

Considérez l'effet de l'angle de contact, l'extérieur modifié la fréquence des défauts sera

$$f_{od} = \frac{Zf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \text{ (Hz)} \quad (\text{II.76})$$

### II.4.5 La fréquence des défauts à bille

$$\omega_b = \frac{V_2}{d/2} = \frac{\omega_r D}{2d} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \text{ (rad/s)} \quad (\text{II.77})$$

Ou :



$$f_b = \frac{f_r D}{2d} \left( 1 - \frac{d}{D} \right) (\text{Hz}) \tag{II.78}$$

Considérez l'effet de l'angle de contact, la fréquence de rotation de bille sera :

$$f_b = \frac{f_r}{2d} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right) (\text{Hz}) \tag{II.79}$$

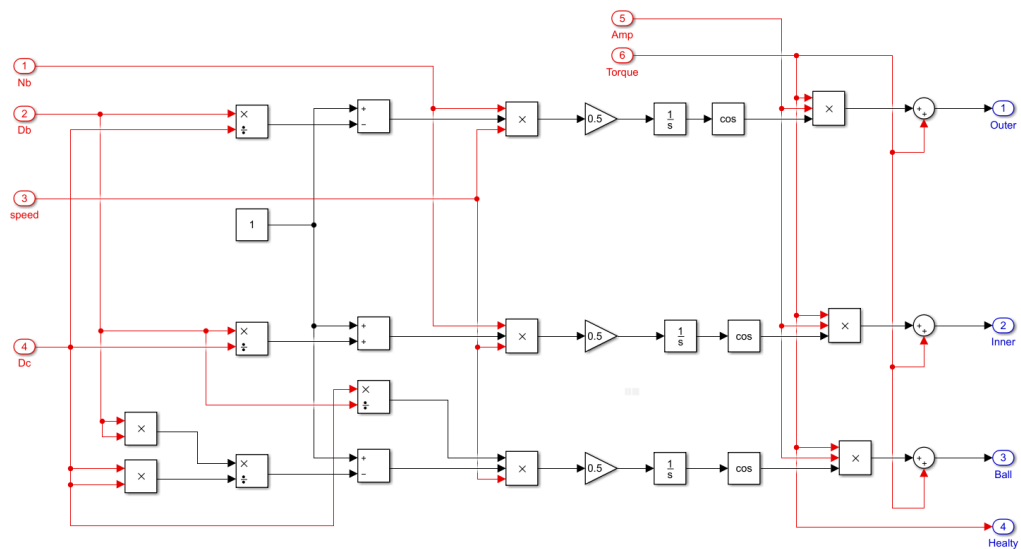


Figure II-12 Schéma des défauts roulement

### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de construction de modèles basés sur des équations mathématiques, ainsi que leur implémentation dans l'environnement Matlab/Simulink pour simuler le comportement d'une machine asynchrone en absence et en présence d'un défaut de roulement. Afin de valider les résultats obtenus par le modèle de simulation, nous montrons dans le chapitre suivant la validation des résultats obtenus en absence et en Présence d'un défaut de roulement par l'analyse de la densité spectrale de puissance (DSP).

## **Chapitre III: Résultats de simulation**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons dans un premier temps à la présentation de l'évolution temporel des différentes grandeurs mesurables : électriques et mécaniques issus de notre modèle numérique de simulation de la machine asynchrone (couple électromagnétique et courant statoriques) lorsque la machine ne présente aucun défaut (état sain) et dans le cas où elle présente un défaut de roulement afin de mettre en évidence l'impact d'un défaut sur l'évolution temporel des grandeurs électriques et mécanique. Dans un deuxième temps nous allons nous intéresser à la présentation des résultats obtenues par les méthodes de l'analyse fréquentielle des grandeurs électrique et mécanique .Afin de caractériser les changements introduits au niveau de contenu spectral en présence d'un défaut.

### III.2 Les paramètres de la machine

Tableau III-1 Les paramètres de la machine

Notation	Paramètre	Valeur
Pu	La puissance	1 [Hp]
n	La vitesse de rotation	1400 [rpm]
rpr	Résistance rotorique	1.99 [Ohm]
rs	Résistance statorique	4.81 [Ohm]
xls <sub>s</sub>	Réactance statorique	2.99e-3 [H]
xplr <sub>r</sub>	Réactance rotorique	2.99e-3 [H]
xM	Mutual réactance	0.4627 [H]
J	Rotor inertie	0.13 [kg.m <sup>2</sup> ]
P	Nombre de pôle	4

### III.3 Fréquences cinématiques caractéristiques

Dans un roulement à une rangée de billes, des fréquences cinématiques sont associées à chaque élément du roulement, à savoir la bague externe, la bague interne, les billes et la cage. Dans les cas que nous considérons, le calcul de ces fréquences s'effectue en considérant la bague externe fixe et la bague interne en rotation à la fréquence  $f_r$ . La fréquence associée à la bague externe (respectivement interne)

Tableau III-2 caractéristiques du roulement à bille

**Nr=1400tr/min** : vitesse de rotation de l'arbre  
**Z=9** : Nombre de billes  
**d=7,94 mm** : Diamètre d'une bille  
**D=33.50mm** : Diamètre moyen du roulement  
 **$\alpha=0^\circ$**  : Angle de contact

- a) la fréquence de rotation  $f_r$  :

$$f_r = Nr / 60 = 1398.6 / 60 = 23.31 \text{ Hz}$$

- b) la fréquence de défaut de type écaillage affectant la bague interne :

$$f_{\text{int}} = \frac{z}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times f_r = 130,14 \text{ Hz}$$

- c) la fréquence de défaut de type écaillage sur un élément roulant :

$$f_b = \frac{D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \times f_r = 46,63 \text{ Hz}$$

- d) la fréquence de défaut de type écaillage sur la cage :

$$f_c = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times f_r = 8.89 \text{ Hz}$$

Nous considérerons dans ce travail que les roulements sont à contact radial, c'est à dire avec un angle de contact nul :  $\alpha = 0$ . Par ailleurs, ces fréquences sont calculées à partir de l'approximation considérant que les contacts bille/bague sont parfaitement ponctuels et que le roulement des billes se fait sans glissement. Dans les roulements réels, il existe toujours en même temps un roulement et un glissement des billes sur les pistes. Pour tenir compte de ce phénomène de glissement, un facteur de glissement multiplicatif des fréquences est introduit, défini comme le rapport de la distance de roulement sur la distance de glissement. En pratique, ce facteur est compris entre 0.96 et 0.98 pour un roulement sain et peut donc être négligé.

