

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUAT



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT : Électrotechnique

OPTION : Électromécanique

## Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique*

Présenté par

**SOUDANI EL ARABI**

**BASALEM SAAD**

**Thème**

---

***Modélisation et diagnostic de défauts statoriques de la machine asynchrone en utilisant une approche neuro-floue***

---

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. Saroute Mohammed

MAA

Examineur

Mr. Belkheiri Ahmed

MCA

Président

Mr. Bessedik Sidahmed

Pr

Encadreur

**Année Universitaire 2022 / 2023**

# *Remerciements*

*Nous tenons, en premier lieu à remercier ALLAH pour le courage, la volonté et la patience qu'il nous a donné afin de mener ce travail à terme.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont endurés*

*Nos vifs remerciements à notre encadrant Monsieur **BESSEDIK SIDAHMED**, pour l'appui scientifique et pour sa disponibilité le long de notre travail, nous lui sommes infiniment reconnaissants de la bienveillance dont il a fait preuve à notre égard, de ses encouragements incessants et de la confiance dont il nous a témoigné.*

*Nous remercions vivement les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté, en acceptant de juger notre humble travail, et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous remercions également à nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.*

*UN GRAND MERCI.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de connaissance et de gratitude à :*

*Mon père NACEUR SOUDANI*

*Ma mère AICHA BELKHIR*

*Mes chers frères et mes chères sœurs*

*Ma future femme inchallah et a toute sa famille*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis et mes collègues.*

***EL ARABI***

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de connaissance et de gratitude à :*

*Mes chers parents pour leur amour et leur soutien. Que Dieu leur procure bonne  
santé et longue vie,*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux que j'aime.*

*A toute ma famille et tous mes amis,*

*A ceux que j'ai eu la chance de connaître, dans les meilleurs et pires moments de  
ma vie, à mes amis les plus fidèles.*

*SAAD*

# **RESUME**

## ملخص

تستخدم الآلات غير المتزامنة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية نظرا لتكلفتها المنخفضة وأدائها ومتانتها. ولكن على الرغم من موثوقيتها ومتانتها، فإنها تخضع على حساب تشغيلها، لعدد من القيود ذات الطبيعة المختلفة (الكهربائية والميكانيكية والبيئية)، وهذه الأخيرة تؤدي إلى حدوث أعطال يمكن أن تؤدي إلى توقفات غير مجدولة. من أجل زيادة توافر هذا الجهاز، من المهم اكتشاف العيوب المبكرة التي قد تظهر داخل الجهاز غير المتزامن وتطوير طرق لمراقبة حالة تشغيله. يمكن أن يوفر نهج الغامض العصبي حلا فعالا لمشكلة أتمتة تشخيص الأخطاء .

الهدف من هذا المشروع هو نمذجة وتشخيص عيوب الجزء الثابت للآلة غير المتزامنة باستخدام نظام الاستدلال العصبي الضبابي التكيفي. سيسمح هذا النهج باكتشاف العيوب بمجرد ظهورها وتحديد موقعها بدقة، مما يسهل التعرف عليها وتصحيحها بسرعة. باستخدام هذا النهج، سيكون من الممكن تقليل توقف الإنتاج وما يرتبط به من خسائر مادية ومالية.

**الكلمات المفتاحية:** الآلات غير المتزامنة، العيوب، نظام الاستدلال العصبي الضبابي التكيفي.

# Résumé

La machine asynchrone est très prisée dans l'industrie en raison de ses nombreux avantages, tels que sa simplicité de construction, sa robustesse, sa puissance massique, son coût relativement faible et son entretien minimal. Cependant, au cours de sa durée de vie, cette machine peut être soumise à diverses sollicitations externes ou internes susceptibles de la rendre défaillante. Ces défaillances peuvent entraîner des arrêts de production et des pertes matérielles et financières importantes. Il est donc essentiel de concevoir une approche de diagnostic capable de détecter, de localiser et d'identifier tout défaut ou anomalie pouvant altérer le fonctionnement normal de cette machine de manière précoce.

Dans ce mémoire, l'objectif est d'étudier l'apport et l'efficacité de l'utilisation d'une approche neuro-floue ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) pour la détection et le diagnostic automatique des défauts statoriques de la machine asynchrone. Cette approche permettra de détecter les défauts dès leur apparition et de les localiser avec précision, ce qui facilitera leur identification et leur correction rapide. En utilisant cette approche, il sera possible de minimiser les arrêts de production et les pertes matérielles et financières associées.

**Mots clés :** Machine asynchrone, défaillances, ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System).

## Abstract

The asynchronous machine is highly valued in industry due to its numerous advantages, such as its simple construction, robustness, high power density, relatively low cost, and minimal maintenance requirements. However, during its lifetime, this machine may be subjected to various external or internal stresses that can cause it to fail. These failures can result in production downtime and significant material and financial losses. Therefore, it is essential to develop a diagnostic approach that can detect, locate, and identify any defects or anomalies that may affect the normal operation of the machine at an early stage.

The objective of this dissertation is to investigate the contribution and effectiveness of using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) approach for the automatic detection and diagnosis of stator faults in asynchronous machines. This approach will enable the detection of faults as soon as they occur and their precise location, facilitating their identification and rapid correction. By using this approach, it will be possible to minimize production downtime and associated material and financial losses.

**Keywords:** asynchronous machine, failures, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS).

# **LISTE DES SYMBOLES**

## LISTE DES SYMBOLES

## Symboles liés à la machine asynchrone

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$	Tensions statoriques suivant les axes $a_s, b_s$ et $c_s$
$u_{dqs}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> des tensions statoriques
$u_{\alpha\beta_s}$	Composantes $\alpha$ et $\beta$ des tensions statoriques
$u_{\alpha\beta_r}$	Composantes $\alpha$ et $\beta$ des tensions rotoriques
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants statoriques suivant les axes $a_s, b_s$ et $c_s$
$i_{dqs}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> des courants statoriques
$i_{dqm}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> des courants magnétisant
$i_{dqcc}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> du courant de court-circuit dans les spires court-circuitées
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Flux statoriques suivant les axes $a_s, b_s$ et $c_s$
$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	Flux rotoriques suivant les axes $a_s, b_s$ et $c_s$
$\phi_{dqs}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> du flux statorique
$\phi_{dqr}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> du flux rotorique
$\phi_{\alpha\beta_m}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> du flux magnétisant
$\phi_{\alpha\beta_f}$	Composantes <b>d</b> et <b>q</b> du flux de fuite statorique
$R_s$	Résistance statorique
$R_r$	Résistance rotorique
$L_{sp}$	Inductance propre d'une phase statorique
$L_{rp}$	Inductance propre rotorique
$L_s$	Inductance cyclique statorique
$L_r$	Inductance cyclique rotorique
$L_m$	Inductance mutuelle cyclique stator-rotor
$L_f$	Inductance de fuite
$L_{cc}$	Inductance propre de la bobine de court-circuit $B_{cc}$
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phases du stator
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor
$N_b$	Nombre total de barres au rotor
$N_{ckk}$	Nombre de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
$N_s$	Nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut
$\mu_{cck}$	Pourcentage de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase

## Listes des symboles

---

$\theta_{cc_k}$	Angle de repère du bobinage en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
$\theta_r$	Angle électrique de la position du rotor
$Q(\theta_{cc})$	Matrice donnant l'angle du bobinage en court-circuit
$Q_{cc_k}$	Quadripôle représentant un défaut de court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
$P$	Nombre de paires de pôles
$\omega$	Vitesse angulaire électrique du rotor
$\Omega$	Vitesse de l'arbre moteur, égale à $\omega / P$
$\omega_a$	Vitesse angulaire du repère de référence
$g$	Glissement de la machine
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant
$f_v$	Coefficient de frottement visqueux
$J$	Moment d'inertie

**LISTES DE FIGURES  
ET DES TABLEAUX**

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Les éléments de constitution de la machine asynchrone	<b>Page 3</b>
<b>Figure I.2</b>	Stator de la MAS	<b>Page 3</b>
<b>Figure I.3</b>	Rotor à cage de la MAS	<b>Page 4</b>
<b>Figure I.4</b>	Rotor bobiné de la MAS	<b>Page 5</b>
<b>Figure I.5</b>	Proportion des défauts	<b>Page 6</b>
<b>Figure I.6</b>	Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances	<b>Page 7</b>
<b>Figure I.7</b>	Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances	<b>Page 7</b>
<b>Figure I.8</b>	Causes internes des défauts de la machine asynchrone	<b>Page 8</b>
<b>Figure I.9</b>	Causes externes des défauts de la machine asynchrone	<b>Page 8</b>
<b>Figure I.10</b>	Défaut de court-circuit entre spires	<b>Page 10</b>
<b>Figure I.11</b>	Rupture de barre	<b>Page 12</b>
<b>Figure I.12</b>	Rupture d'anneau de court-circuit	<b>Page 13</b>
<b>Figure I.13</b>	Excentricité statique et dynamique	<b>Page 14</b>
<b>Figure I.14</b>	Excentricité statique, dynamique et mixte	<b>Page 14</b>
<b>Figure I.15</b>	Structure d'un roulement à billes	<b>Page 15</b>
<b>Figure I.16</b>	Schéma de principe de la méthode par l'analyse de spectrale	<b>Page 20</b>
<b>Figure I.17</b>	Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement billement	<b>Page 20</b>
<b>Figure I.18</b>	Le capteur d'émission acoustique de type WD	<b>Page 20</b>

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor	<b>Page 27</b>
<b>Figure II.2</b>	Principe de la transformation de Park	<b>Page 30</b>
<b>Figure II.3</b>	Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor	<b>Page 33</b>
<b>Figure II.4</b>	Modélisation du moteur asynchrone à cage sous Simulink/Matlab	<b>Page 36</b>
<b>Figure II.5</b>	Evolution des courants des phases statoriques au démarrage, puis en charge	<b>Page 37</b>
<b>Figure II.6</b>	Evolution du couple électromagnétique au démarrage, puis en charge	<b>Page 38</b>
<b>Figure II.7</b>	Evolution de la vitesse de rotation au démarrage, puis en charge	<b>Page 39</b>
<b>Figure II.8</b>	Court-circuit de spires sur la phase $b_s$ du stator	<b>Page 40</b>
<b>Figure II.9</b>	Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator	<b>Page 44</b>
<b>Figure II.10</b>	Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques	<b>Page 45</b>
<b>Figure II.11</b>	Modèle du moteur asynchrone à cage avec défaut statorique sous Simulink/Matlab	<b>Page 48</b>
<b>Figure II.12</b>	Courants simulés en charge, puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase $a_s$ et un court-circuit de 15 spires sur la phase $b_s$	<b>Page 50</b>
<b>Figure II.13</b>	Evolution du couple électromagnétique en charge, puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase $a_s$ et un court-circuit de 15 spires sur la phase $b_s$	<b>Page 52</b>
<b>Figure II.14</b>	Vitesse de rotation au démarrage, en charge puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase $a_s$ et un court-circuit de 15 spires sur la phase $b_s$	<b>Page 53</b>

---

## Chapitre III

---

<b>Figure III.1</b>	Le neurone biologique et formel	<b>Page 57</b>
<b>Figure III.2</b>	Système neuro-floue	<b>Page 58</b>
<b>Figure III.3</b>	Principe de fonctionnement du neuro-flou hybride	<b>Page 60</b>
<b>Figure III.4</b>	Modèles Neuro-floue hybride	<b>Page 61</b>
<b>Figure III.5</b>	Structure Neuro- Floue ANFIS	<b>Page 63</b>
<b>Figure III.6</b>	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent de la machine en mode sain.	<b>Page 64</b>
<b>Figure III.7</b>	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour un court- circuit de 2.59% (soit 12 spires) et son zoom.	<b>Page 65</b>
<b>Figure III.8</b>	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour un court- circuit de 4.31% (soit 20 spires) et son zoom.	<b>Page 66</b>
<b>Figure III.9</b>	Schéma synoptique du système de diagnostic ANFIS	<b>Page 67</b>
<b>Figure III.10</b>	Système ANFIS sous Matlab/Simulink	<b>Page 69</b>
<b>Figure III.11</b>	Les fonctions d'appartenance obtenus par l'ANFIS	<b>Page 69</b>
<b>Figure III.12</b>	La sévérité du défaut en fonction de deux entrées	<b>Page 70</b>
<b>Figure III.13</b>	Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteurs pour l'ensemble d'apprentissage	<b>Page 71</b>
<b>Figure III.14</b>	Variation de l'erreur quadratique moyenne MSE (Apprentissage)	<b>Page 71</b>
<b>Figure III.15</b>	Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteurs pour l'ensemble de test	<b>Page 72</b>
<b>Figure III.16</b>	Variation de l'erreur absolue (Test)	<b>Page 72</b>

## **Chapitre I**

---

<b>Tableau I.1</b>	Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone	<b>Page 17</b>
<b>Tableau I.2</b>	Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone	<b>Page 17</b>

## **Chapitre II**

---

<b>Tableau II.1</b>	Caractéristiques de la machine utilisée	<b>Page 37</b>
---------------------	-----------------------------------------	----------------

## **Chapitre III**

---

<b>Tableau III.1</b>	Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones artificiels	<b>Page 59</b>
<b>Tableau III.2</b>	Paramètres de l'approche ANFIS	<b>Page 68</b>

# **TABLE DES MATIERES**

# Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : *Etat de l'art sur les méthodes de diagnostic***

<b>I.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2</b>	<b>Constitution de la machine asynchrone .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.1</b>	<b>Le stator .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2</b>	<b>Le rotor .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3</b>	<b>Les organes mécaniques .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3</b>	<b>Les défaillances des machines asynchrones .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2</b>	<b>Défauts internes et externes .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3</b>	<b>Défaillances électriques .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.1</b>	<b>Défaillances au stator .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.2</b>	<b>Défauts de rotor .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.4</b>	<b>Défaillances mécaniques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4</b>	<b>Différentes techniques de diagnostic des machines électriques .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.1</b>	<b>Méthodes de surveillance de la machine asynchrone .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.2</b>	<b>Redondance physique ou matérielle .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3</b>	<b>Redondance analytique ou méthodes basées sur un modèle.....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.4</b>	<b>Méthodes basées sur l'analyse spectrale.....</b>	<b>19</b>
<b>I.4.5</b>	<b>Méthodes basées sur l'intelligence artificielle .....</b>	<b>22</b>
<b>I.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>24</b>

## **Chapitre II : *Modélisation de la machine asynchrone***

<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>26</b>
<b>II.2</b>	<b>Modélisation du fonctionnement de la machine saine .....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.1</b>	<b>Hypothèses de départ.....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.2</b>	<b>Schéma d'un moteur asynchrone triphasé .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.3</b>	<b>Equations électriques de la machine asynchrone.....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.4</b>	<b>Transformation biphasée de Park .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.5</b>	<b>Modèle de la machine dans le repère de Park .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.6</b>	<b>Simulation de la machine saine.....</b>	<b>34</b>
<b>II.2.7</b>	<b>Résultats de simulation en fonctionnement sain .....</b>	<b>37</b>

<b>II.3</b>	<b>Modèle de défauts statoriques .....</b>	<b>39</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Modélisation du défaut stator dans le repère de Park.....</b>	<b>40</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator .....</b>	<b>41</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Généralisation du modèle de défaut statorique.....</b>	<b>44</b>
<b>II.3.4</b>	<b>Simulation du modèle de défaut statorique .....</b>	<b>47</b>
<b>II.3.5</b>	<b>Résultats de simulation du modèle de défaut statorique .....</b>	<b>48</b>
<b>II.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>54</b>

## **Chapitre III : *Application de l'approche neuro-floue***

<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>56</b>
<b>III.2</b>	<b>Réseau de neurones .....</b>	<b>57</b>
<b>III.3</b>	<b>La logique floue .....</b>	<b>57</b>
<b>III.4</b>	<b>Système Neuro-Flou .....</b>	<b>58</b>
<b>III.4.1</b>	<b>Différents modèles des réseaux Neuro-Flous.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5</b>	<b>Le système Neuro-Flou Hybride .....</b>	<b>60</b>
<b>III.6</b>	<b>Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS) .....</b>	<b>61</b>
<b>III.6.1</b>	<b>Les avantages du modèle ANFIS .....</b>	<b>62</b>
<b>III.6.2</b>	<b>Architecture de l'ANFIS .....</b>	<b>62</b>
<b>III.7</b>	<b>Extraction de signatures de défauts statoriques.....</b>	<b>63</b>
<b>III.8</b>	<b>Construction de la base d'apprentissage et de test.....</b>	<b>67</b>
<b>III.9</b>	<b>Résultats de simulation .....</b>	<b>68</b>
<b>III.10</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>73</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>74</b>
	<b>Références .....</b>	<b>76</b>

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

# Introduction générale

Parmi plusieurs types de moteurs électriques, les machines asynchrones triphasées occupent une place prépondérante. Effectivement, Au moins 90% des systèmes de commande industrielle utilisent des moteurs asynchrones, qui ont graduellement pris la place des machines à courant continu grâce à ses principaux atouts : sa puissance massique, sa robustesse, sa simplicité de construction, son coût relativement faible et un entretien minimum.

En effet, malgré sa robustesse légendaire, la machine asynchrone triphasée subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de sollicitations externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Notre projet s'intéresse à la "*Modélisation et diagnostic de défauts statoriques de la machine asynchrone en utilisant une approche neuro-floue (ANFIS)*".

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

**Le premier chapitre** est consacré à une entrée en la matière du diagnostic, commençant par un bref rappel sur la constitution technologique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, puis une exposition de classification des différents défauts pouvant affecter chaque élément de cette machine (causes, effets, études statistiques). Une synthèse des méthodes et techniques utilisées pour la détection des défauts.

**Le deuxième chapitre** est dédié à l'élaboration des modèles de la machine asynchrone en régime sain et défectueux, ainsi que les différentes grandeurs simulées de la machine. Après avoir étudié le comportement sain de la machine, une connaissance des caractérisations de fonctionnement défectueux est indispensable. La connaissance des signatures de défauts de la machine lors d'une surveillance est indispensable et constitue un point essentiel pour l'élaboration de techniques efficaces de détection et de localisation de défauts. Nous nous intéressons dans ce travail au défaut statorique de type court-circuit entre spires.

**Le troisième chapitre** est consacré à l'application de l'approche neuro-floue ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) afin de détecter les défauts statoriques du type court-circuit entre spires. Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui synthétise le travail effectué.

# Chapitre I

*Etat de l'art sur les méthodes  
de diagnostic*

# Chapitre I

## *Etat de l'art sur les méthodes de diagnostic*

<b>I.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2</b>	<b>Constitution de la machine asynchrone .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.1</b>	<b>Le stator .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2</b>	<b>Le rotor .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3</b>	<b>Les organes mécaniques .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3</b>	<b>Les défaillances des machines asynchrones .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2</b>	<b>Défauts internes et externes .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3</b>	<b>Défaillances électriques .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.1</b>	<b>Défaillances au stator .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.2</b>	<b>Défauts de rotor .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.4</b>	<b>Défaillances mécaniques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4</b>	<b>Différentes techniques de diagnostic des machines électriques .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.1</b>	<b>Méthodes de surveillance de la machine asynchrone .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.2</b>	<b>Redondance physique ou matérielle .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3</b>	<b>Redondance analytique ou méthodes basées sur un modèle.....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.4</b>	<b>Méthodes basées sur l'analyse spectrale.....</b>	<b>19</b>
<b>I.4.5</b>	<b>Méthodes basées sur l'intelligence artificielle .....</b>	<b>22</b>
<b>I.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>24</b>

## I.1 Introduction

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable ont vu le jour dans divers domaines.