#### III.4 Résultats de simulation :

Dans cette partie nous nous intéressons, dans un premier temps à la présentation de l'évolution temporel des différentes grandeurs mesurables : électriques et mécaniques issus de notre modèle numérique de simulation de la machine asynchrone (courant statoriques, couple électromagnétique) lorsque la machine ne présente aucun défaut (état sain) et dans le cas où elle présente un défaut (défaut de roulement) afin de mettre en évidence l'impact d'un défaut

sur l'évolution temporelle des grandeurs électriques et mécanique. Dans un deuxième temps nous allons nous intéresser à la présentation des résultats obtenues par les méthodes de l'analyse fréquentielle des grandeurs électrique et mécanique. Afin de caractériser les changements introduits au niveau de contenu spectral en présence d'un défaut.

### III.4.1 Analyse des grandeurs mécanique (couple électromagnétique)

La plupart des défauts des machines électriques se traduisent sur le couple électromagnétique et la vitesse rotorique par des harmoniques ayant des fréquences spécifiées. C'est pour cette raison que nous nous proposons dans cette partie d'étudier l'influence d'un défaut de roulement sur les grandeurs mécaniques.

L'évolution du couple électromagnétique dans l'état sain et défectueux obtenue par le modèle de simulation est donnée dans les figures ci-dessous:

#### a) Machine à induction sans défaut (Etat sain)

Nous pouvons montrer l'évolution des grandeurs temporelles du couple, lorsque le roulement de la machine ne présente aucune défaillance (sain).

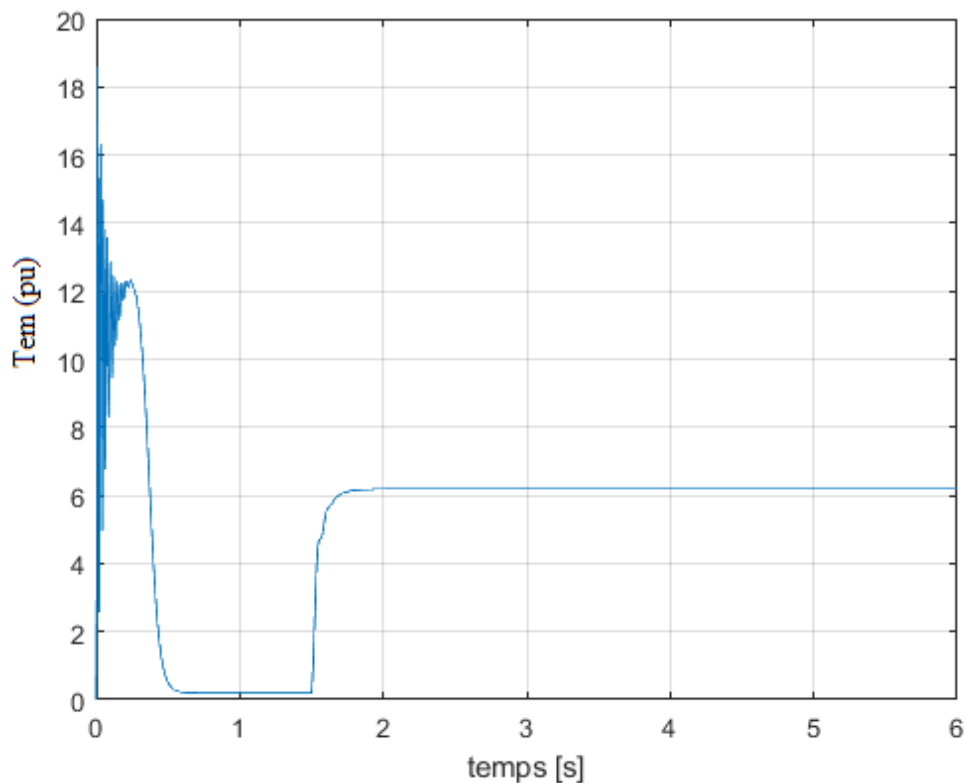
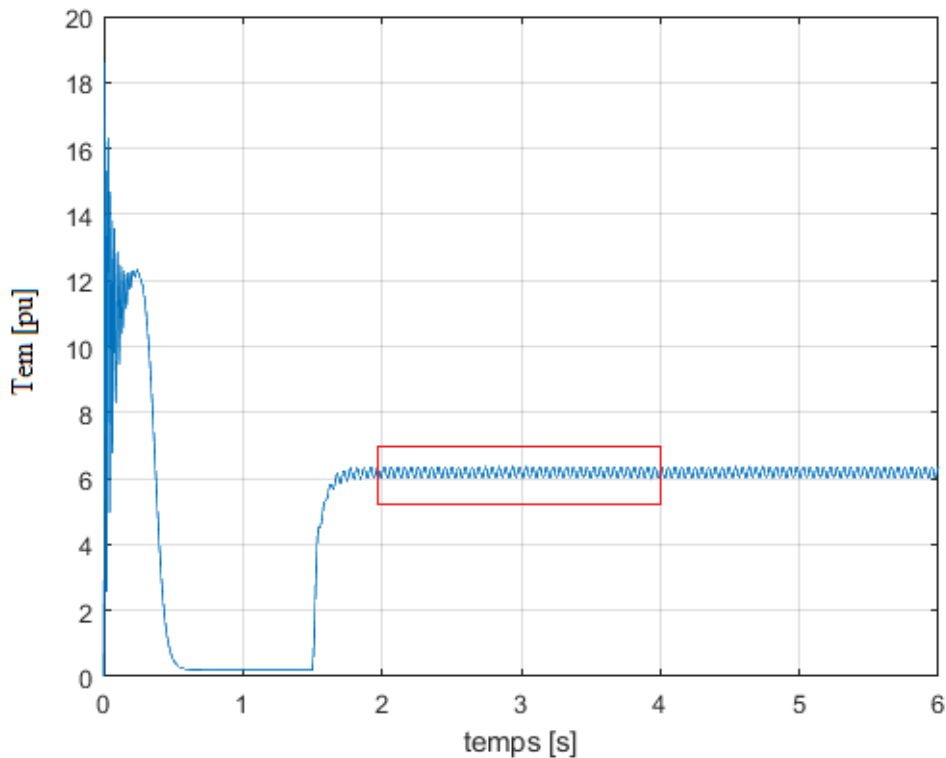


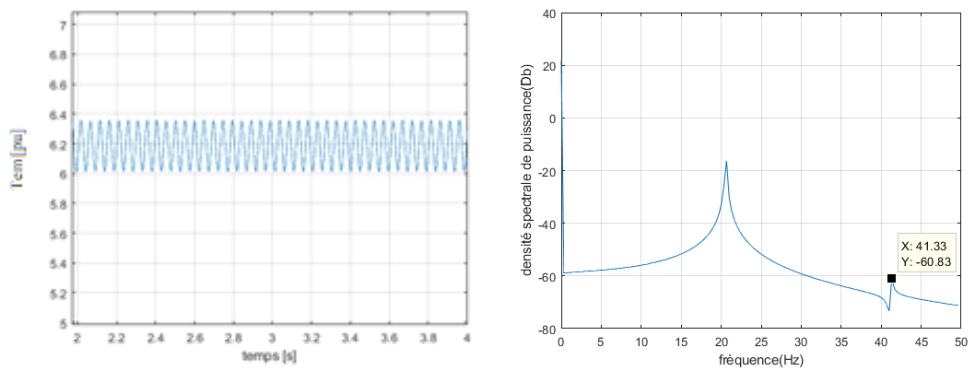
Figure III-1 Evolution temporelle de couple à l'état sain

L'évolution du couple dans l'intervalle 0 à 1.5s est une allure caractéristique type de tous les machines asynchrones à cage. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes, pendant le régime transitoire le couple est fortement pulsatoire puis se stabilise à la fin du régime transitoire. On remarque à l'instant  $t=1.5s$  le passage d'un régime à vide à un régime en charge, sans oscillation (état sain) figure III.1.

**b) Machine à induction avec défaut de la bague intérieur**



**Figure III-2** Evolution temporelle de couple en présence défaut de la bague intérieur



**Figure III-3** Densité spectrale de puissance de couple en présence défaut de la bague

c) Machine à induction avec défaut de la bague externe

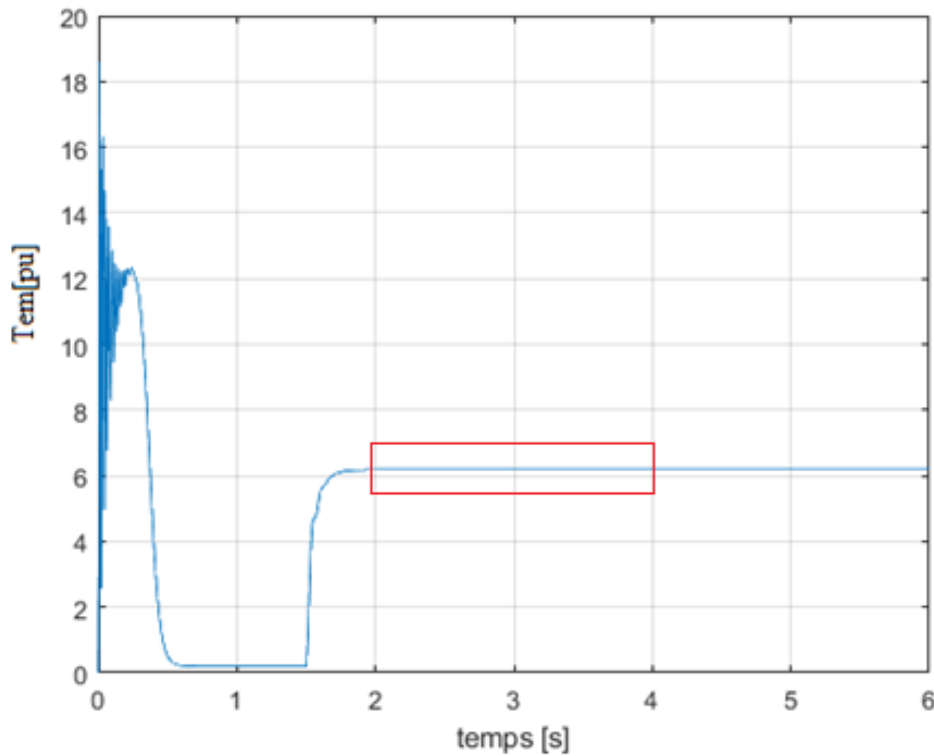


Figure III-4 Evolution temporelle de couple avec défaut de la bague extérieure

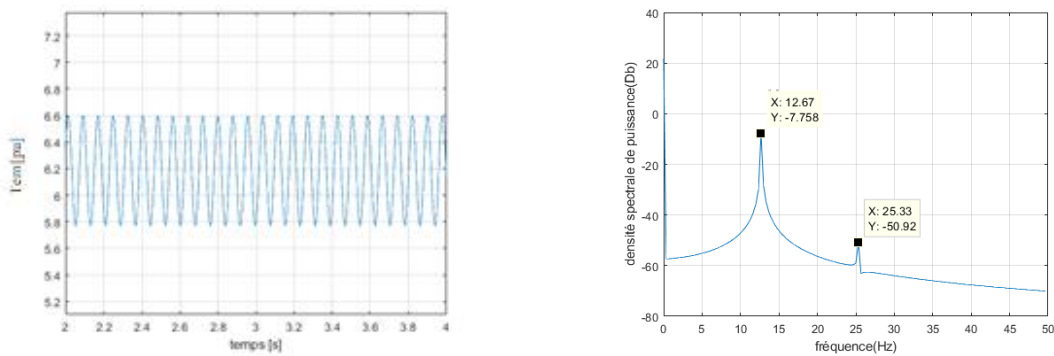


Figure III-5 Densité spectrale de puissance de couple en présence défaut de la bague extérieure