Malgré ses qualités, les machines asynchrones peuvent présenter une multitude de défauts électriques, mécaniques, environnementaux, ou magnétiques qui sont prévisibles ou inopportuns. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous présentons dans ce chapitre les divers défauts, leurs causes ainsi que leurs éventuels effets et les solutions possibles pour leurs détections. Puis nous énumérons les méthodes qui sont employées pour le diagnostic des machines [1].

## I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- **Le stator, (partie fixe)** où est fixée l'alimentation, est constitué de disques en tôles magnétiques empilés portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- **Le rotor (partie tournante)**, permet de mettre en rotation la charge mécanique, il est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement qui peut être bobiné semblable à celui du stator ou injecté de type cage.
- **Les organes mécaniques**, permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles

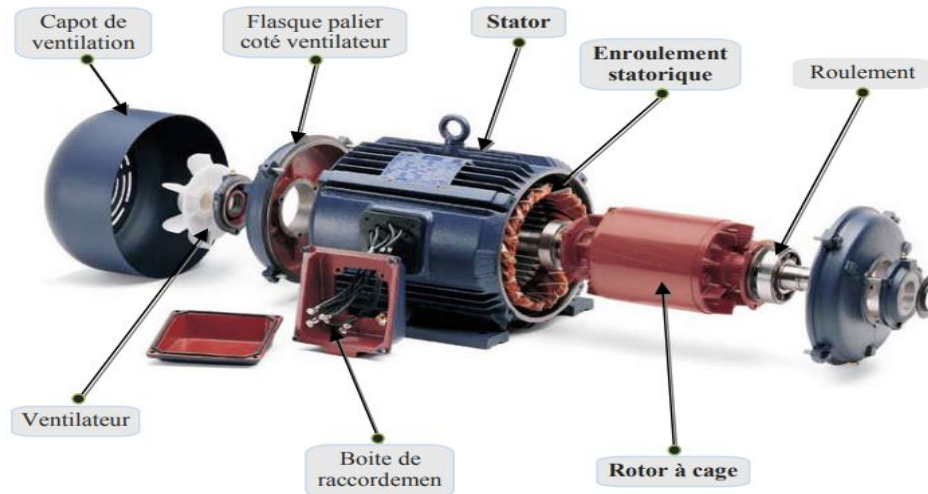


Figure I.1: Les éléments de constitution de la machine asynchrone

### I.2.1 Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer un champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes des bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [2].

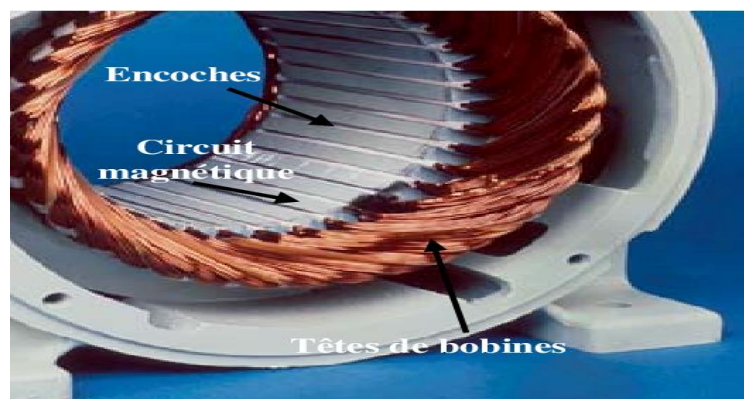


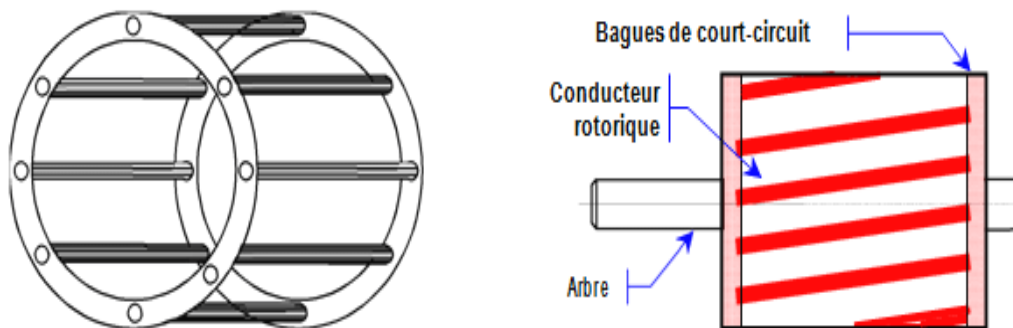
Figure I.2: Stator de la MAS

## I.2.2 Le rotor

Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone peut être de deux types : bobiné ou à cage d'écureuil [2].

- **Le rotor à cage :** est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [2].

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Le rotor à cage d'écureuil peut aussi être considéré comme un enroulement polyphasé fermé.



**Figure I.3: Rotor à cage de la MAS**

- **Le rotor bobiné :** est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans leurs encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors accessibles grâce à un système de bagues- balais positionné sur l'arbre de la machine.

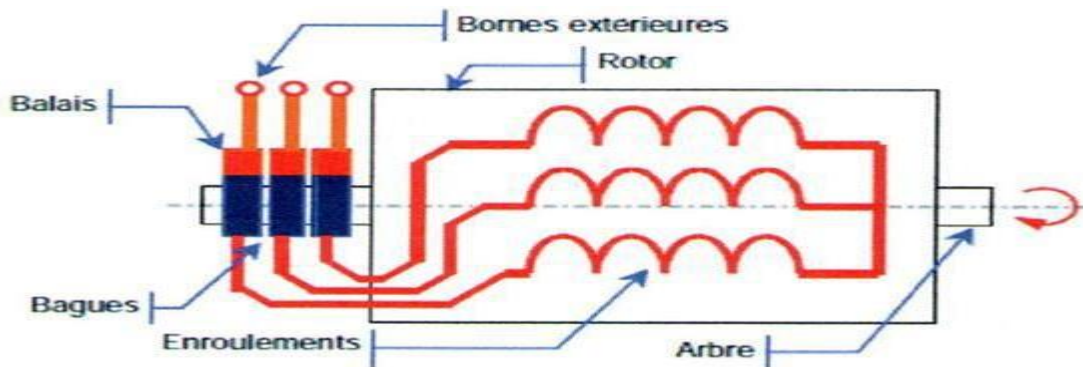


Figure I.4 : Rotor bobiné de la MAS

### I.2.3 Les organes mécaniques

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur le quel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulement pour les machines de petite et moyenne puissance [2].

## I.3 Les défaillances des machines asynchrones

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. La détection de ces défauts en cours d'évolution et en cours d'apparition est l'un des objectifs des chercheurs.

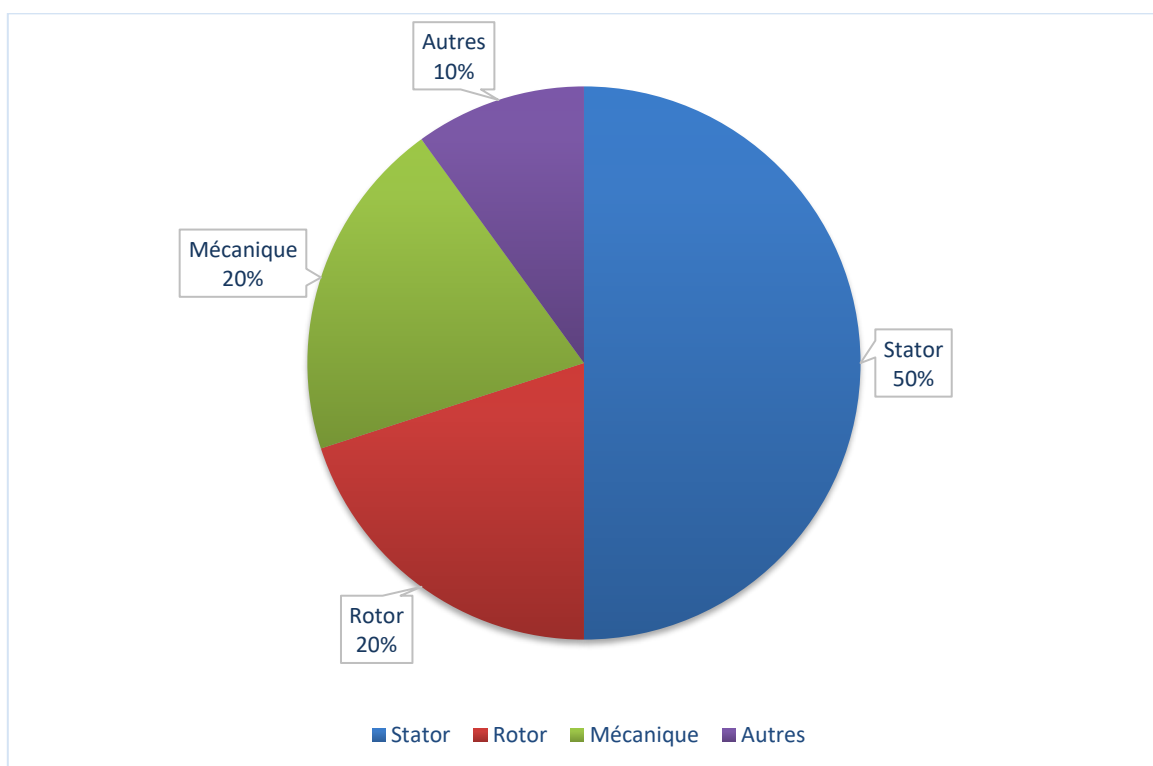
### I.3.1 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [3] [4]:

- ◆ **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts :** surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.

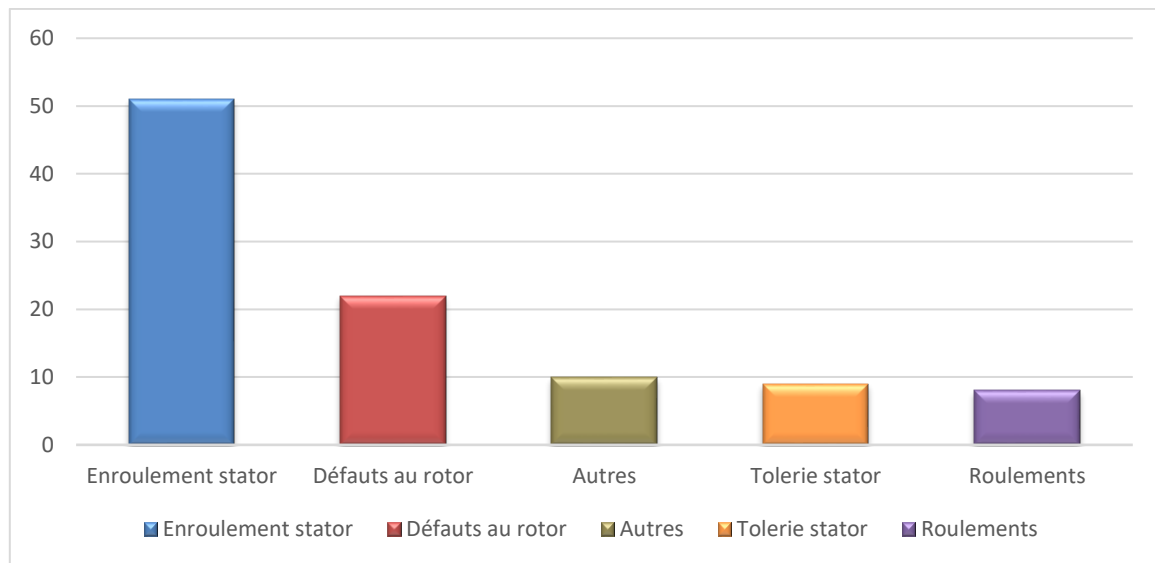
- ◆ **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- ◆ **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de systèmes industriels [3] [5] sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (50KW à 200KW), a donné les résultats suivants (**Figure I.5**).



**Figure I.5: Proportion des défauts**

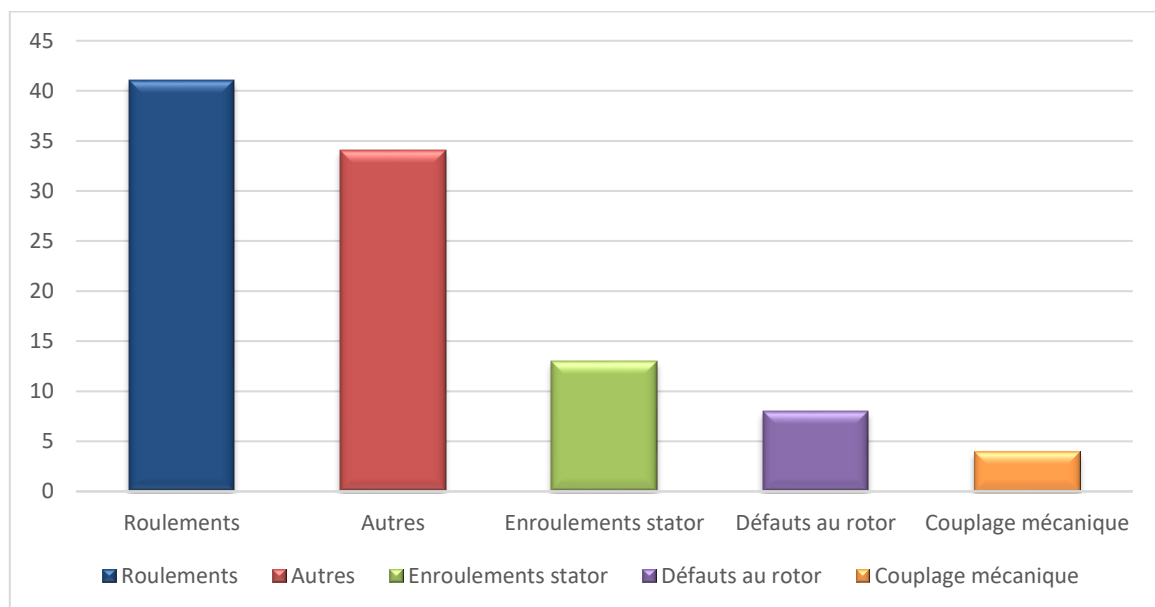
La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur **la figure I.6**.



**Figure I.6: Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances**

Les défauts statoriques sont les plus rencontrés dans ces types de machines.

Une autre étude statistique [6] faite sur des machines de grande puissance (de 100kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur **la figure I.7**.



**Figure I.7: Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances**

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [3].

### I.3.2 Défauts internes et externes

Il existe 2 types de défauts principaux : Internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures I.8 et I.9. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique.). Tandis que, les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine [3] [7].

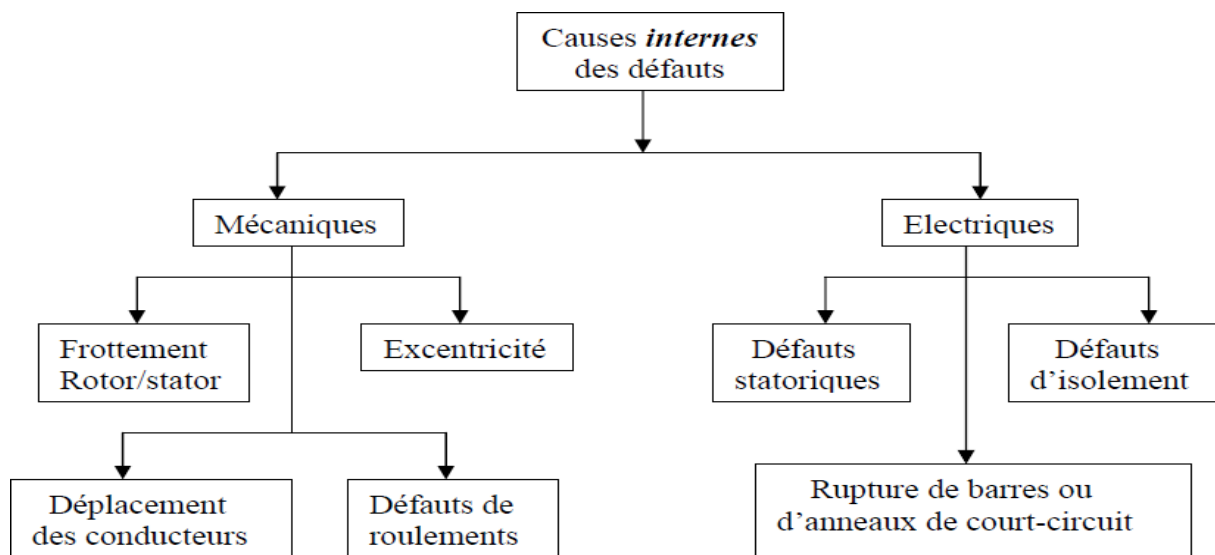


Figure I.8: Causes internes des défauts de la machine asynchrone

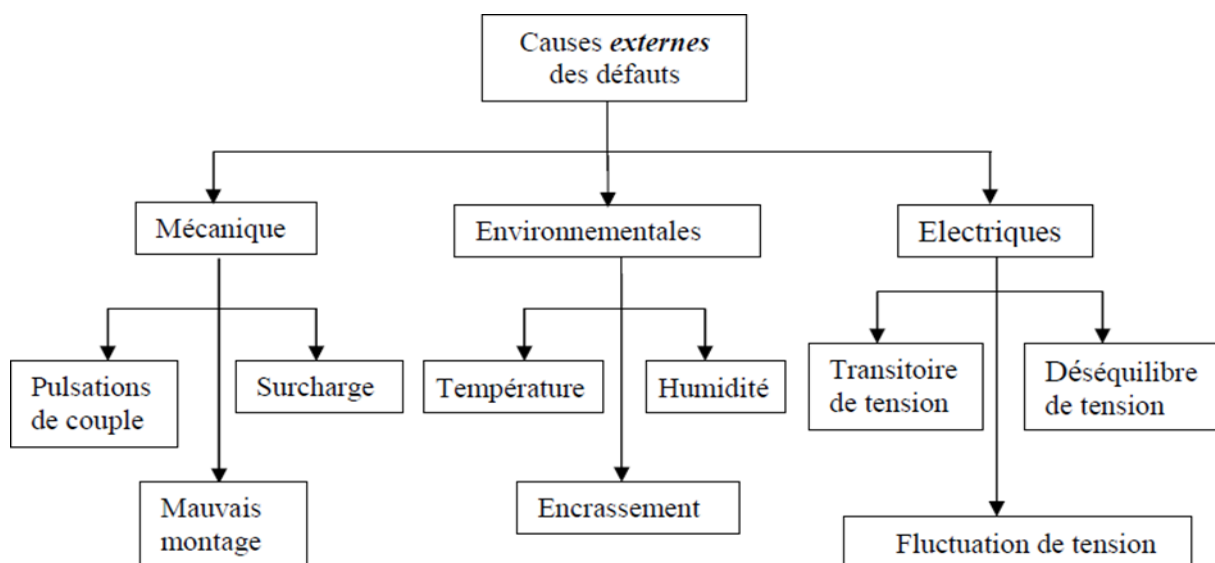


Figure I.9: Causes externes des défauts de la machine asynchrone

### **I.3.3 Défaillances électriques**

#### **I.3.3.1 Défaillances au stator**

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression, etc.). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [3] [8].

- **Défaut d'isolant ;**
- **Court-circuit entre spires ;**
- **Court-circuit entre phases ;**
- **Court-circuit phase/bâti ;**
- **Déséquilibre d'alimentation ;**
- **Défaut de circuit magnétique.**

##### **I.3.3.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. 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. 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 [9].