En analysant la figure III.5, nous visualisons l'apparition des fluctuations sur l'évolution temporelle du couple avec défaut de la bague extérieure. Ces fluctuations sont aussi transmises à la vitesse.

d) Machine à induction avec défaut de la bille

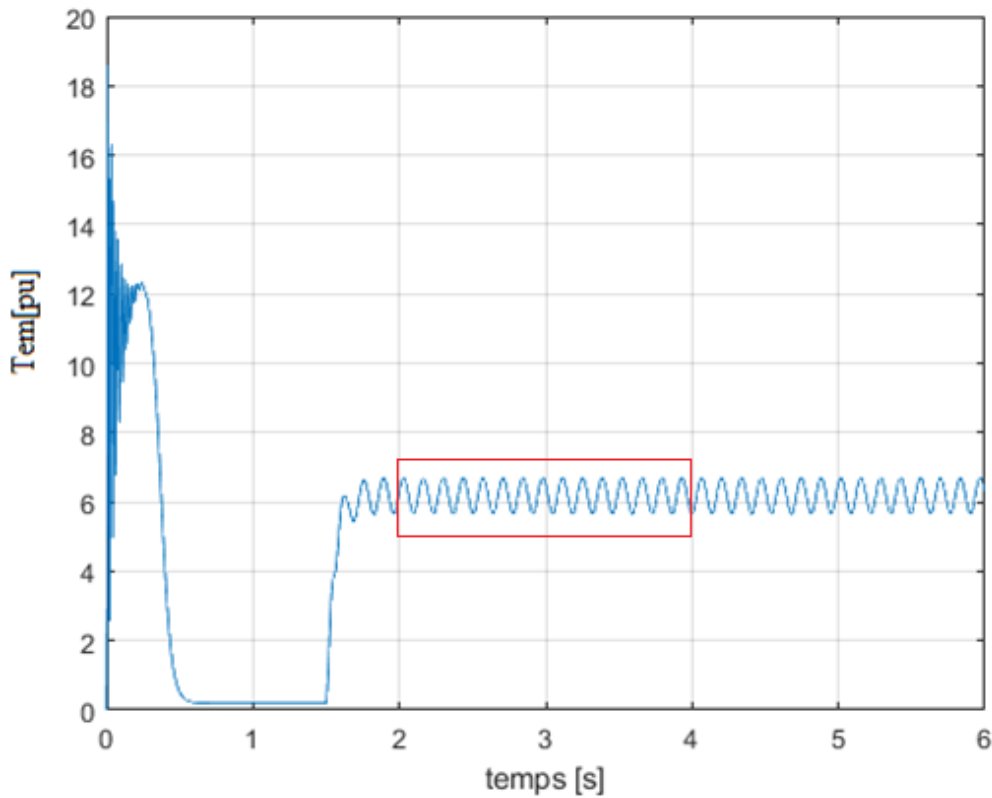


Figure III-6 Evolution temporelle de couple en présence d'un défaut de la bille

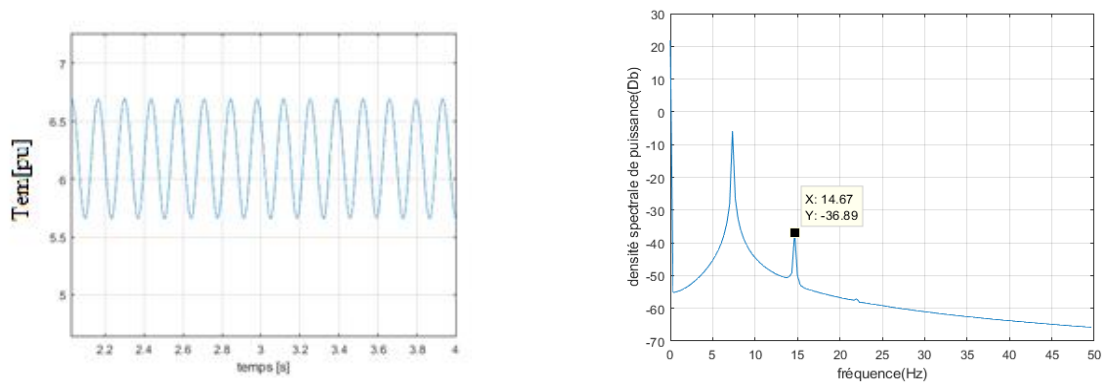


Figure III-7 Densité spectrale de puissance de couple en présence d'un défaut de la bille

Dans l'état sain de la machine le couple électromagnétique ne présente aucune raie (Figure III.1). Par contre dans le cas d'un défaut de roulement de bague externe le couple présente des fluctuations ou des ondulations, ces fluctuations se traduisent dans le spectre du couple électromagnétique par une raie à la fréquence de défaut (Figure III.2-III.7).



On remarque la présence d'une modulation d'amplitude qu'est un signe de la présence d'un défaut de roulement sur la machine asynchrone. À partir de ce résultat nous pouvons conclure que l'analyse temporelle ne permet pas de conclure sur le type de défaut (défaut de roulement, défaut de balourd...).

### III.4.2 L'analyse du courant d'une phase statorique dans le régime permanent

#### *Extraction d'énergie spectrale*

Comme dans le cadre de l'analyse vibratoire, l'apparition d'un harmonique particulier peut relever d'un processus aléatoire. L'algorithme de recherche, dans des bandes de fréquence, la possible apparition des harmoniques de défaut. Pour cela, l'énergie spectrale est utilisée. Les plages sélectionnées pour l'analyse sont spécifiées, où représente soit la fréquence caractéristique de la bague externe  $f_{ext}$ , soit la fréquence caractéristique de la bague interne  $f_{int}$  de manière similaire à l'indicateur vibratoire et conformément au modèle de courant statorique, les plages fréquentielles sont étendues pour tenir compte des combinaisons de fréquences faisant intervenir la fréquence de rotation mécanique de la machine  $f_r$  et la fréquence de cage du roulement  $f_c$ . Compte tenu des valeurs de  $n$ , il y a donc pour chaque localisation de défaut 30 plages fréquentielles dans lesquelles l'énergie est extraite (15 plages relatives aux composantes hautes fréquences à  $f_s + k f_{def}$  non traité dans ce mémoire et 15 relatives aux composantes basses fréquences à  $f_s - k f_{def}$ ).