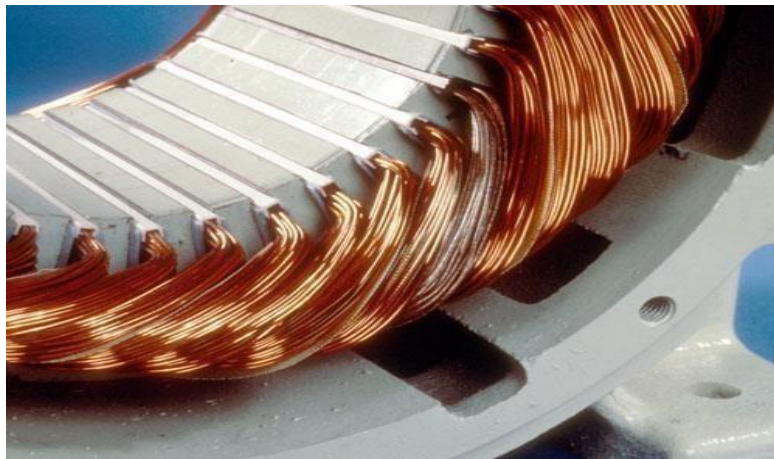
Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- 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.

- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel 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.

### **I.3.3.1.2 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. Il 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 2<sup>ème</sup> court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [8] [9] [10] [11].



**Figure I.10 : Défaut de court-circuit entre spires**

### **I.3.3.1.3 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 [8] [9] [10] [11].

### **I.3.3.1.4 Court-circuit phase/bâti**

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [9].

### **I.3.3.1.5 Défauts 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, etc. [9].

### I.3.3.2 Défauts de rotor

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer des problèmes tels que : thermique (surcharge), électromagnétique (excentricité), résiduel (déformation), dynamique (arbre de transmission) et mécanique (roulement). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit [3]:

- Rupture de barres ;
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit ;
- Excentricité statique et dynamique.

#### I.3.3.2.1 Ruptures de barres

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 [9].



Figure I.11 : Rupture de barre

### I.3.3.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [9] [10] [12].

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir 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.

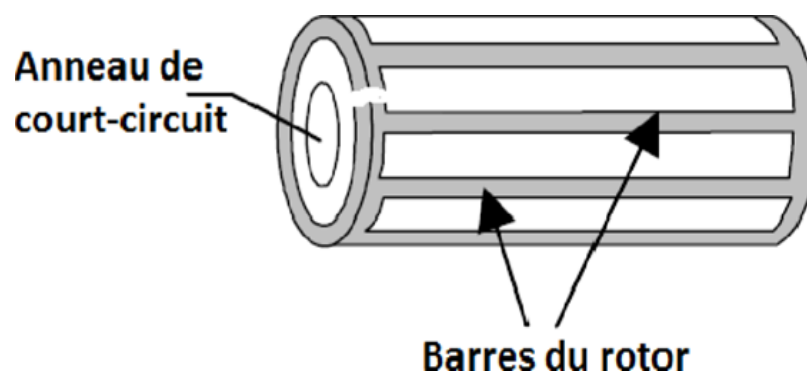


Figure I.12 : Rupture d'anneau de court-circuit

### I.3.3.2.3 Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, (figure I.13). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [8] [9] [13] [14].

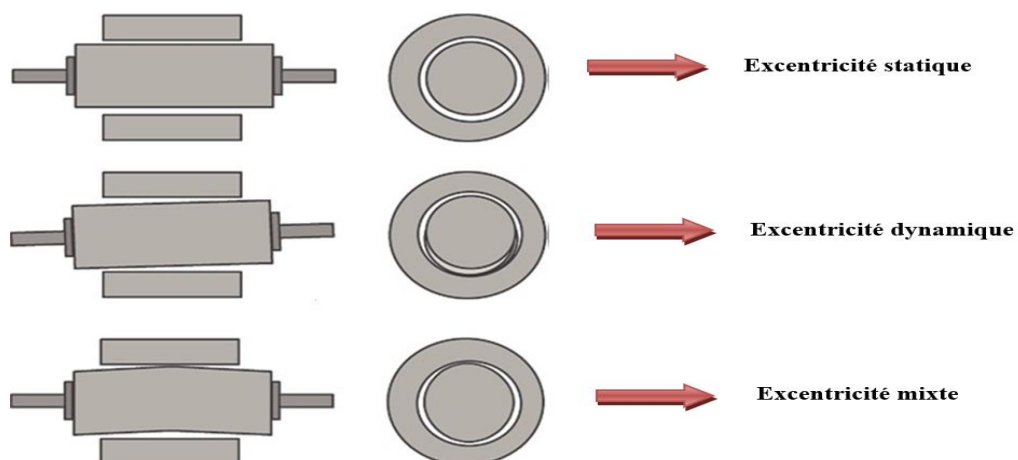
- **L'excentricité statique**, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- **L'excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
- **L'excentricité** qu'on pourrait qualifier de '**mixte**', associant les deux cas précédemment cités



**Figure I.13 : Excentricité statique et dynamique**

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.



**Figure I.14 : Excentricité statique, dynamique et mixte**

## I.3.4 Défaillances mécaniques

### I.3.4.1 Défaut de roulement

Les roulements sont constitués généralement de deux bagues, intérieure et extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (**figure I.15**)

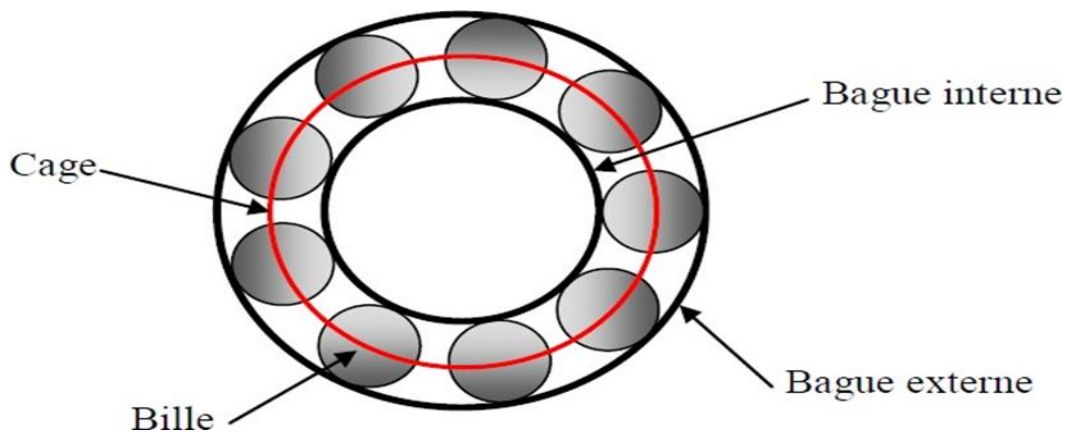
Les défauts de roulement sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité. Les défauts de roulements à billes peuvent être classifiés comme suit [9]:

- **Défaut de la bague extérieure ;**
- **Défaut de bague intérieure ;**
- **Défaut de billes.**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques et assurent la fonction de guidage en rotation.

Les roulements peuvent être endommagés par des causes comme :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable,
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- Mauvais alignement du rotor,
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.



**Figure I.15 : Structure d'un roulement à billes**

### **I.3.4.2 Autres défaillances mécaniques**

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs. Enfin, pour résumer cette partie, **les tableaux I.1 et I.2** présentent les principales défaillances pouvant affectées le moteur asynchrone à cage d'écureuil ainsi les causes des défauts et leurs conséquences sur le moteur [9].

**Tableau I.1:** Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone

Composants	Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable	
Machine asynchrone à cage d'écureuil	Stator	Isolant dans un enroulement	-Dégradations de l'isolant à la fabrication -Tension élevée -Courant élevé -Vibrations mécaniques -Température élevée -Vieillessement naturel	Court-circuit dans l'enroulement	-Température -Vibrations -Courants
		Court-circuit entre spires	- Défaut d'isolants	-Elévation courants statoriques, variation d'amplitude sur les autres phases. -Modification de facteur de puissance. -Elévation du courant rotorique.	-Température -Vibration -Courant -Puissance instantané
		Court-circuit entre phases	- Décharge partielle	<b>Proche de l'alimentation :</b> - Fusion des conducteurs - Disjonction par les protections <b>Proche du neutre :</b> -Elévation courants des barres et les anneaux -Déséquilibre des courants statoriques	-Courants (déséquilibre) -Température -Tension -Puissance instantanée
		Court-circuit phase/bâti	- Dégradation des isolants	-Elévation courant dans la phase -Elévation de la température -Création de défauts d'isolants -Apparition d'une composante homopolaire -Création couple pulsatoire	-Courant de fuite
		Circuit magnétique		-Dissymétrie du fonctionnement de la machine -Surchauffe, surtension -Elévation du courant	-Température -Courants -Tensions
		Déséquilibre d'alimentation	-Problème sur le réseau d'alimentation. -Défaillance du convertisseur.	-Elévation des courants dans les autres phases. -Elévation vibrations. -Elévation de l'échauffement.	-Vibrations -Courants. -Tensions. -Puissance.

**Tableau I.2:** Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone

Composants	Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable	
Machine asynchrone à cage d'écureuil	Rotor	Ruptures de barres	-Surcharge.	-Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique. -Oscillations de la vitesse. -Vibrations mécaniques.	-Vibrations. -Couple électromagnétique. -Courant.
		Ruptures d'anneaux	-Bulles coulées. -Dilatations différentielles -Surcharge du couple. -Détérioration des conditions de fonctionnement	-Déséquilibre la répartition des courants entraînant la modulation d'amplitude des courants statoriques.	-Courant. -Vibrations.
		Excentricité	-Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage. -Usure des roulements. -Défaut de charge. -Défaut de fabrication.	-Balourd (mécanique et magnétique) entraînant les oscillations de couple.	-Vibrations. -Courants. -Couple.
		Roulements	-Usure -Température élevée -Perte de lubrification -Défaut de montage -Huile contaminée	-Oscillations du couple de charge entraînant une augmentation des pertes et des vibrations. -Altération de l'équilibre magnétique	-Vibrations -Courants -Puissance instantanée -Variables mécaniques

## **I.4 Différentes techniques de diagnostic des machines électriques [16]**

Les chercheurs de par le monde travaillent sur le diagnostic des machines asynchrones afin d'améliorer et de faciliter la détection des anomalies pouvant les affecter. La raison pour laquelle, nous avons choisi de décrire sommairement les méthodes les plus couramment rencontrées pour le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone.

### **I.4.1 Méthodes de surveillance de la machine asynchrone**

**La surveillance** : est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes, la continuité de service et la protection du matériel et des personnels.

Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle.

Les deux principales tâches de diagnostic sont :

- La détection : la détection consiste à signaler l'existence du défaut,
- La localisation des défauts : qui a pour objet de trouver le type de défaut

### **I.4.2 Redondance physique ou matérielle**

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière.

Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non.

Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter.

Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires ou les avions.

### **I.4.3 Redondance analytique ou méthodes basées sur un modèle**

Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle.

Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes principales :

- La génération de résidus ;
- La localisation des défauts.

Les méthodes à base de modèles analytiques exploitent des données numériques issues d'un modèle du système étudié.

Ces données sont ensuite comparées aux mesures effectuées sur le système, un écart révélant une anomalie.

Ces méthodes reposent donc sur le principe de redondance analytique : des équations analytiques décrivant le fonctionnement nominal du système sont utilisées pour établir puis vérifier des relations liant les grandeurs mesurées entre elles.

Pour mettre au point une telle procédure de diagnostic, la première étape consiste à mettre au point un modèle du système. Une fois le modèle validé, la procédure de diagnostic en elle-même comporte trois phases :

- La génération de résidus, grandeurs sensibles aux défauts ;
- La détection de défauts éventuellement présents, par l'analyse des résidus ;
- La localisation et l'identification du type de défaillance.

Les méthodes de surveillance à base de modèles utilisent la redondance d'information présente sur un système.

Deux types de redondance peuvent être distingués : **la redondance matérielle** et **la redondance analytique**.

#### **I.4.4 Méthodes basées sur l'analyse spectrale**

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres et/ou de portions d'anneaux au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages.

Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine (**figure I.16**)

Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique).

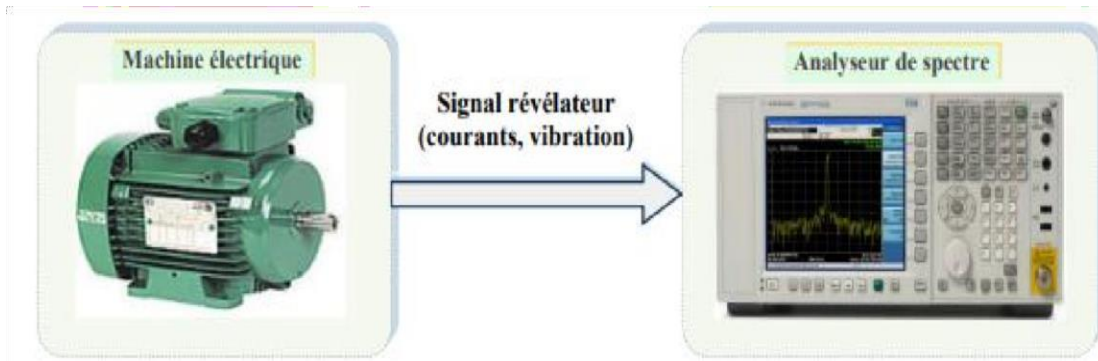


Figure I.16 : Schéma de principe de la méthode par l'analyse de spectrale

Ces méthodes ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte.

#### A - Analyses vibratoires de la machine

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

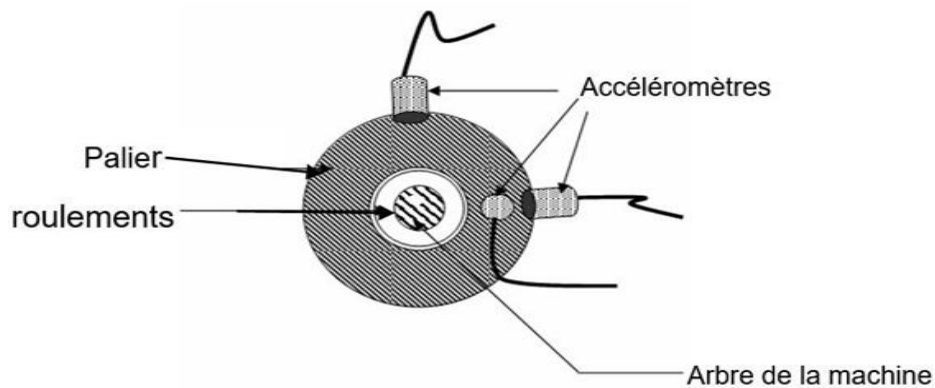


Figure I.17 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement bilent

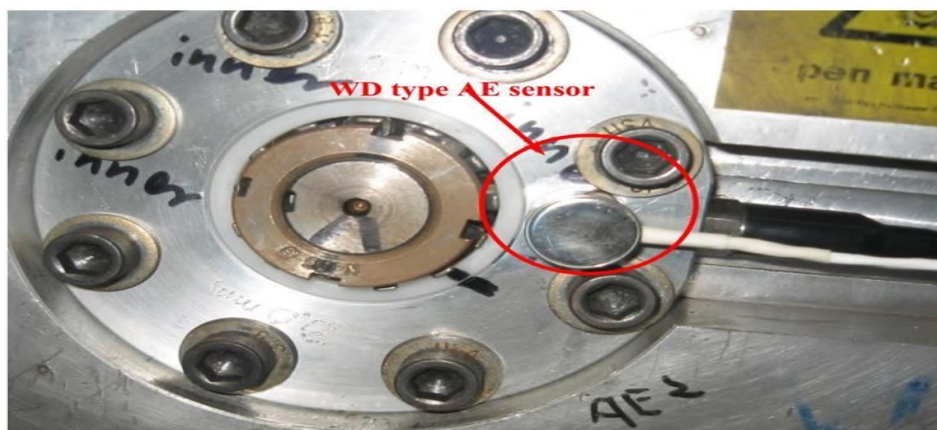


Figure I.18 : Le capteur d'émission acoustique de type WD

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

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

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

### **B - Analyse des flux**

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator.

Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts.

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

### **C - Analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique.

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état du moteur.

## **D - Analyse des courants statoriques**

Les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (flux, couple mètre, accéléromètres...) souvent onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants.

Pour ces inconvénients et pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons :

Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts.

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, présentés dans le spectre du courant.

Cette approche de surveillance des entraînements électriques a été largement utilisée depuis ces dernières années elle est connue sous le nom de **MCSA (Motor Current Signature Analysis)**.

L'avantage, comparé aux signaux précédents, est que les capteurs de courants sont désormais présents dans tous les systèmes de commande des entraînements électriques et offrent donc, un accès aisé à la mesure sans une implémentation (de capteur) supplémentaire.

### **I.4.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle**

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle.

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions.

L'intérêt de recourir à l'intelligence artificielle pour résoudre le problème de diagnostic des défaillances, est dû principalement aux avantages suivants :

1. La non disponibilité de modèle explicite pour le cas de défaillances est un problème que les techniques de l'intelligence artificielle (AI) peuvent résoudre car basées sur le non nécessité de modélisation.
2. L'insertion de connaissance d'expert, données sous forme linguistique soit pour la détection, ou la localisation de défauts ce qui permet de rendre le système de contrôle commande apte à effectuer l'insertion automatique des symptômes et la mémorisation de chaque nouvel acte (possibilité de son auto instruction).
3. La simplicité dans la mise en œuvre, une fois préparées les règles d'expert.
4. La robustesse face aux perturbations.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

A - Réseaux de neurones artificiels

B - Reconnaissances des formes (RDF)

C - Logique floue

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel de la constitution de la machine asynchrone, en expliquant les différentes parties qui la composent, telles que le stator, le rotor, les enroulements, les barres de rotor, les paliers, etc. Ensuite, nous avons présenté une classification des défaillances de la machine asynchrone, en distinguant les défaillances statoriques, rotoriques et mécaniques. Pour chaque type de défaillance, nous avons décrit les symptômes qui peuvent se manifester et les conséquences possibles sur le fonctionnement de la machine. Enfin, nous avons présenté une liste non exhaustive des différentes méthodes de diagnostic des défaillances de la machine asynchrone. Nous avons expliqué brièvement le fonctionnement de chaque méthode, en mettant en évidence ses avantages et ses limites.

# **Chapitre II**

## *Modélisation de la machine asynchrone*

# Chapitre II

## *Modélisation de la machine asynchrone*

<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>26</b>
<b>II.2</b>	<b>Modélisation du fonctionnement de la machine saine .....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.1</b>	<b>Hypothèses de départ.....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.2</b>	<b>Schéma d'un moteur asynchrone triphasé .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.3</b>	<b>Equations électriques de la machine asynchrone.....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.4</b>	<b>Transformation biphasée de Park .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.5</b>	<b>Modèle de la machine dans le repère de Park.....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.6</b>	<b>Simulation de la machine saine.....</b>	<b>34</b>
<b>II.2.7</b>	<b>Résultats de simulation en fonctionnement sain .....</b>	<b>37</b>
<b>II.3</b>	<b>Modèle de défauts statoriques.....</b>	<b>39</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Modélisation du défaut stator dans le repère de Park.....</b>	<b>40</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator .....</b>	<b>41</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Généralisation du modèle de défaut statorique.....</b>	<b>44</b>
<b>II.3.4</b>	<b>Simulation du modèle de défaut statorique .....</b>	<b>47</b>
<b>II.3.5</b>	<b>Résultats de simulation du modèle de défaut statorique.....</b>	<b>48</b>
<b>II.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>54</b>

## II.1 Introduction

La modélisation mathématique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil est essentielle pour améliorer ses performances et détecter ses défaillances. Elle permet de prévoir ses performances dans différentes conditions de fonctionnement et simplifie l'analyse des résultats en utilisant une transformation de Park pour modéliser la machine dans un référentiel biphasé. Ce chapitre présente le modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil en considérant le défaut de court-circuit entre spires au stator. Le modèle prend en compte toutes les interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor de la machine, ainsi que les paramètres électriques et mécaniques. Cela permet de prédire les performances de la machine dans différentes conditions de fonctionnement, y compris en présence de défaillances.

## II.2 Modélisation du fonctionnement de la machine saine

Dans cette section, nous allons considérer le cas des moteurs asynchrones à cage d'écuréuil. En revanche, on admet que sa structure rotorique est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné. Le champ tournant induit des courants rotoriques dans les barreaux de la cage d'écuréuil (ou enroulements) : ces courants induits génèrent un couple qui permet au rotor de tourner à une vitesse proche de celle du champ tournant, mais nécessairement inférieure.

Conserver les équations supposées de la machine asynchrone est classique, nous n'évoquerons que les points qui nous paraissent essentiels et les choix qui nous sont propres par rapport à ce que nous faisons habituellement.

### II.2.1 Hypothèses de départ

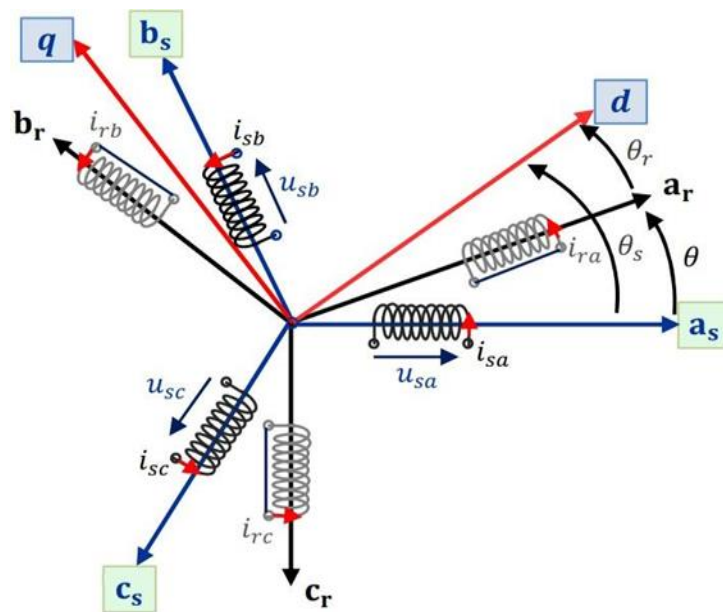
Le modèle de la MAS est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes [17] [18] [19] :

- ◆ La machine est symétrique à entrefer constant,
- ◆ La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale,
- ◆ Le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante,
- ◆ Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligeables,
- ◆ L'effet des encoches est négligé.

Toutes ces hypothèses permettent ainsi de s'appuyer sur des propriétés telles que l'additivité du flux magnétique, l'invariance des inductances propres, ou la loi d'évolution des inductances mutuelles entre le rotor et le stator sinusoïdal.

## II.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone triphasé

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par **la figure II.1**. Elle comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face internes du stator sont longé trois enroulements identiques, à  $P$  paire de pôles ; leurs axes sont décalés de  $120^\circ$  [20].



**Figure II.1** : Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor

## II.2.3 Equations électriques de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée par deux circuits couplés électromagnétiquement.

Pour représenter le modèle d'une machine dans un repère triphasé, il faut écrire les équations différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor selon le modèle présenté sur **la figure II.1**.

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle [21]:

$$\begin{cases} u_s = [R_s] \cdot i_s + \frac{d}{dt} \phi_s \\ 0 = [R_r] \cdot i_r + \frac{d}{dt} \phi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_s &= \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}; \quad i_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \quad \phi_s = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ u_r &= \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; \quad \phi_r = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$u_s, u_r$  : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$i_s, i_r$  : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$\phi_s, \phi_r$  : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[R_s], [R_r]$  : Matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les flux totalisés  $\phi_s$  et  $\phi_r$  des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} \phi_s = [L_s] \cdot i_s + [M_{rs}] \cdot i_r \\ \phi_r = [M_{rs}] \cdot i_s + [L_r] \cdot i_r \end{cases} \quad (2)$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statoriques sont égales, de même pour celles du rotor. Les matrices  $[L_s]$  et  $[L_r]$  deviennent :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} & M_r & M_r \\ M_r & L_{rp} & M_r \\ M_r & M_r & L_{rp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$L_{sp}, L_{rp}$  : Inductances propres statoriques et rotoriques.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) \\ \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) \\ \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Le modèle de représentation d'un moteur asynchrone que nous venons de présenter présente l'inconvénient d'être relativement complexe, puisque la matrice contient des éléments qui varient selon l'angle de rotation  $\theta$ . Pour simplifier le modèle, des transformations mathématiques sont appliquées au système. Ce dernier est souvent utilisé pour étudier les machines tournantes, notamment en changeant le référentiel  $(abc)$  en un référentiel diphasique  $(dq)$ . Cette transformation est la transformation du Park. En plus d'être simple, le modèle de Park permet de réduire significativement le temps de calcul et donc le temps de simulation [21].

## II.2.4 Transformation biphasée de Park

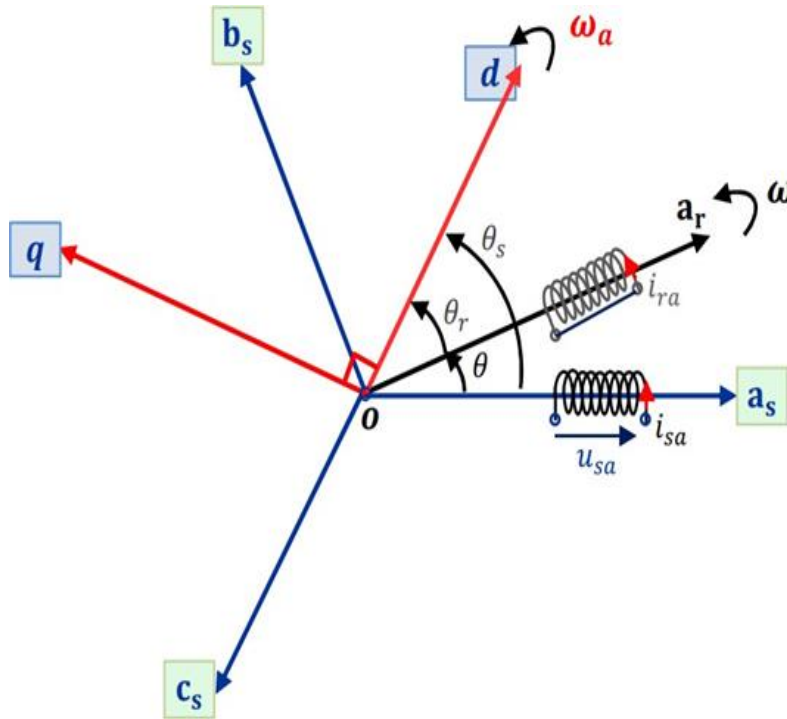
Le principe de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi, à l'identique, par un système biphasé de deux bobines décalées de  $\pi/2$  dans l'espace, alimentées par des courants déphasés de  $\pi/2$  dans le temps. Cette transformation est orthonormée, elle conserve donc la puissance instantanée dans les enroulements équivalents [18] [22] [23]. La transformation de Park consiste à projeter les grandeurs statoriques et rotoriques sur deux axes en quadrature, elle fait appel à deux changements de coordonnées : la transformation de Concordia et un changement de repère par rotation. Il est à noter que la transformation de Park est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine).

Comme la montre la figure II.2, nous remplaçons les trois phases d'axes fixes  $(a_s, b_s, c_s)$  du stator par un enroulement équivalent formé des deux bobinages d'axes en quadrature  $(s_d, s_q)$  tournant à la vitesse  $\omega_a$ . De même, au rotor, nous substituons deux bobinages  $r_d$  et  $r_q$  aux enroulements triphasés équivalents. Nous notons par  $\theta_s$  (resp.  $\theta_r$ ). L'angle de transformation de

Park des grandeurs statoriques (resp. Rotoriques). Nous remarquons qu'ils sont liés à  $\theta$  par la relation (6) suivante :

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (6)$$

Ceci simplifie les équations et par conséquent le modèle final.



**Figure II.2 : Principe de la transformation de Park**

Le système de coordonnées fixe ( $a_s, b_s, c_s$ ) est ainsi transformé en un système de coordonnées orthogonales tournant (dqo). Comme la machine est équilibrée, les composantes homopolaires "o" sont nulles. Nous passons des coordonnées triphasées ( $a_s, b_s, c_s$ ) aux nouvelles coordonnées ( $dq$ ) de Park, en appliquant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} = P(-\theta) \cdot T_{32} \cdot \begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} = T_{23} \cdot P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Où :

-  $x$  : Tension, courant ou flux, et :

-  $d$  : indice de l'axe direct.

-  $q$  : indice de l'axe en quadrature.

- $T_{32}$ , la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale, s'écrit :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(0) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Et :

$$T_{23} = [T_{32}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

- La matrice de rotation d'angle  $\theta$  :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

- La matrice de rotation d'angle  $(-\theta)$  :

$$P(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

## II.2.5 Modèle de la machine dans le repère de Park

Dans un souci de simplification du modèle de la machine asynchrone, on choisit de totaliser les fuites magnétiques au stator [18] [21] [24].

Par définition, le système d'axes  $(d, q)$  tourne à la vitesse  $\omega_a$ . Il est intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, pour un référentiel noté  $(x)$  tournant à une vitesse  $\omega_a$  par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine s'écrit [18] [21] [25] :

$$\begin{cases} u_{dq_s}^{(x)} = R_s i_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{dq_s}^{(x)} \\ u_{dq_r}^{(x)} = 0 = R_r i_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) P \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{dq_r}^{(x)} \\ \phi_{dq_s}^{(x)} = L_s i_{dq_s}^{(x)} + L_m i_{dq_r}^{(x)} \\ \phi_{dq_r}^{(x)} = L_m i_{dq_s}^{(x)} + L_r i_{dq_r}^{(x)} \end{cases} \quad (9)$$

Avec :

$L_s = L_{sp} - M_s$  : inductance cyclique statorique

$L_r = L_{rp} - M_r$  : Inductance cyclique rotorique

$L_m = 3/2 M_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor

$\omega = p\Omega$  : pulsation électrique de rotor

Et :

$$P \left( \frac{\pi}{2} \right) = \begin{bmatrix} \cos \left( \frac{\pi}{2} \right) & \cos \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \\ \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) & \sin \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix}$$

Si on fait l'hypothèse que les fuites magnétiques sont totalisées au stator et en définissant :

$$\begin{cases} L_s = L_f + L_m \\ L_r = L_m \end{cases} \quad (10)$$

L'équation (9) se réécrit alors :

$$\begin{cases} u_{dq_s}^{(x)} = R_s i_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{dq_s}^{(x)} \\ u_{dq_r}^{(x)} = 0 = R_r i_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) P \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{dq_r}^{(x)} \\ \phi_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) i_{dq_s}^{(x)} + L_m i_{dq_r}^{(x)} \\ \phi_{dq_r}^{(x)} = L_m (i_{dq_s}^{(x)} + i_{dq_r}^{(x)}) \end{cases} \quad (11)$$

Le fonctionnement de la machine asynchrone est habituellement analysé dans trois repères : un repère lié au stator, un repère lié au rotor et un repère lié au champ tournant. Le choix du référentiel dépend de la vitesse de rotation  $\omega_a$  du système d'axes (dq) selon [19] [21] :

- Si le référentiel est fixe par rapport au stator alors  $\omega_a = 0$  et on obtient un système électrique où les grandeurs statoriques sont purement alternatives et à la fréquence de l'alimentation. La simulation de la machine asynchrone dans ce repère n'exige donc aucune connaissance de la position du rotor, ce qui constitue un avantage pour la commande sans capteur de position. L'inconvénient majeur est la manipulation de signaux à fréquence élevée.
- Si Le référentiel tourne à la vitesse de synchronisme alors  $\omega_a = \omega_s = 2\pi f_s$  et on obtient un système électrique purement continu qui est très bien adapté aux techniques d'identification. Cependant la position du champ tournant doit être reconstituée à chaque instant d'échantillonnage.
- Si le référentiel est fixe par rapport au rotor alors  $\omega_a = \omega$  et les signaux électriques sont alors quasi-continus. La pulsation des grandeurs électriques est égale à  $g\omega$  (où  $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  est le glissement de la machine) qui est faible dans les conditions réelles de fonctionnement. Lorsqu'on a accès à la position mécanique, ce repère est privilégié du fait de la quasi-continuité des grandeurs électriques.

Dans ce travail, nous avons choisi la référence associée au rotor car c'était celle qui nécessitait le moins de transformations/estimations.

La figure II.3 représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique, avec les fuites totalisées au stator.

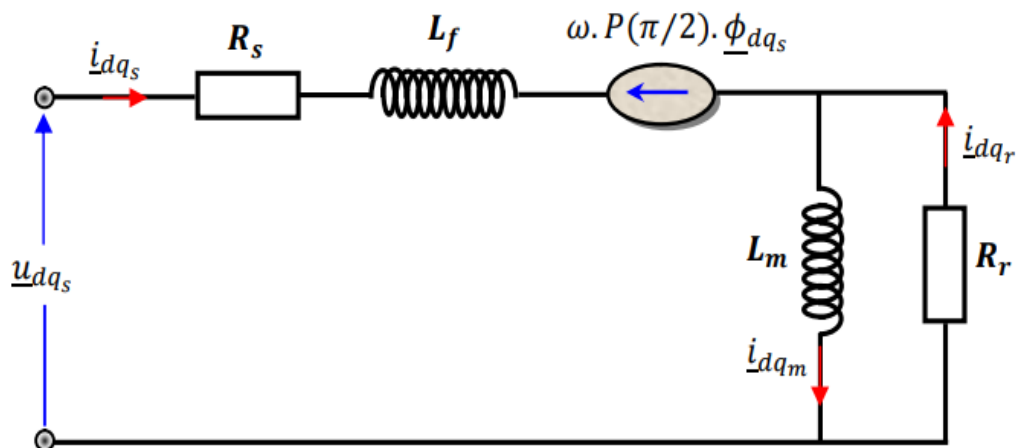


Figure II.3: Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor

Ce modèle est caractérisé par quatre paramètres physique sont :  $R_s$ ,  $R_r$ ,  $L_f$ ,  $L_m$  que nous allons chercher à estimer par la suite dans le cas d'une machine saine.

Pour pouvoir accéder au rotor et concevoir un modèle complet de la machine, l'équation mécanique suivante doivent être considérée :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \cdot \Omega - C_r \quad (12)$$

$\Omega = \dot{\theta} = \frac{\omega}{p}$  : La vitesse de l'arbre moteur.

J: Le moment d'inertie.

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$f_v$  : le coefficient de frottement visqueux.

- Le couple électromagnétique peut s'écrire dans le repère diphasé lié au rotor :

$$C_{em} = p \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) \quad (13)$$

En plaçant l'équation (13) dans (12) on obtient l'équation différentielle électromécanique de la pulsation :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega - \frac{p}{J} \cdot C_r \quad (14)$$

La modélisation de la machine de cette manière réduit la quantité nécessaire pour pouvoir simuler le fonctionnement de la machine. En fait, seules les valeurs instantanées de la tension statorique et du couple résistant doivent être déterminées pour les appliquer à la machine.

## II.2.6 Simulation de la machine saine

En considérant les dynamiques des flux rotoriques  $\phi_{dqr}$ , des courants statoriques  $i_{dqs}$  et les dynamiques électromécaniques ( $\omega$ ,  $\theta$ ), le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires [21] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (15)$$

Avec :

$x = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr} \ \omega \ \theta]^T$  : Vecteur d'état

$u = [u_{ds} \ u_{qs} \ C_r]^T$  et  $y = [i_{ds} \ i_{qs} \ \omega]^T$  : entrées et sorties du système, respectivement.

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i_{ds} + \omega \cdot i_{qs} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{qr} \\ -\omega \cdot i_{ds} - \frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i_{qs} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{qr} \\ R_r \cdot i_{ds} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{dr} \\ R_r \cdot i_{qs} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, h(x) = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}$$

La résolution des équations de ce modèle a été faite par la méthode de RungeKutta d'ordre 4 avec une période d'échantillonnage de 0.7 ms. Nous excitons la machine avec une entrée triphasée sinusoïdale  $u_s$ , et à chaque pas d'échantillonnage, nous calculons les tensions statoriques  $u_{dqs}$  de Park [21] :

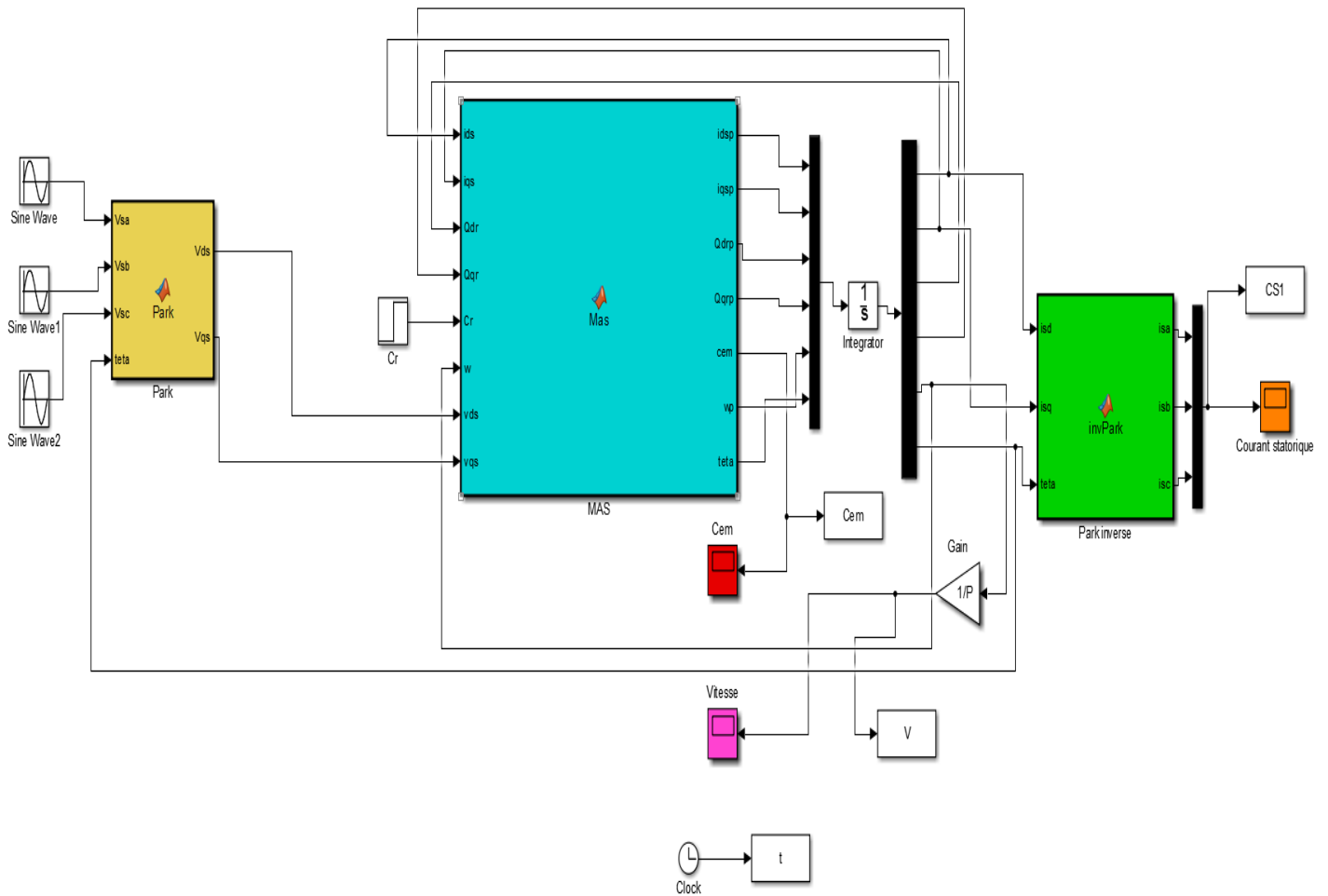
$$u_{dqs} = P(-\theta) \cdot T_{23} \cdot u_s \quad (16)$$

Pour pouvoir tracer les courants de chaque phase statorique, nous les avons calculés en simulation à partir des courants de Park  $i_{dqs}$  [21]:

$$i_s = T_{32} \cdot P(\theta) \cdot i_{dqs} \quad (17)$$

Le modèle de simulation de la machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée. Les variables d'entrée sont les trois tensions  $u_a, u_b, u_c$  et le couple de charge  $C_r$ .