La localisation fréquentielle des plages d'analyse relatives aux fréquences caractéristiques d'un roulement. La fréquence d'alimentation de la machine est ici fixée à  $f_s = 50\text{Hz}$ . Certaines plages se recouvrent ; ce chevauchement peut permettre de prendre en compte plusieurs fois l'apparition de certains harmoniques et ainsi d'augmenter la sensibilité de la détection. Par ailleurs, une étude d'un indicateur pour différentes définitions des plages fréquentielles d'extraction énergétique est présentée dans [20], Il est alors montré que l'indicateur le plus performant utilise toutes les plages mentionnées d'après les équations suivantes :

$$\left| f_s \pm \left[ n f_{def} - f_c ; n f_{def} + f_c \right] \right| \quad (III.1)$$

$$\left| f_s \pm \left[ n f_{def} - f_r - f_c ; n f_{def} - f_r + f_c \right] \right| \quad (III.2)$$

$$\left| f_s \pm \left[ n f_{def} + f_r - f_c ; n f_{def} + f_r + f_c \right] \right| \quad (III.3)$$

avec  $n \in [1;5]$

a) Le courant statorique sans défaut de roulement

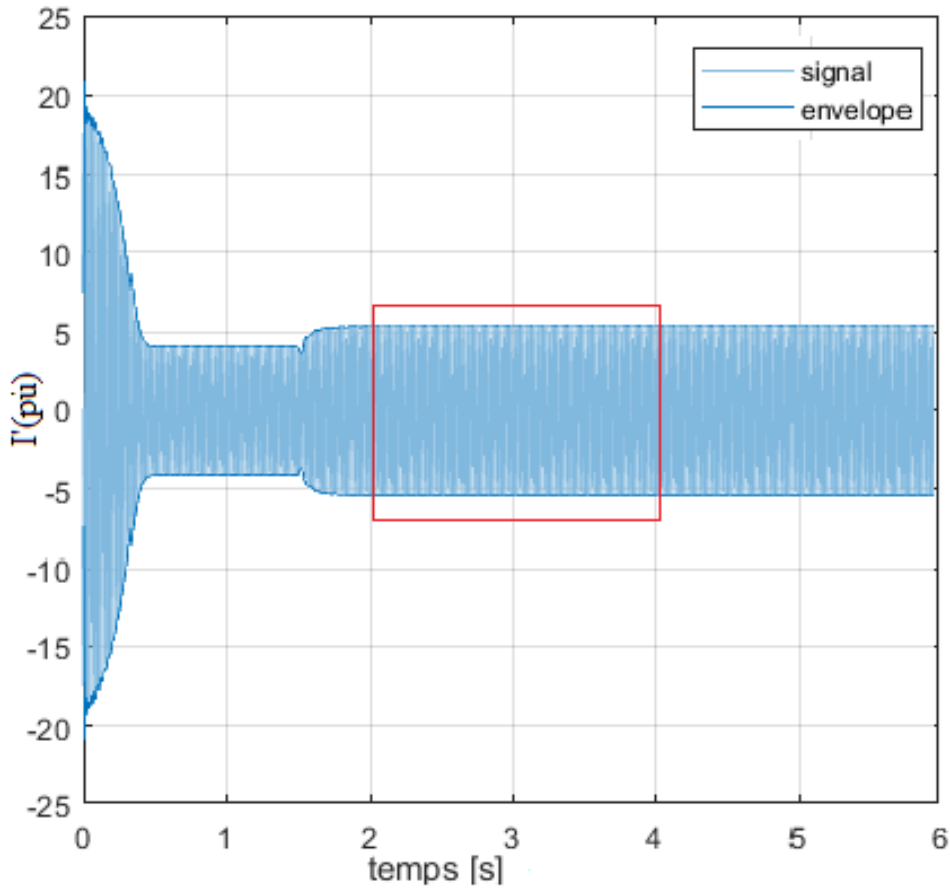


Figure III-8 Evolution du courant statorique d'une phase à vide et en charge

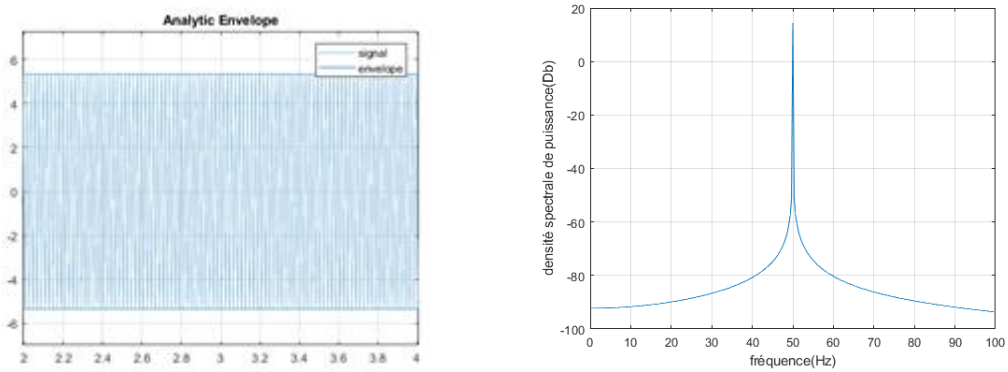
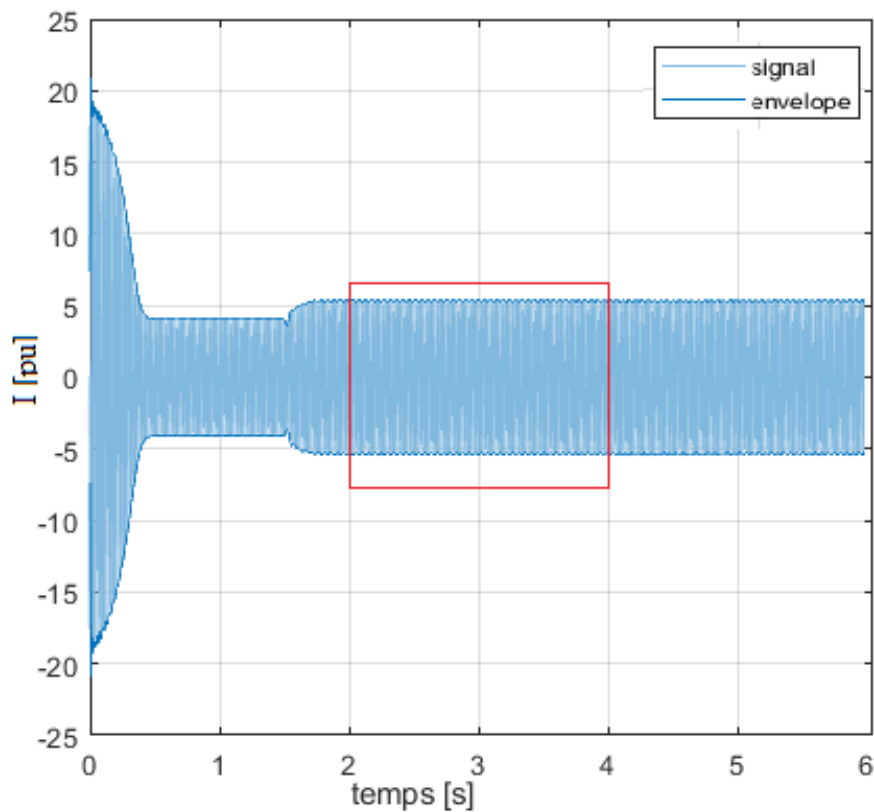