Le modèle Simulink de la machine apparaît sous forme de différents blocs donnés sur la **figure II.4**. Le bloc source représente l'alimentation de la machine asynchrone par le réseau électrique de 220/380 V à 50 Hz, le bloc de Park contient les équations de la transformation de Park et à l'intérieur du bloc MAS sont regroupées les équations de la machine asynchrone.



**Figure II.4 : Modélisation du moteur asynchrone à cage sous Simulink/Matlab**

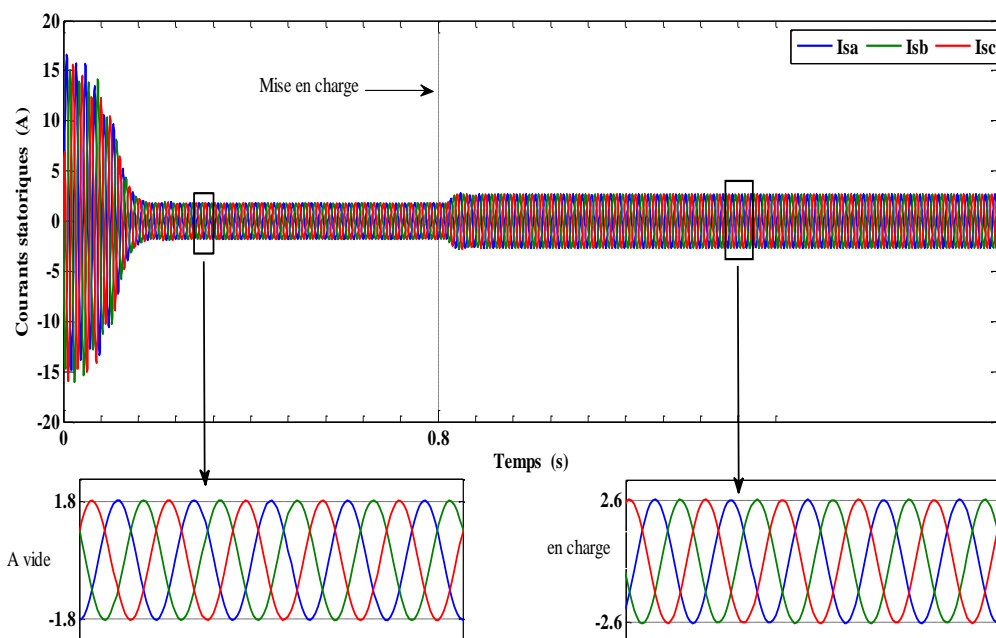
Les simulations ont été effectuées sous Simulink/Matlab. Les paramètres de la machine utilisée dans cette modélisation sont groupés dans le tableau **II.1** :

**Tableau II.1:** Caractéristiques de la machine utilisée [19] [21]

220/380V ; 50Hz ; 1.1kW	
Les paramètres	Valeurs
Résistance statorique	$R_s = 9.8\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 5.3\Omega$
Inductance rotorique	$L_m = 0.5H$
Inductance de fuites	$L_f = 0.04H$
Coefficient de frottement visqueux	$f_v = 1.1910^{-3} \text{ N.m.s/rad}$
Moment d'inertie	$J = 12.510^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Nombre de paires de pôles	$P = 2$
Nombre de barres au rotor	$N_b = 28$
Nombre de spires par phase	$N_s = 464$

### II.2.7 Résultats de simulation en fonctionnement sain

Le modèle complet de la machine asynchrone étant maintenant connu, nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple ou encore la vitesse rotorique lorsque la machine ne présente aucune défaillance.



**Figure II.5 :** Evolution des courants des phases statoriques au démarrage, puis en charge

La figure II.5 montre l'évolution des courants statoriques de la machine en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide, puis en charge, sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

Etant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, le régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courant qui atteignent des valeurs maximales allant jusqu'à 15 A et qui dure 0.2s. Par la suite un régime permanent s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdales autour de la valeur nulle.

A l'instant  $t = 0.8s$ , nous appliquons un couple résistant nominal de 4 Nm. Nous obtenons, comme effet, l'augmentation des courants qui atteignent une valeur maximale de 2.37 A. Cet effet est dû à l'augmentation de la réaction magnétique du rotor qui est, elle-même, due à l'augmentation de l'amplitude des courants rotoriques.

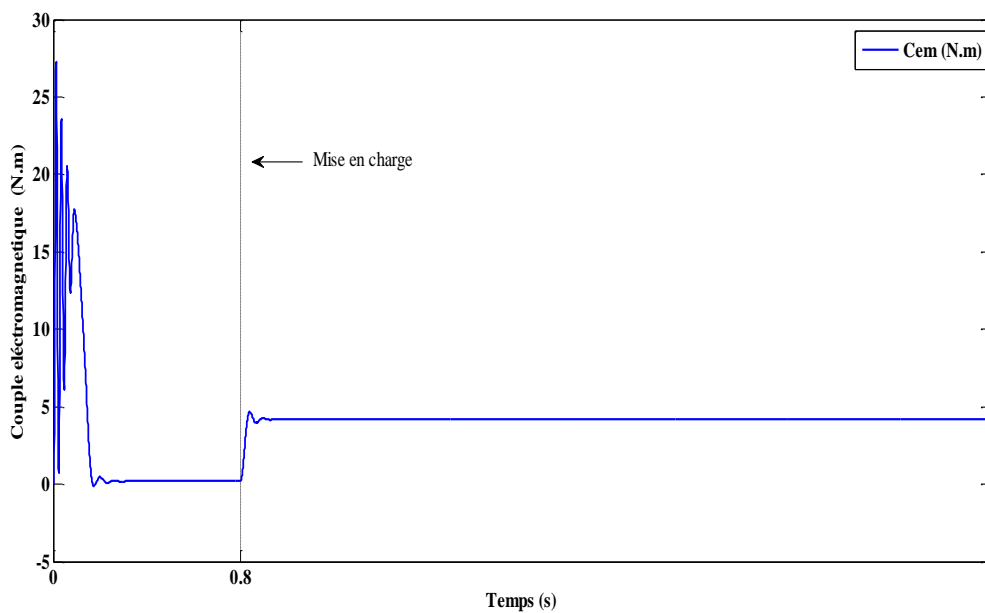
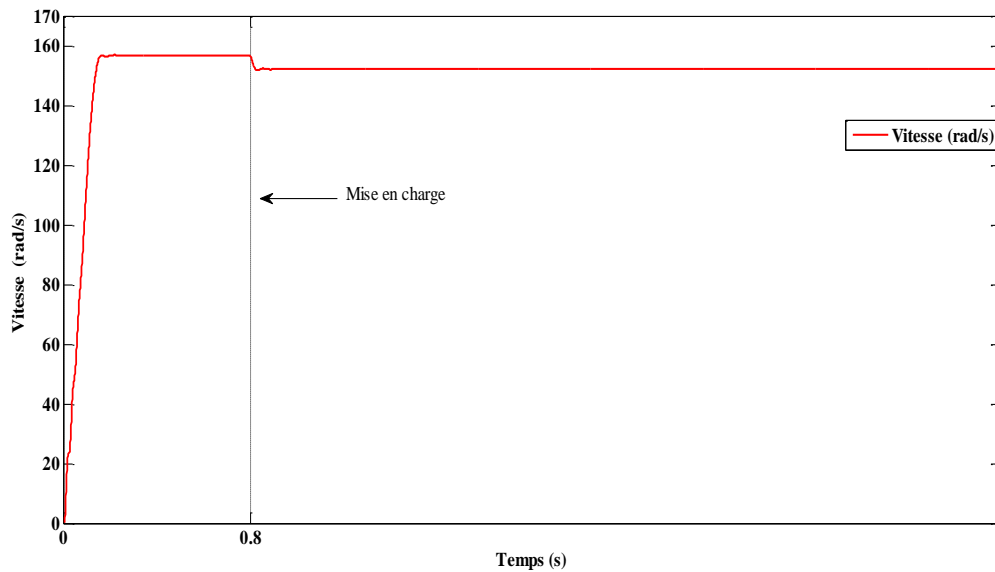


Figure II.6 : Evolution du couple électromagnétique au démarrage, puis en charge

La figure II.6 montre l'évolution du couple électromagnétique. Le régime transitoire, qui dure 0.2s, se manifeste par un régime transitoire amorti autour de 16 Nm avec valeur maximale de 28 Nm. A partir de  $t = 0.2s$ , le couple chute rapidement pour atteindre une valeur presque nulle et égale à celle du couple de frottement fluide. A l'instant  $t = 0.8s$ , nous appliquons un couple de 4 Nm. Evidemment le couple électromagnétique réagit d'une manière inverse de sorte à s'opposer au couple résistant.



**Figure II.7 : Evolution de la vitesse de rotation au démarrage, puis en charge**

La figure II.7 montre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor. Aux premiers instants du démarrage, la vitesse augmente de 0 à 157 rad/s dans un intervalle de temps de 0.2s, atteignant ainsi le régime permanent. A l'instant  $t = 0.8s$ , l'application d'un couple résistant de 4 Nm a tendance à freiner l'arbre moteur d'où la diminution de la vitesse.

### II.3 Modèle de défauts statoriques

Les efforts de recherche en modélisation de la MAS en vue de sa surveillance et son diagnostic sont toujours d'actualité. Plusieurs modèles ont été développés pour en tenir compte du défaut de court-circuit entre spires des enroulements statoriques. Nous pouvons citer les modèles triphasés basés sur la description de la topologie constitutive et géométrique de la MAS à cage, sous la forme de circuits électriques équivalents magnétiquement couplés [23] [26] [27], ou bien les modèles multi enroulements qui représentent la machine par des enroulements au stator et au rotor. Au niveau du stator le modèle est représenté par trois enroulements. Le nombre d'enroulements utilisé pour représenter le rotor est égal au nombre de barres de la cage [23] [28]. Ces modèles triphasés sont classés parmi les modèles "complexes" [29], présentent l'avantage d'être fidèles à la structure électrique et magnétique de la machine en défaut. Cependant, ils sont très complexes à mettre en œuvre puisque les hypothèses de simplification liées à la symétrie de la structure de la machine saine ne sont plus valables. De plus la résolution de ces modèles implique des moyens informatiques de calcul puissants ce qui en limite la mise en œuvre.

### II.3.1 Modélisation du défaut stator dans le repère de Park

Dans ce travail, nous utilisons un modèle relativement simple et adéquat, qui a été développé en vue de diagnostic de la MAS. Ce modèle est basé sur le fait que, en situation de défaut, la MAS présente en plus d'un comportement dynamique classique, un comportement dû au défaut [23] [25]. Il est alors essentiel d'envisager deux modes ; un mode "commun" et un mode "différentiel". Le mode commun doit correspondre au modèle dynamique de la MAS. Exprimé en repère triphasé ou biphasé, il traduit le fonctionnement sain de la machine. Le mode différentiel a pour objectif de traduire le dysfonctionnement et ces paramètres doivent être essentiellement sensibles au défaut.

Il s'agit de modéliser une machine fictive équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuitée dont le nombre de spires  $N_{cc}$  est égal au nombre de spires en défaut dans la machine [21] [25]. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques et rotoriques, un bobinage court-circuité à l'origine du champ stationnaire de direction fixe  $\theta_{cc}$  par rapport au stator.

La figure II.8 illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec court-circuit sur la phase  $b_s$  du stator [21] [24].

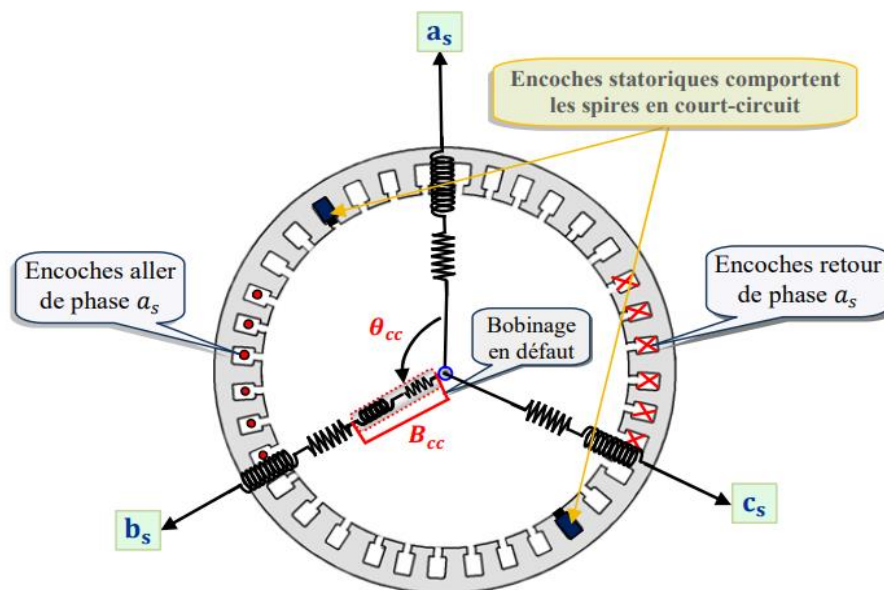


Figure II.8 : Court-circuit de spires sur la phase  $b_s$  du stator

On peut constater que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage  $B_{cc}$ , dont le nombre de spires est égal au nombre de spires en court-circuit et la direction égale à  $2\pi/3$  (direction de la phase  $b_s$ ). Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres [21] :

- Le rapport de court-circuit, noté  $\mu_{cck} = \frac{N_{cck}}{N_s}$ , égal au rapport du nombre de spires en court-circuit ( $N_{cck}$ ) de la  $k^{\text{ième}}$  phase sur le nombre total de spires ( $N_s$ ) dans une phase statorique sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de spires en court-circuit.
- L'angle électrique, noté  $\theta_{cck}$ , repère le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase  $a_s$ . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs :  $0$ ,  $2\pi/3$  ou  $4\pi/3$ , correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases  $a_s$ ,  $b_s$  ou  $c_s$ .

Nous allons maintenant exprimer les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, en introduisant les paramètres électriques de la bobine en court-circuit  $B_{cc}$ .

### II.3.2 Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator

Les équations de tension et de flux de la bobine  $B_{cc}$  exprimées dans le repère biphasé d'axe  $\alpha$  et  $\beta$  lié au stator sont les suivantes [21] [24] [25] [30] [31]:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot i_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \\ \phi_{cc} = \mu_{cc}^2 \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot L_m + L_f \right) \cdot i_{cc} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot L_m [\cos(\theta_{cc}) \quad \sin(\theta_{cc})] (i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r}) \end{array} \right. \quad (18)$$

$L_m$  et  $L_f$  : inductance magnétisante et inductance de fuite.

$R_s$  : résistance propre d'une phase statorique.

$\theta_{cc}$  et  $\theta$  : angle du bobinage en court-circuit et angle mécanique, respectivement.

$$\mu_{cc} = \frac{\text{Nombre de spires en court - circuit}}{\text{Nombre total de spires sur une phase saine}}$$

Le courant  $i_{cc}$  dans le bobinage en défaut est à l'origine du champ magnétique stationnaire par rapport au stator, dirigé selon l'axe  $\theta_{cc}$ . Ce champ magnétique est à l'origine du flux  $\phi_{cc}$ . En projetant  $i_{cc}$  et  $\phi_{cc}$  sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$ , on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$i_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot i_{cc} \quad \text{et} \quad \phi_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot \phi_{cc} \quad (19)$$

Les relations de l'équation (18) deviennent des relations entre des vecteurs stationnaires par rapport au stator. Ainsi, le modèle global de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrit :

Pour le stator :

$$\begin{cases} u_{\alpha\beta_s} = R_s \cdot i_{\alpha\beta_s} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha\beta_s} \\ \phi_{\alpha\beta_s} = L_f \cdot i_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot \left( i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (20)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} u_{\alpha\beta_r} = 0 = R_r i_{\alpha\beta_r} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha\beta_r} - \omega \cdot P \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{\alpha\beta_r} \\ \phi_{\alpha\beta_r} = L_m \cdot \left( i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (21)$$

Et pour le bobinage en défaut :

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha\beta_{cc}} \\ \phi_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \left[ L_m \cdot \left( i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} \right) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} \right] \end{cases} \quad (22)$$

$u_{\alpha\beta_s}$  et  $u_{\alpha\beta_r}$ : Tensions statoriques et rotoriques sur les deux axes  $\alpha$  et  $\beta$ .

$R_r$  : La résistance propre d'une phase rotorique.

$\omega_m$  : La pulsation mécanique.

$$Q(\theta_{cc}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc})^2 & \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent ramenée au primaire des transformateurs et en négligeant le terme en  $L_f$  devant  $L_m$  dans l'expression du flux de court-circuit (équation (22)), les équations de flux de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \phi_{\alpha\beta_s} = \phi_{\alpha\beta_f} + \phi_{\alpha\beta_m} = L_f \cdot i_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot (i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r} - \tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \phi_{\alpha\beta_r} = \phi_{\alpha\beta_m} = L_m \cdot (i_{\alpha\beta_s} + i_{\alpha\beta_r} - \tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \tilde{\phi}_{\alpha\beta_0} \approx \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \phi_{\alpha\beta_m} \end{cases} \quad (23)$$

Avec :

$$\tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot i_{\alpha\beta_{cc}} \quad \text{et} \quad \tilde{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \phi_{\alpha\beta_{cc}}$$

$\phi_{\alpha\beta_m}$  et  $\phi_{\alpha\beta_f}$  : flux magnétisant et flux de fuite statorique.

Ainsi, l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \frac{d\phi_{\alpha\beta_m}}{dt} \quad (24)$$

D'après cette équation, la bobine en défaut se ramène à un simple quadripôle résistif, non équilibré, mis en parallèle avec l'inductance magnétisante.

L'existence de la matrice  $Q(\theta_{cc})$  fait que la représentation d'état dans le repère du stator reste complexe. En négligeant les chutes de tension dues à  $R_s$  et  $L_f$  devant les tensions d'entrée  $u_{\alpha\beta_s}$ , on peut approcher les tensions aux bornes du quadripôle de court-circuit par les tensions statoriques. Les courants de ligne sont alors la somme des courants dus au court-circuit et des courants consommés par le modèle classique de Park. Ainsi, il devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique :

$$\tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot u_{\alpha\beta_s} \quad (25)$$

La figure II.9 représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator, tenant compte du défaut de court-circuit [21].

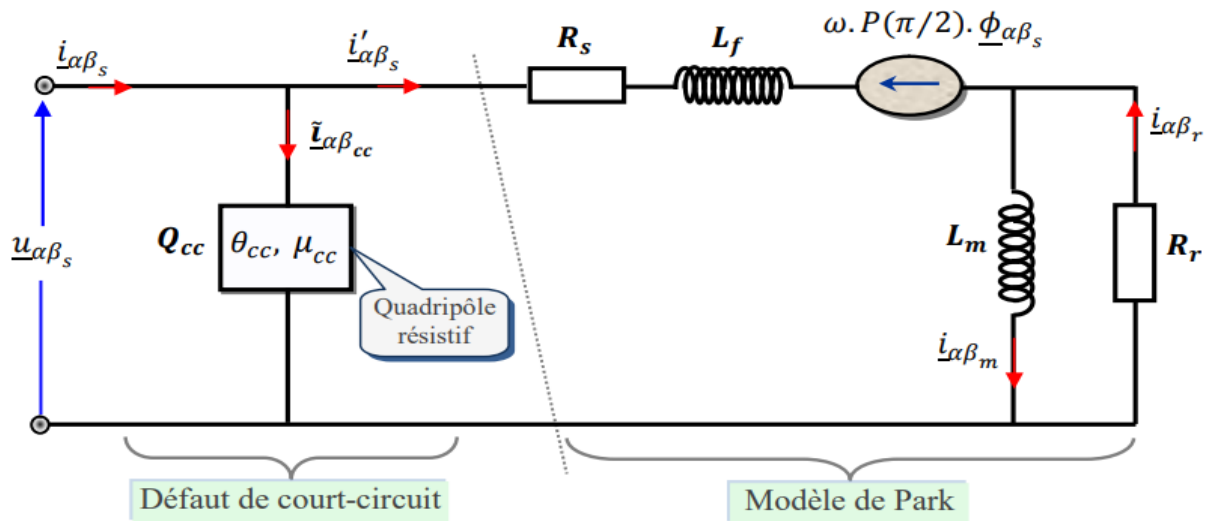


Figure II.9 : Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator

### II.3.3 Généralisation du modèle de défaut statorique

Très simple à implanter car exprimé dans le repère de Park lié au rotor, le modèle de défaut stator que nous venons de présenter offre l'avantage d'expliquer le défaut à travers un quadripôle résistif dédié au bobinage en défaut. Par contre, il est inadapté dans le cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases. En effet, cette représentation n'est valide que dans le cas d'un défaut sur une seule phase, le quadripôle de court-circuit se chargeant alors d'expliquer le défaut à travers les deux paramètres  $\theta_{cc}$  et  $\mu_{cc}$ . En présence de courts-circuits sur plusieurs phases, ce modèle risque de traduire le défaut par des paramètres aberrants, vu qu'il ne tient compte que d'un seul bobinage [21].

Pour y remédier, ce modèle est généralisé, associant ainsi à chaque phase du stator un quadripôle de court-circuit qui prend en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut [21] [24]. Ainsi, en présence de plusieurs courts-circuits, chaque quadripôle permet le diagnostic d'une phase en surveillant la valeur du paramètre  $\mu_{cc}$  et le simple dépassement d'un seuil permet de détecter la présence d'un déséquilibre au stator.

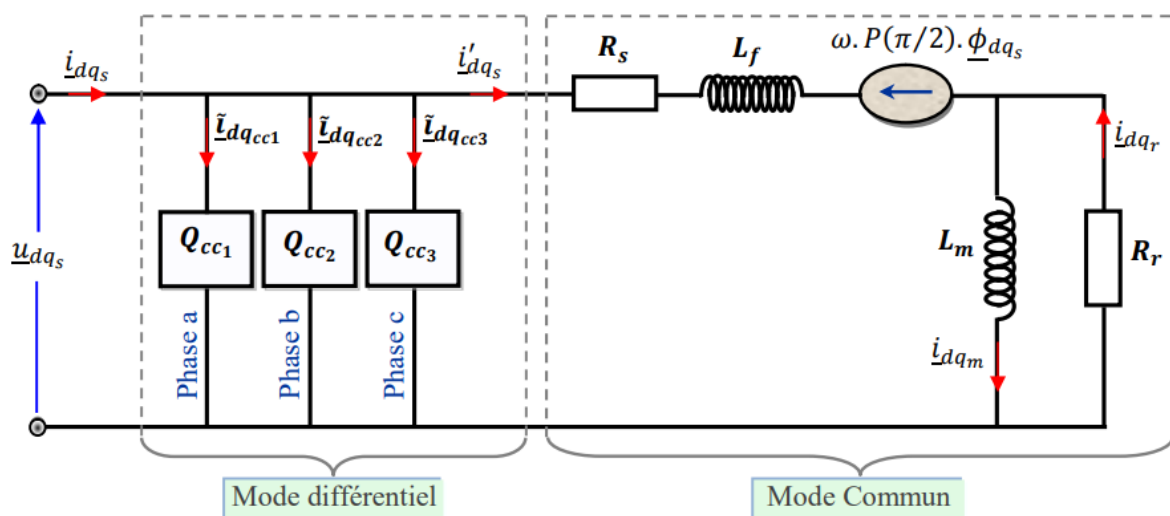
Le mode différentiel représenté par le quadripôle  $Q_{cc}$  étant indépendant de la dynamique du mode commun, il serait judicieux de généraliser le modèle de défaut au cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases en associant à chaque phase un quadripôle de court-circuit.

Comme les trois phases sont repérées par les angles  $0, 2\pi/3$  et  $4\pi/3$  il suffit donc de définir trois bobinages de court-circuit dont les rapports sont respectivement  $\mu_{cc_1}, \mu_{cc_2}, \mu_{cc_3}$  correspondant aux phases  $a_s, b_s$  et  $c_s$  du stator [21] [32] [33]. Ce qui revient à mettre en parallèle trois quadripôles résistifs  $Q_{cc_k}$  prenant en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut. Chaque quadripôle sera parcouru par un courant  $\tilde{i}_{dq_{cc_k}}$  dont l'expression est la suivante :

$$\tilde{i}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot u_{dq_s} \quad (26)$$

$Q(\theta_{cc_k})$ : : matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit (si le court-circuit se produit sur la phase  $a_s$  (resp.  $b_s$  et  $c_s$  ) alors l'angle est égal à  $0$  rad (resp.  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$ )).

La figure II.10 donne le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime transitoire dans le repère de Park avec fuites totalisées au stator, en tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une ou plusieurs phases.



**Figure II.10 : Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques**

A présent, les angles de court-circuit  $\theta_{cc_k}$  sont connus, ce qui permet de diagnostiquer chaque phase indépendamment en surveillant la valeur du rapport  $\mu_{cc_k}$  et le simple dépassement d'un seuil permet de signaler la présence d'un déséquilibre sur celle-ci. Le modèle global de défaut statorique sera donc paramétrisé par 7 termes  $\langle R_s, R_r, L_m, L_f, \mu_{cc_1}, \mu_{cc_2}, \mu_{cc_3} \rangle$ .

Dans un référentiel noté  $(x)$  tournant à une vitesse  $\omega_a$  par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut de court-circuit statorique s'écrit [21] [24] [25] :

$$\begin{cases} u_{dq_s}^{(x)} = R_s \cdot i'_{dq_s} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{dq_s}^{(x)} \\ \phi_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) \cdot i'_{dq_s} + L_m \cdot i_{dq_r}^{(x)} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{dq_r}^{(x)} \\ \phi_{dq_r}^{(x)} = L_m \cdot (i'_{dq_s} + i_{dq_r}^{(x)}) \end{cases} \quad (28)$$

$$i_{dq_s}^{(x)} = i'_{dq_s} + \tilde{i}_{dq_{cc}}^{(x)} = i'_{dq_s} + \sum_{k=1}^3 \tilde{i}_{dq_{cc_k}}^{(x)} \quad (29)$$

$$\tilde{i}_{dq_{cc_k}}^{(x)} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta_a) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta_a) \quad (30)$$

Si on veut procéder à un diagnostic par identification paramétrique, on est obligé de se placer dans le repère du rotor. Ainsi les équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, dans un référentiel lié au rotor, deviennent :

- Mode commun (stator et rotor) :

$$\begin{cases} u_{dq_s} = R_s \cdot i'_{dq_s} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{dq_s} \\ \phi_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot i'_{dq_s} + L_m \cdot i_{dq_r} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dq_r} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r} \\ \phi_{dq_r} = L_m \cdot (i'_{dq_s} + i_{dq_r}) \end{cases} \quad (32)$$

- Mode différentiel (courants de court-circuit) :

$$\tilde{i}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot u_{dq_s} \quad (33)$$

- Courant résultant :

$$i_{dq_s} = i'_{dq_s} + \tilde{i}_{dq_{cc}} = i'_{dq_s} + \sum_{k=1}^3 \tilde{i}_{dq_{cc_k}} \quad (34)$$

### II.3.4 Simulation du modèle de défaut statorique

En considérant les dynamiques des flux rotoriques  $\phi_{dqr}$ , des courants statoriques  $i_{dqs}$  et les dynamiques électromécaniques ( $\omega$ ,  $\theta$ ) le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires [21] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) + H(x) \cdot u \end{cases} \quad (35)$$

Avec :

$x = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$  : Vecteur d'état.

$u = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad C_r]^T$  et  $y = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$  : Entrées et sorties de la machine, respectivement.

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i'_{ds} + \omega \cdot i'_{qs} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{qr} \\ -\omega \cdot i'_{ds} - \frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i'_{qs} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{qr} \\ R_r \cdot i'_{ds} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{dr} \\ R_r \cdot i'_{qs} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i'_{qs} \cdot \phi_{dr} - i'_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}, \quad H(x) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \cdot \sum_{k=1}^3 \mu_{cc_k} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

**La figure II.11** représente notre modèle de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink construit à partir des équations électriques. Les variables d'entrée sont les trois tensions  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  et le couple de charge  $C_r$  et les paramètres de défaut  $\{N_{cc_1}, N_{cc_2}, N_{cc_3}\}$  correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases  $a_s$ ,  $b_s$  ou  $c_s$ .

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La simulation est effectuée pendant une durée de 4s de la manière suivante :

À l'instant  $t = 0.8s$  la machine est soumise à un couple résistant nominal :  $C_r = 4N.m$ .

En régime établi, on introduit à l'instant  $t = 2.5s$  un défaut de type court-circuit de 12 spires sur la phase  $a_s$  et aussi à l'instant  $t = 3.5s$  un défaut de type court-circuit de 15 spires sur la phase  $b_s$  (ce qui correspond respectivement à  $u_{cc1} = 2.58\%$ ,  $u_{cc2} = 3.23\%$ ,  $u_{cc3} = 0\%$ ).

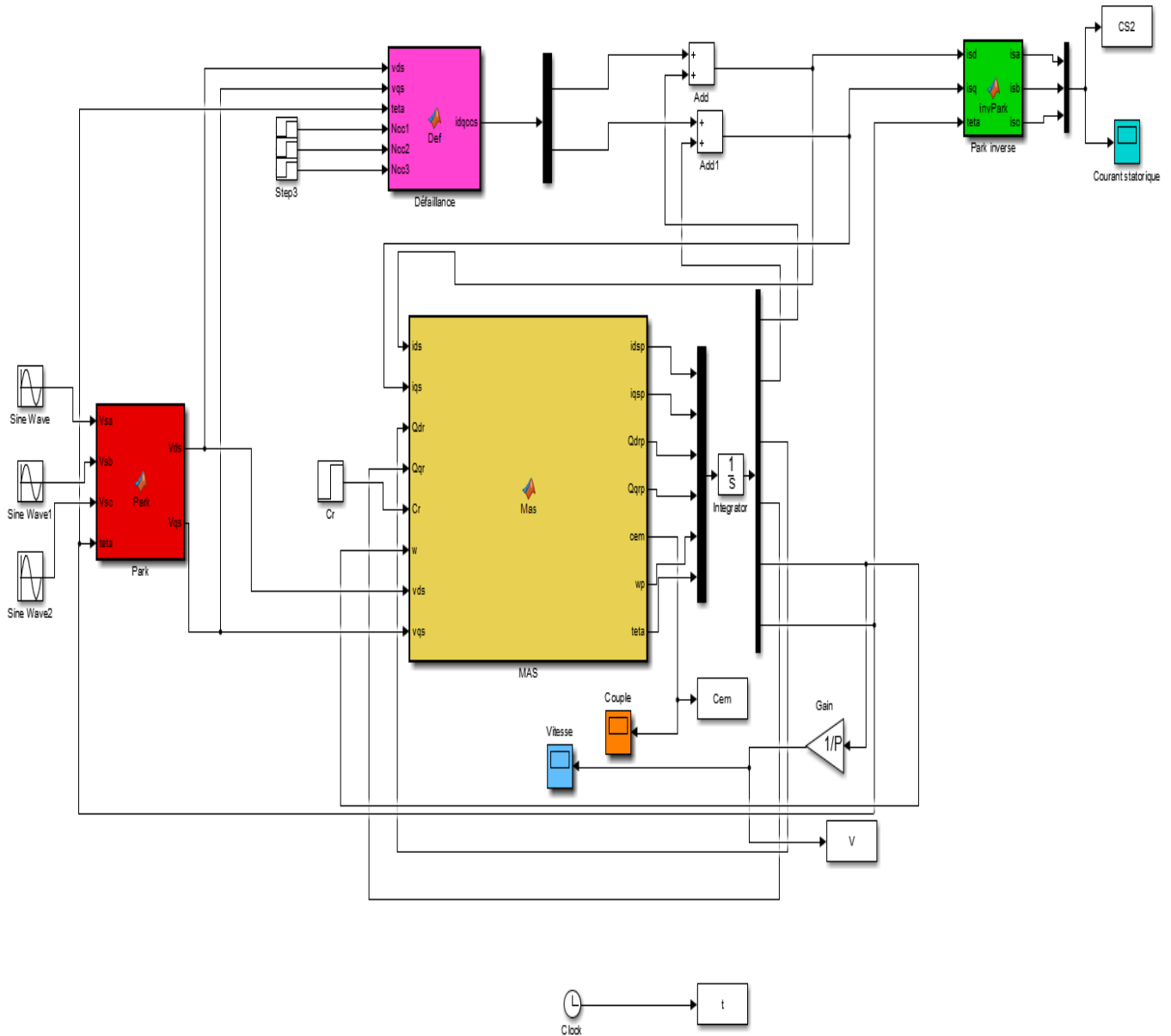
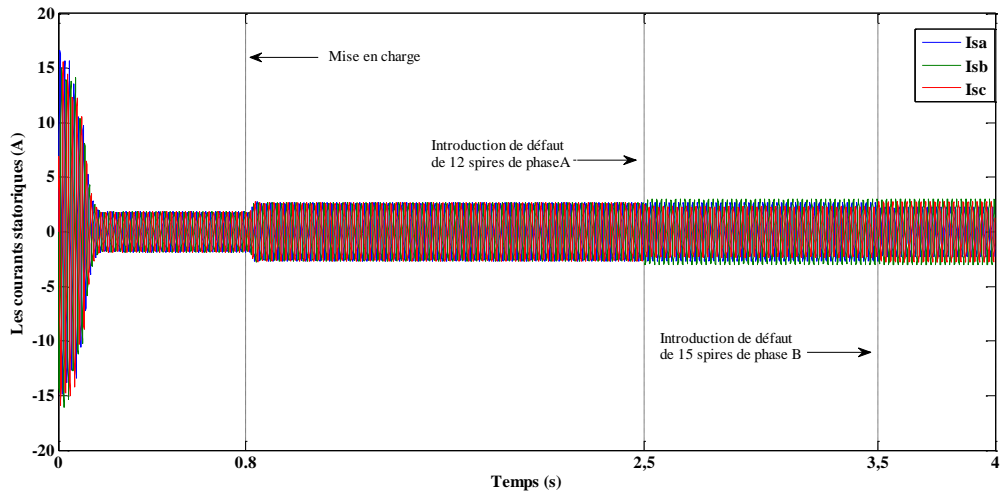


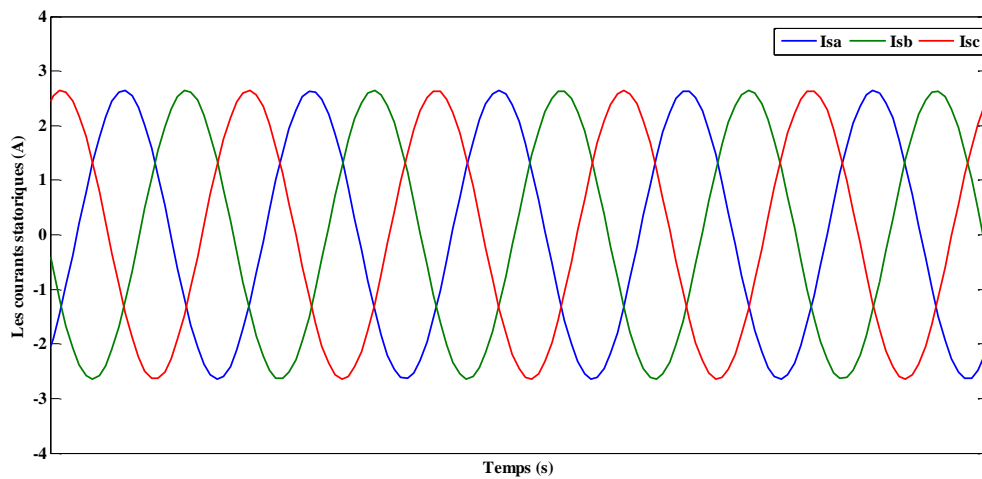
Figure II.11: Modèle du moteur à cage avec défaut statorique sous Simulink/Matlab

### II.3.5 Résultats de simulation du modèle de défaut statorique

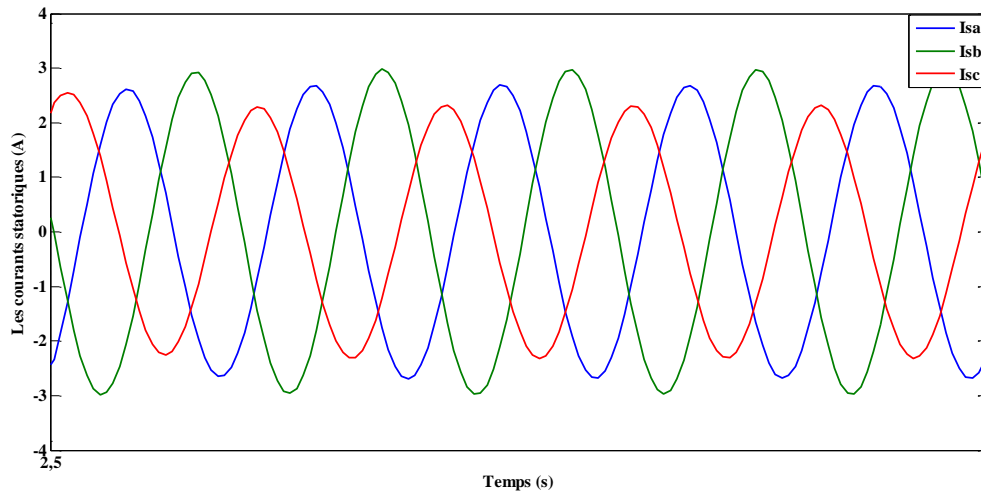
Les résultats de simulation obtenus à partir du modèle de défaut statorique sont présentés dans cette section. Ces résultats permettent d'évaluer la performance de la machine et de détecter d'éventuels défauts statoriques.