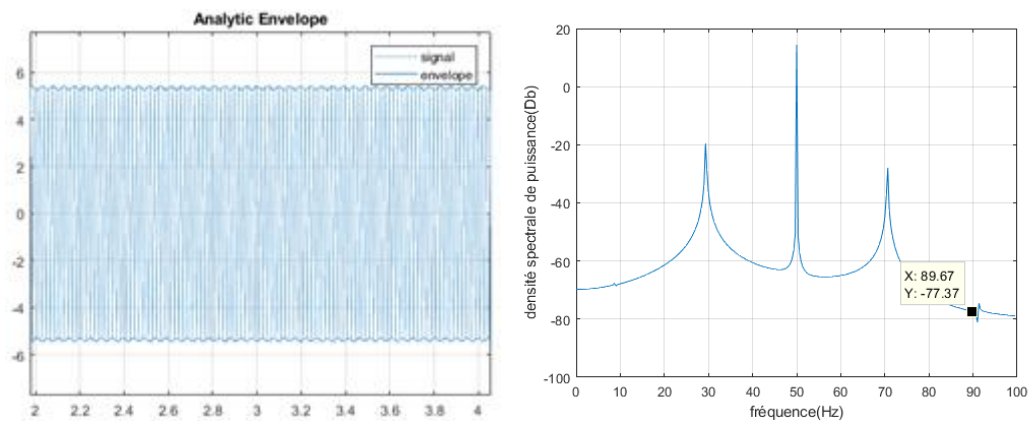
Figure III-9 Densité spectrale de puissance de courant statorique à l'état sain

La densité spectrale de puissance (DSP) du courant statorique présentée dans la figure (III.9) montre aucunes raies autour de la fréquence fondamentale 50 Hz. Donc on peut conclure qu'il en état sain.

**b) Le courant statorique en présence défaut de la bague intérieure**



**Figure III-10** Evolution temporelle de courant statorique en présence défaut de la bague intérieure



**Figure III-11** Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence défaut de la bague intérieure

La fréquence du courant statorique de la bague intérieure :  $f_{def} = 130.14 \text{ Hz}$

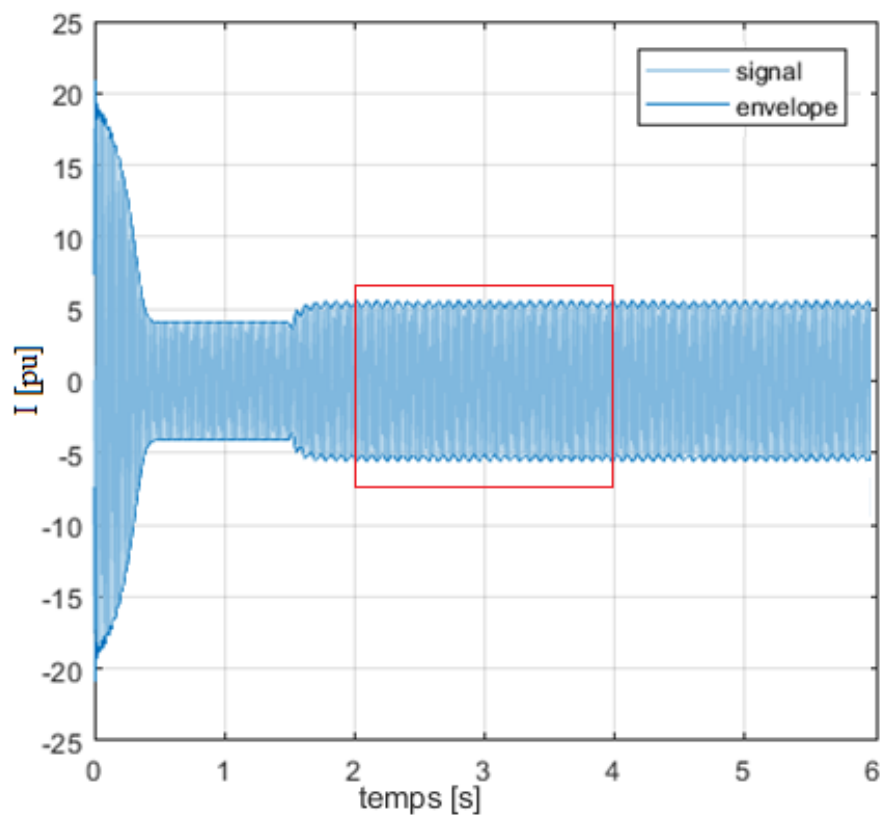
La fréquence de la cage  $f_c = 8.89 \text{ Hz}$

La densité spectrale de puissance (DSP) du courant électrique présentée dans la figure (III.11) montre apparition de deux raies de défaut donnée par l'équation (III.1) :

$$f_{int} = |50 - |n130.14 + 8.89|| = 89.03 \text{ Hz}$$

$$f_{int} = |50 + |n130.14 + 8.89|| = 189.03$$

c) Le courant statorique en présence d'un défaut de la bague externe



**Figure III-12** Evolution temporelle du courant d'une phase statorique en présence d'un défaut de la bague externe

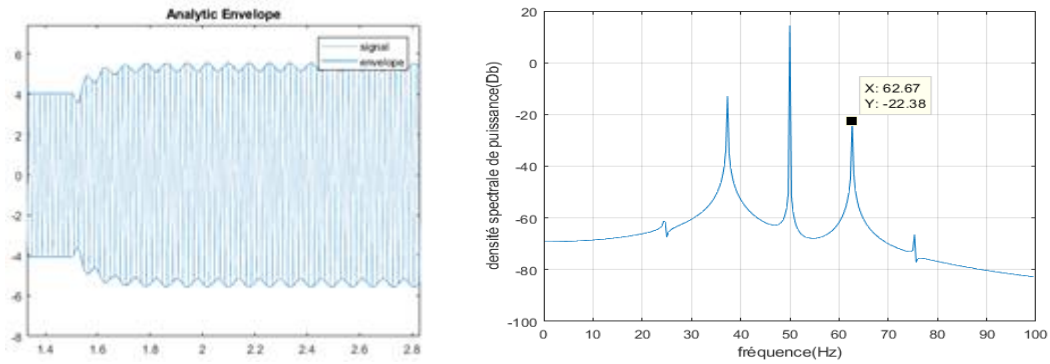


Figure III-13 Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence d'un défaut de la bague externe

La fréquence du courant statorique de la bague extérieure :  $f_{def} = 79.72 \text{ Hz}$

La Fréquence de rotation  $f_r = 23.2 \text{ Hz}$  ; la fréquence de la cage  $f_c = 8.89 \text{ Hz}$

La densité spectrale de puissance (DSP) du courant électrique présentée dans la figure (III.11) montre apparition de deux raies de défaut donnée par l'équation (III.3) :

$$f_{ext} = \left| 50 - |n79.72 + 23.2 + 8.89| \right| = 61.81 \text{ Hz}$$

$$f_{ext} = \left| 50 + |n79.72 + 23.2 + 8.89| \right| = 161.81 \text{ Hz}$$

d) Le courant statorique en présence défaut de la bille

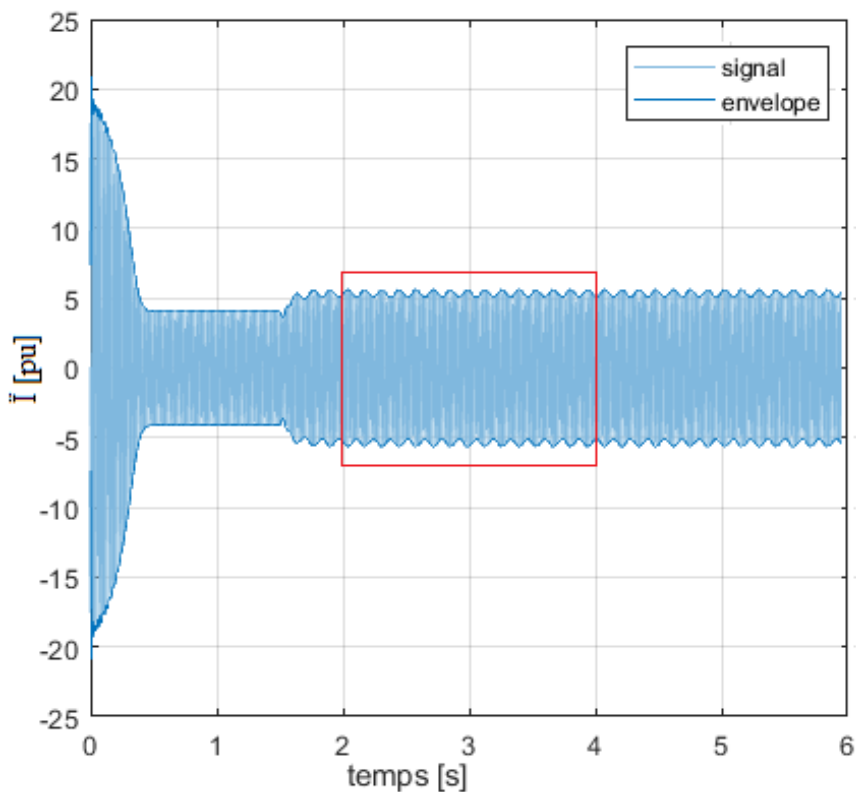
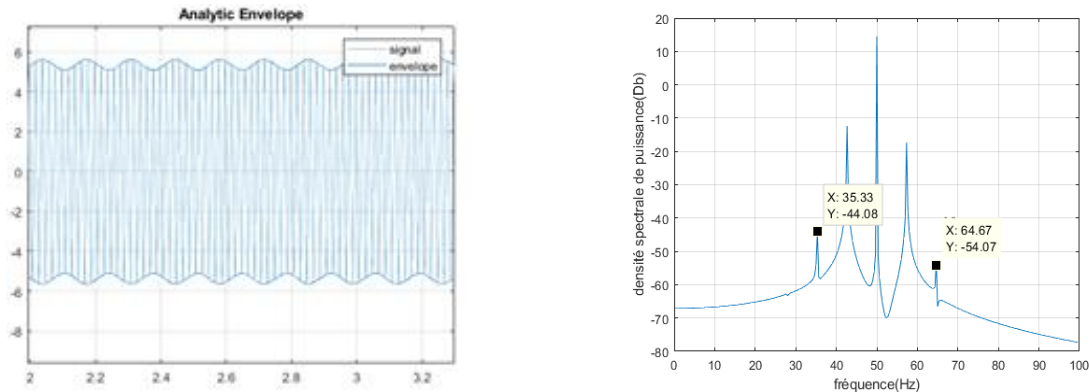


Figure III-14 Evolution temporelle du courant statorique en présence défaut de la bille