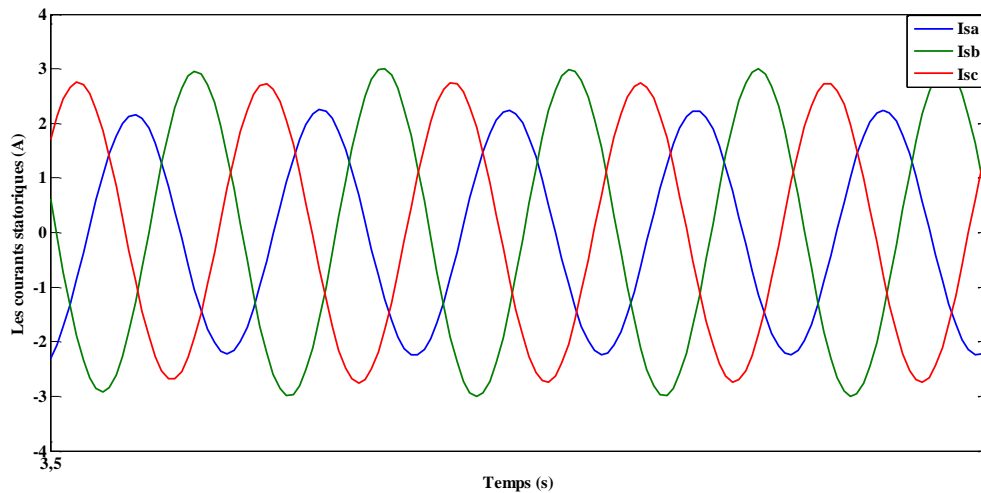
**Zoom de courbes :**



**Avant le défaut de court-circuit**



Après le défaut de 12 spires

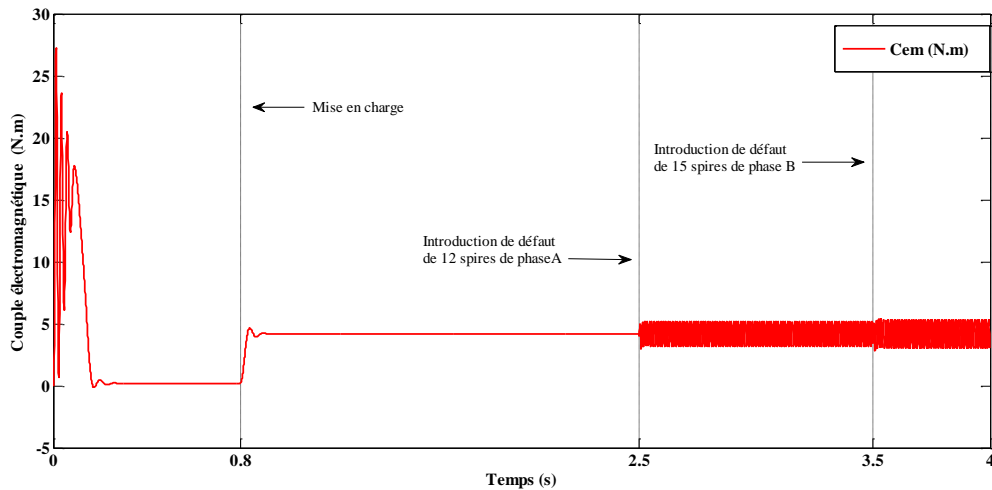


Après le défaut de 15 spires

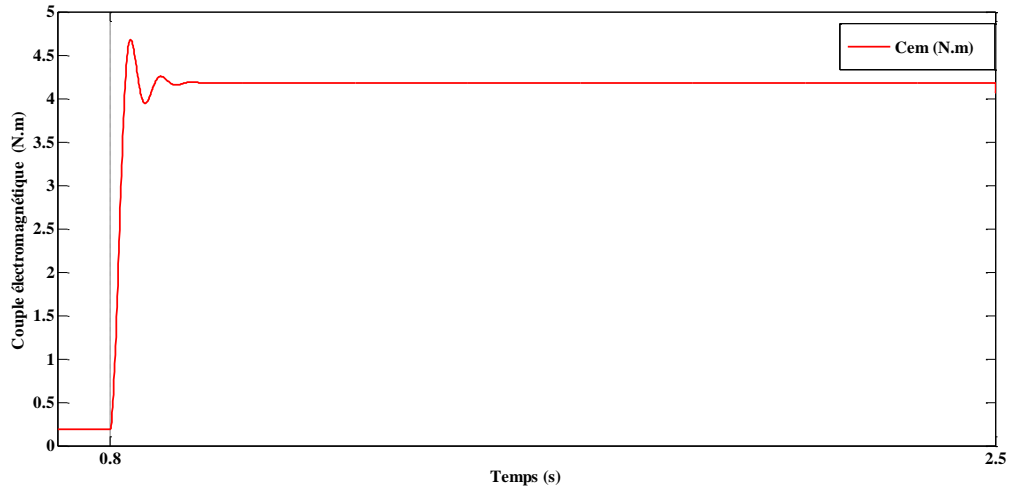
**Figure II.12** : Courants simulés en charge, puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase  $a_s$  et un court-circuit de 15 spires sur la phase  $b_s$

La figure II.12 représente la comparaison des trois courants statoriques pour un défaut de court-circuit de 12 spires et 15 spires dans la phase  $a_s$  et  $b_s$ , respectivement. À l'instant  $t = 2.5s$  un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation du courant de la phase où s'est produit le défaut (phase  $a_s$  et phase  $b_s$ ). À l'instant  $t = 3.5s$  nous avons remarqué une augmentation de courant de la phase  $b_s$  et la phase  $c_s$  et une diminution du courant de la phase  $a_s$ .

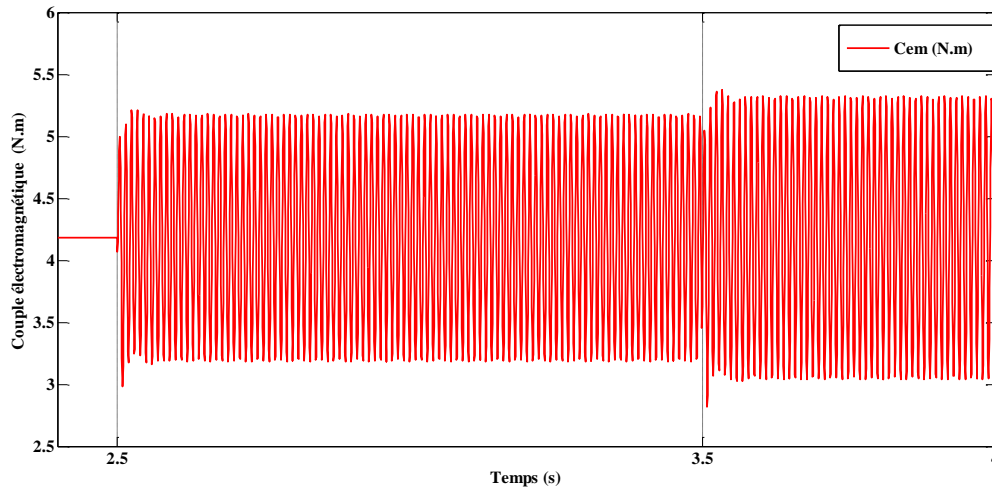
Nous avons aussi remarqué que plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus forte est l'augmentation des courants. En plus du déséquilibre du courant, nous remarquons aussi un déséquilibre au niveau des déphasages illustré par **la figure II.12**. Ce déphasage n'est plus égal à  $120^\circ$  (cas de fonctionnement sain).



### Zoom de courbes :



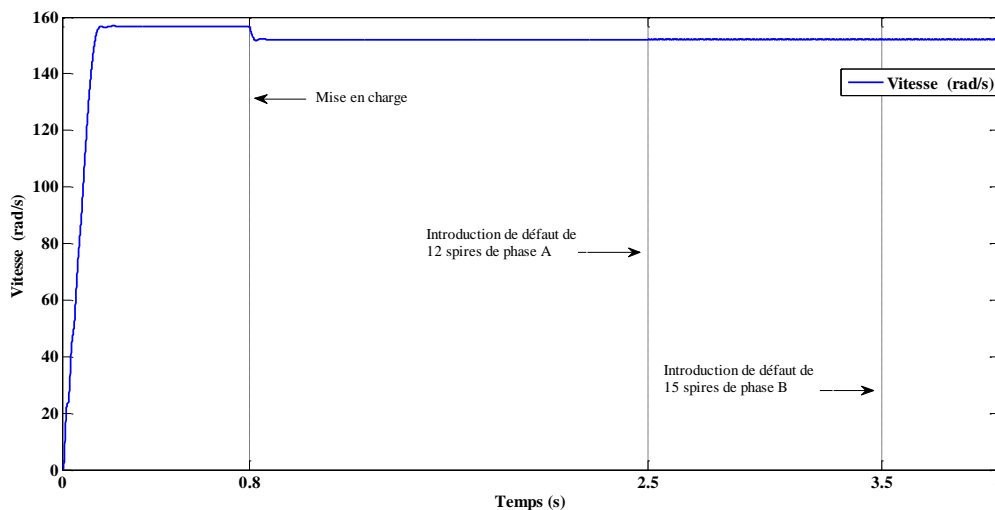
**Avant le défaut**

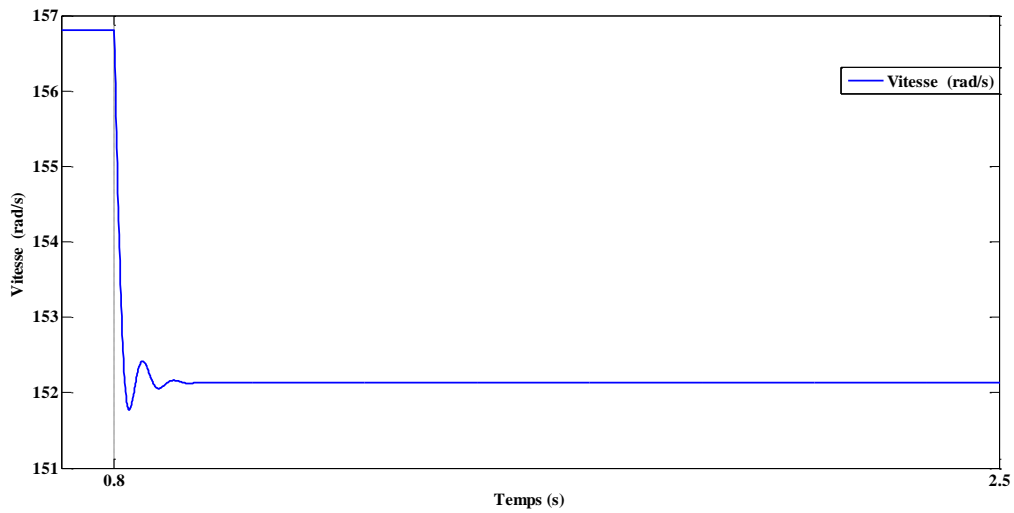
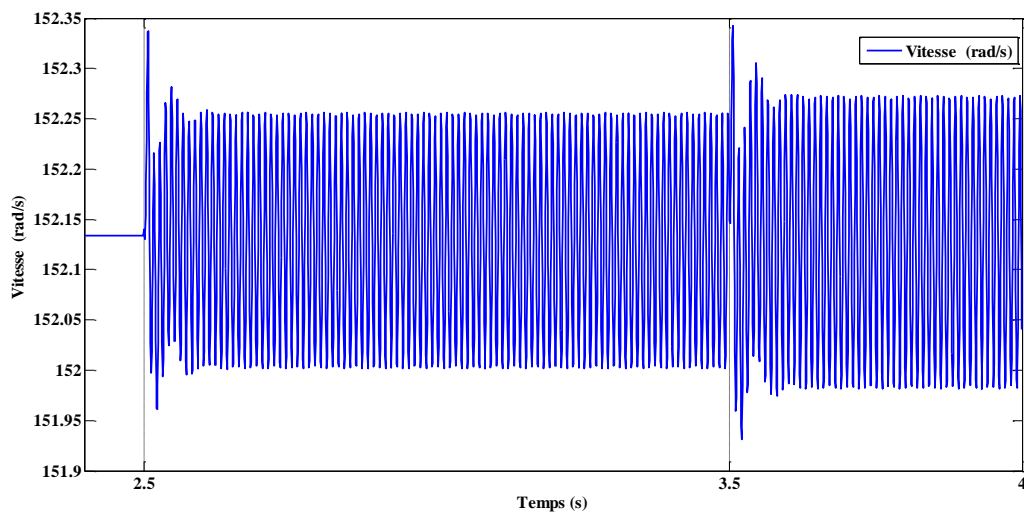


### Après le défaut de 12 et 15 spires

**Figure II.13 :** Evolution du couple électromagnétique en charge, puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase  $a_s$  et un court-circuit de 15 spires sur la phase  $b_s$

La figure II.13, représentant l'évolution du couple électromagnétique montre que lorsque le défaut de court-circuit entre spires de mêmes phases est appliqué. Une nouvelle interaction entre la bobine en court-circuit et le rotor s'ajoute aux interactions présentes à l'état de marche. Les fluctuations du couple électromagnétique sont donc à l'origine de cette interaction créée dans l'entrefer. Ces ondulations augmentent avec le nombre de spires en court-circuit, sans changer la valeur moyenne du couple par rapport à la valeur en conditions saines.



**Zoom de courbes :****Avant le défaut****Après le défaut de 12 et 15 spires**

**Figure II.14 :** Vitesse de rotation au démarrage ,en charge puis lors d'un court-circuit de 12 spires sur la phase  $a_s$  et un court-circuit de 15 spires sur la phase  $b_s$

La figure II.14 représente la vitesse de rotation qui est également affectée par le défaut de court-circuit.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la simulation de la machine asynchrone pour détecter les courts-circuits entre spires. Nous avons constaté que le courant est un indicateur riche en informations sur l'état de la machine, contrairement à la vitesse et au couple électromagnétique. Le défaut statorique se manifeste par un déséquilibre dans le courant, avec une augmentation sur la phase affectée. Bien que le couple électromagnétique moyen de la machine ne varie pas beaucoup en valeur moyenne, des oscillations proportionnelles au défaut apparaissent. Cette analyse de la machine asynchrone peut aider à détecter rapidement les défauts statoriques et à prendre les mesures nécessaires pour éviter les conséquences négatives sur la machine et le système dans lequel elle est utilisée.

# Chapitre III

*Application de l'approche  
neuro-floue*

# Chapitre III

## *Application de l'approche neuro-floue*

<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>56</b>
<b>III.2</b>	<b>Réseau de neurones .....</b>	<b>57</b>
<b>III.3</b>	<b>La logique floue .....</b>	<b>57</b>
<b>III.4</b>	<b>Système Neuro-Flou .....</b>	<b>58</b>
<b>III.4.1</b>	<b>Différents modèles des réseaux Neuro-Flous.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5</b>	<b>Le système Neuro-Flou Hybride .....</b>	<b>60</b>
<b>III.6</b>	<b>Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS) .....</b>	<b>61</b>
<b>III.6.1</b>	<b>Les avantages du modèle ANFIS .....</b>	<b>62</b>
<b>III.6.2</b>	<b>Architecture de l'ANFIS .....</b>	<b>62</b>
<b>III.7</b>	<b>Extraction de signatures de défauts statoriques.....</b>	<b>63</b>
<b>III.8</b>	<b>Construction de la base d'apprentissage et de test.....</b>	<b>67</b>
<b>III.9</b>	<b>Résultats de simulation .....</b>	<b>68</b>
<b>III.10</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>73</b>

### **III.1 Introduction**

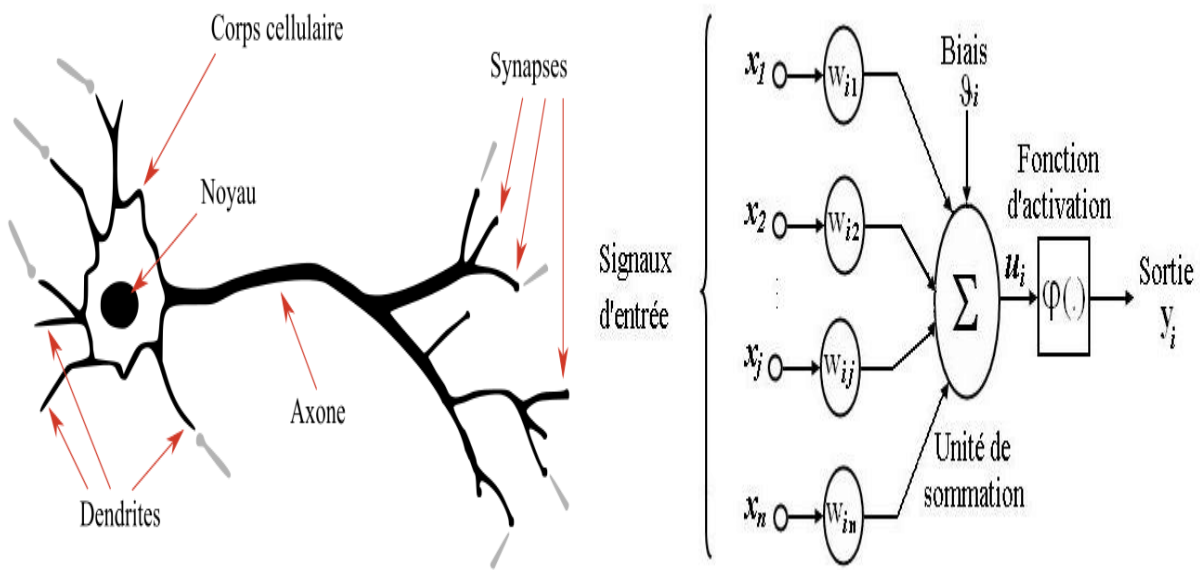
Le diagnostic est une tâche complexe et les techniques analytiques classiques ne sont pas toujours suffisantes pour résoudre les problèmes de conception. Les techniques d'intelligence artificielle, comme les réseaux de neurones et la logique floue, sont de plus en plus utilisées dans les applications industrielles de diagnostic car elles fournissent des résultats interprétables et utiles pour la phase de décision.

Le diagnostic se compose de deux étapes : la génération des résidus et la prise de décision. La génération des résidus permet de générer des indicateurs de défauts à partir des entrées et sorties disponibles. Le processus de génération repose sur la comparaison entre le comportement observé du système et le comportement de référence attendu (prédit par un modèle). L'étape de prise de décision consiste à évaluer les résidus pour classer les défauts détectés. En conditions normales, le résidu devrait être proche de zéro. En présence de défauts, la valeur du résidu sera non nulle. Ces techniques offrent une alternative plus efficace pour le diagnostic des défauts et peuvent aider à éviter des conséquences négatives sur la machine et le système dans lequel elle est utilisée [34].