**Figure III-15** Densité spectrale de puissance de courant statorique en présence défaut de la bille

La fréquence du courant statorique de la bille :  $f_{def} = 46.63 \text{ Hz}$

La Fréquence de rotation  $f_r = 23.43 \text{ Hz}$  ; la fréquence de la cage  $f_c = 8.89 \text{ Hz}$

La densité spectrale de puissance (DSP) du courant électrique présentée dans la figure (III.13) montre apparition de deux raies de défaut autour de la fréquence fondamentale 50 Hz, donnée par l'équation (III.2) :

$$f_{bille} = |50 + |n46.3 - 23.43 - 8.89|| = 63.98 \text{ Hz}$$

$$f_{bille} = |50 - |n46.3 - 23.43 - 8.89|| = 36.02 \text{ Hz}$$

### III.5 Conclusion

L'influence des défauts de roulement sur les courants statorique dépend du type de défaut et des conditions de fonctionnement de la machine. Nous avons proposé l'utilisation d'une méthode de diagnostic basée sur l'exploitation de l'enveloppe du signal de courant statorique. Ensuite nous avons appliqué la méthode l'analyse densité spectrale de puissance pour détecter les défauts mécaniques à partir d'évolution temporel des grandeurs électrique et mécanique. Il s'avère donc difficile de détecter une panne en observant tout simplement le signal du courant, surtout que l'information sur la mécanique contenue dans le courant électrique est masquée par la forte dynamique de la fréquence d'alimentation. C'est pour cette raison dans l'avenir on fait appel à des outils de traitement de signal dites avancés, afin de l'enrichir et l'améliorer (CWT, DWT, EMD, PCA, etc.). Cependant, il s'avère que lorsque le signal à analyser est non-stationnaire, il faut adopter d'autres méthodes qui fournissent un outil plus adapté pour la détection et le diagnostic de défauts. A partir de ces informations, il est alors possible de développer des méthodes de surveillance et de diagnostic appropriées.

## **Conclusion générale**

## **Conclusion générale et perspectives**

Les entraînements électriques à base de la machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnement dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine. Ce travail d'initiation à la recherche traite la simulation des défauts de roulement dans une machine à induction triphasée dans l'environnement Matlab Simulink par exploitation des signaux électriques. Nous sommes intéressés dans un premier temps à modéliser le défaut de roulement pour comprendre son effet sur le fonctionnement de la machine et pour expliquer les phénomènes physiques mis en jeu lors de l'apparition de ce type de défauts. D'après les résultats de simulation il s'avère donc difficile de détecter une panne en observant tout simplement le signal du courant surtout que l'information sur la mécanique contenue dans le courant électrique est masquée par la forte dynamique de la fréquence d'alimentation. C'est pour cette raison en perspective on fait appel à des outils de traitement de signal dites avancés, afin de l'enrichir et l'améliorer, en plus un banc de test au laboratoire, qui inclure un IM avec la possibilité de remplacer les roulements par des roulements défectueux, afin que le modèle proposé dans Matlab Simulink soit vérifié avec des résultats expérimentaux.

Il apparaît comme envisageable et souhaitable de combiner les méthodes de diagnostic évoluées aux défauts de roulements, aux défauts mécaniques en général et aux défauts électriques rotoriques et statoriques, afin d'étudier les interactions entre les différents défauts et les différents algorithmes de détection. Pourrait conduire à des schémas de diagnostic autorisant la distinction de plusieurs défauts de natures diverse.



---

## Bibliographie

- [1] S. Salnikov, E.Solodkiy, D.Vishnyakov. "Simulation of three-phase induction motor different bearing faults in Matlab Simulink environment." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol.1886. No. 1, IOP Publishing, 2021.
  - [2] Bazine, I.Benameur, "Identification en boucle fermée de la machine asynchrone Application à la détection de défauts", Éditions universitaires européennes, 2011.
  - [3] A.Bouzida, " Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes". Diss. Ecole nationale polytechnique, 2008.
  - [4] S.Belhamdi, "Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques De Comande", Diss, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
  - [5] M.Louiba, R.Oubellil," Diagnostic et commande tolérante aux défauts d'une machine asynchrone", Diss, 2012.
  - [6] N.Bessous, "Contribution au diagnostic des défauts dans les machines asynchrones : Comparaison entre l'analyse vibratoire et l'analyse du courant d'alimentation",Diss, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
  - [7] S.Nebbad, L.Djemai, " Détection et localisation des défauts d'un système d'entrainement électrique ", Diss, Univ M'sila.
  - [8] S.Kerfali, S.Bouras, "Contribution à la surveillance et au diagnostic des défauts de la machine asynchrone"Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
  - [9] M. Bedboudi, "Commande et diagnostic des défauts de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Université BADJI Mokhtar Annaba, 2016.
  - [10] A.E.Chahmi, " Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic "Université des sciences et technologie d'Oran-MB, 2017.
  - [11] El Houssin, El Bouchikhi, et al. "Diagnostic et détection des défauts dans les machines asynchrones par des méthodes avancées de traitement du signal", *La Revue 3EI* 91 ,2018.
  - [12] S.Zouzou,"Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées", Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
  - [13] Y.Azzoug et al. "Etude Expérimentale du Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques de la Machine à Induction en Boucle Ouverte en utilisant la Transformé de Fourier".
  - [14] S.M.A.Cruz, Cardoso, AJ Marques. "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors", by the extended Park's vector approach, *IEEE Transactions on industry*
-

---

applications, vol. 37, n° 5, pp. 1227-1233. 2001

- [15] M.E.H.Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection." *IEEE transactions on industrial electronics* vol. 47, n°5, pp. 984-993. 2000
- [16] S.M.Bousbia," Identification Des Machines Asynchrones Par La Methode Ssfr En Vue De Leurs Diagnostic". Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2012.
- [17] CHEE-MAUN ONG "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", 2013
- [18] Wang, Wilson. "Analysis of fault detection in rolling element bearings." *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* vol 24, n°3, pp. 42-49. 2021
- [19] B. Trajin, J. Regnier, J. Faucher, Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis, Power Electronics Machine and Drives Conference, Avril 2008, pp. 592-5
-