Ce chapitre présentera l'approche neuro-floue (ANFIS) et son application pour le diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

### III.2 Réseau de neurones

Un réseau de neurones est une structure de graphe orienté et pondéré, où chaque nœud représente un neurone formel et chaque arrête un lien synaptique (**figure III.1**). Le premier modèle de réseau de neurones a été proposé en 1943 par Warren McCulloch et Walter Pitts, qui ont supposé que l'impulsion nerveuse était le résultat d'un calcul effectué par chaque neurone, et que c'est grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés que naît la pensée [35] [36].



**Figure III.1 : Le neurone biologique et formel**

### III.3 La logique floue

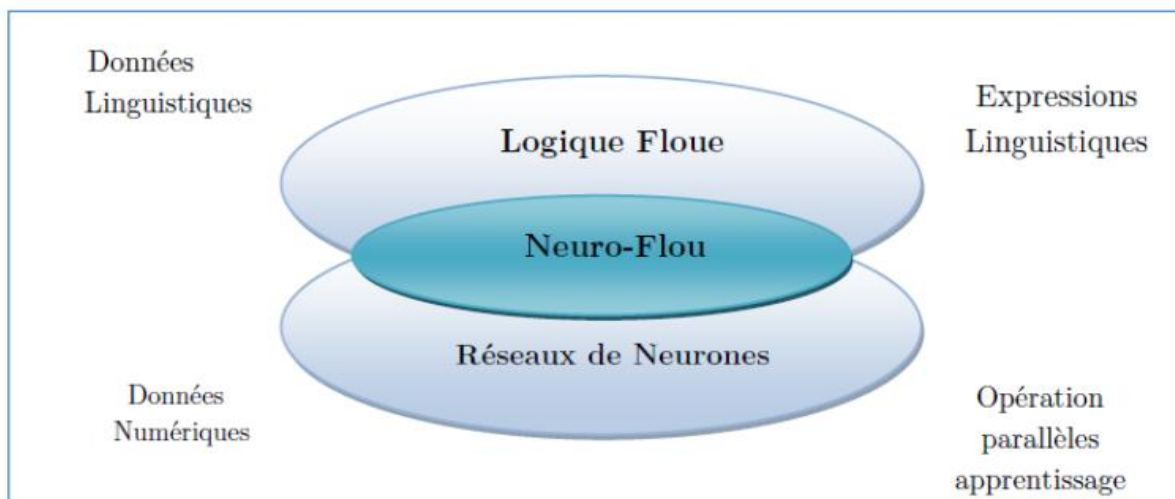
La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965, basée sur sa théorie mathématique des ensembles flous. Elle permet d'introduire la notion de degré dans la vérification d'une condition, ce qui offre une grande flexibilité pour prendre en compte les imprécisions et les incertitudes. Elle est couramment utilisée en contrôle des procédés sous le nom de "contrôle flou", où un contrôleur flou calcule la commande à appliquer au processus en fonction de consignes et de mesures. Les bases de règles floues sont utiles en commande car elles prennent en compte l'expertise qualitative et les variables difficiles à intégrer dans la boucle, améliorant ainsi le fonctionnement des contrôleurs classiques [35] [37]. Les algorithmes basés sur la logique floue sont considérés comme une solution intéressante pour la commande ou le réglage des systèmes non linéaires ou sans modèle mathématique.

### III.4 Système Neuro-Flou

Les systèmes neuro-flous sont des systèmes flous formes par un algorithme d'apprentissage inspire de la théorie des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction de l'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine [38] [39].

Les règles floues codées dans le système neuro-flou représentent les échantillons imprécis et peuvent être vues en tant que prototypes imprécis des données d'apprentissage. Un système neuro-flou ne devrait par contre pas être vu comme un système expert (**figure III.2**).

Il n'a rien à voir avec la logique floue dans le sens stricte du terme. On peut aussi noter que les systèmes neuro-flous peuvent être utilisés comme des approximateurs universels.



**Figure III.2 : Système neuro-floue**

Pour résumer les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones et de la logique floue, le **tableau III.1** présente les apports du neuro-flou.

**Tableau III.1:** Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones artificiels [38] [40] [41]

Réseaux de neurones	Logique floue
<b>Avantages</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le modèle mathématique non requis.</li> <li>▪ Aucune connaissance basée sur les règles.</li> <li>▪ Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le modèle mathématique non requis.</li> <li>▪ La connaissance antérieure sur les règles peut être utilisée.</li> <li>▪ Une interprétation et implémentation simple.</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Boite noire (manque de traçabilité).</li> <li>▪ L'adaptation aux environnements différents est difficile et le réapprentissage est souvent obligatoire (sauf pour RBF).</li> <li>▪ La connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage à partir de zéro).</li> <li>▪ Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les règles doivent être disponibles.</li> <li>▪ Ne peut pas apprendre Adaptation difficile au changement de l'environnement.</li> <li>▪ Aucune méthode formelle pour l'ajustement</li> </ul>

### III.4.1 Différents modèles des réseaux Neuro-Flous

Diverses combinaisons de ces deux méthodes (Logique Floue et les réseaux de neurones) ont été développées depuis 1988. Elles ont donné naissance aux systèmes neuro-flous, qui sont le plus souvent orientées vers la commande de système complexe et les problèmes de classification [38] [41].

### III.5 Le système Neuro-Flou Hybride

Un système neuro-flou hybride est un réseau de neurones qui incorpore des éléments flous tels qu'un signal flou, des poids flous, une fonction de transfert floue et un module d'adaptation de la structure de réseau de neurones flous [42]. Ce système combine les avantages des réseaux de neurones et de la logique floue pour offrir des performances supérieures dans la modélisation de systèmes complexes.

Les réseaux de neuro-flous hybride apprennent des rapports et des modèles en utilisant un algorithme d'apprentissage supervisé qui examine les données dans un ensemble de la formation qui consiste en exemples d'entrées et leurs sorties associées. Pendant la phase d'apprentissage, un Réseau neuro-flou hybride modifie sa structure interne pour refléter le rapport entre les entrées et les sorties dans l'ensemble de la formation (base de connaissance). L'exactitude d'un Réseau neuro-flou est vérifiée après que le cycle de d'apprentissage soit complet en utilisant un ensemble séparé d'entrées et sorties appeler l'ensemble de la validation (**figure III.3**).

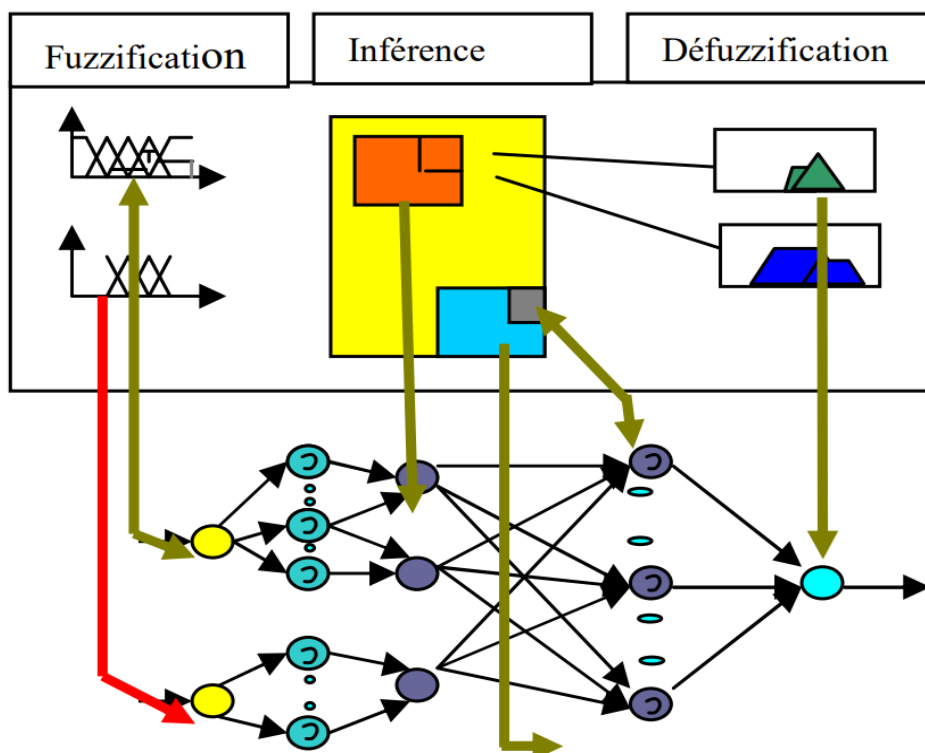


Figure III.3 : Principe de fonctionnement du neuro-flou hybride

La figure III.4 décrit plusieurs modèles qui mettent en œuvre l'approche hybride des réseaux de neuro-flous. Ces modèles combinent des éléments de réseaux de neurones et de logique floue pour offrir des performances améliorées dans la modélisation de systèmes complexes

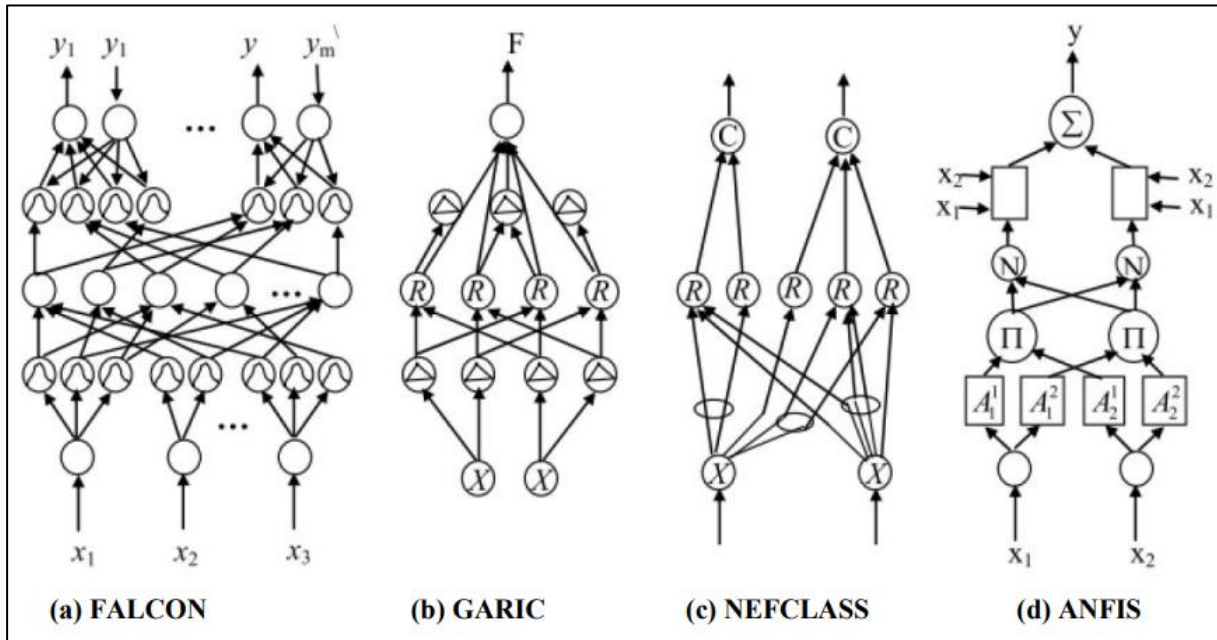


Figure III.4 : Modèles Neuro-floue hybride

Notre étude portera particulièrement sur le système ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System), ce qui nous amènera à décrire en détail ce système d'inférence neuro-flou adaptatif.

### III.6 Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS)

Le principe du système ANFIS repose sur la création d'un système de logique floue à partir d'un ensemble de règles floues. Ces règles sont définies en utilisant des variables d'entrée et de sortie, ainsi que des fonctions d'appartenance floues. Ce système utilise ensuite un réseau de neurones pour déterminer les paramètres flous de chaque règle en fonction des données d'apprentissage. L'algorithme d'apprentissage d'ANFIS se compose de cinq étapes principales, qui permettent de calculer les degrés d'appartenance flous de chaque règle, de calculer les paramètres de chaque règle, de calculer les sorties floues pour chaque règle, et de combiner les sorties de chaque règle pour obtenir la sortie finale du système.

### III.6.1 Les avantages du modèle ANFIS

Les avantages du modèle ANFIS, tels que décrits dans les sources [44] et [45], incluent les éléments suivants :

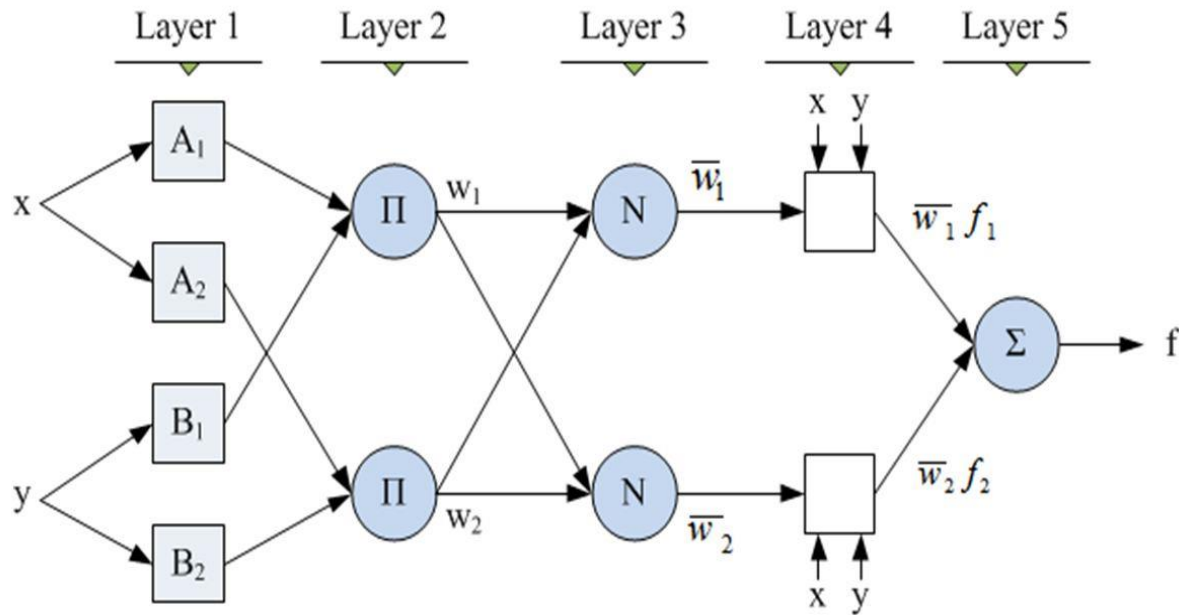
- Réduction de la taille de la base de règles : il est possible de n'avoir que des règles générales, les détails étant fournis par le réseau de neurones.
- Réduction de la complexité de l'apprentissage : le réseau de neurones doit simplement apprendre les cas particuliers ou les exceptions, et non pas l'ensemble du problème.
- Efficacité immédiate dès le début de l'apprentissage, avec la possibilité d'éviter des comportements initiaux erratiques.
- Exploitation de la connaissance disponible grâce à la base de règles.

Ces avantages font d'ANFIS un modèle très intéressant pour la modélisation de systèmes complexes, car il permet une approche efficace et efficiente pour l'apprentissage et l'exploitation de la connaissance disponible.

### III.6.2 Architecture de l'ANFIS

L'architecture ANFIS peut-être le premier système neuro-flou intégré. Ce système met en œuvre un système d'inférence floue de type Takagi Sugeno et il comporte cinq couches.

La première couche cachée est responsable de la cartographie de variable d'entrée relativement à chacun des fonctions d'appartenance, c'est-à-dire, cette couche d'entrée est une couche permet la "fuzzification" des variables. L'opérateur T-norme est appliqué dans la deuxième couche cachée pour calculer les antécédents des règles. La troisième couche cachée normalise les résultats fournis par la couche précédente, suivies par la quatrième couche cachée où les conséquents des règles sont déterminées (**figure III.5**). La couche de sortie calcule la sortie globale comme étant la somme de tous les signaux qui arrivent à cette couche [34].

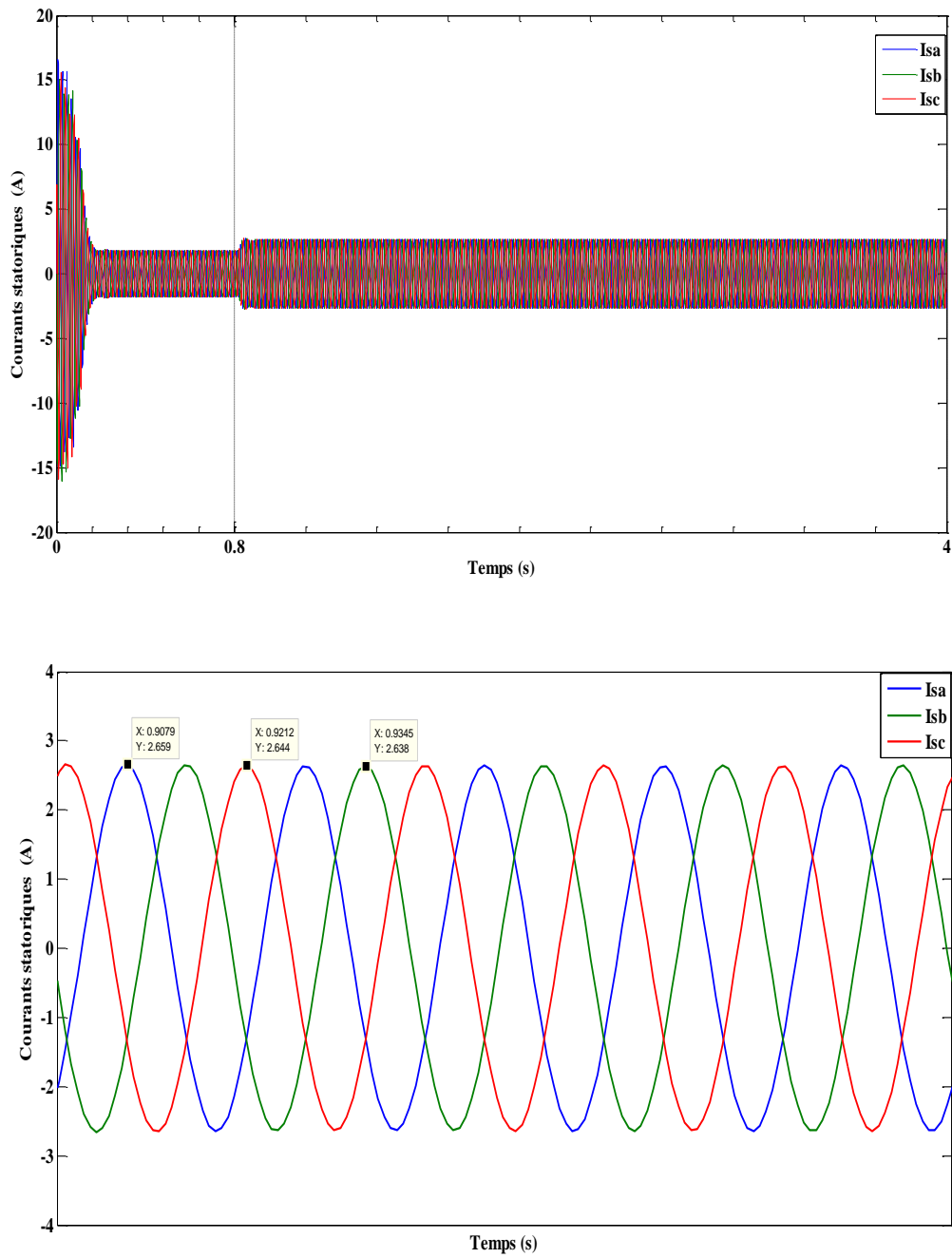


**Figure III.5 : Structure Neuro- Floue ANFIS**

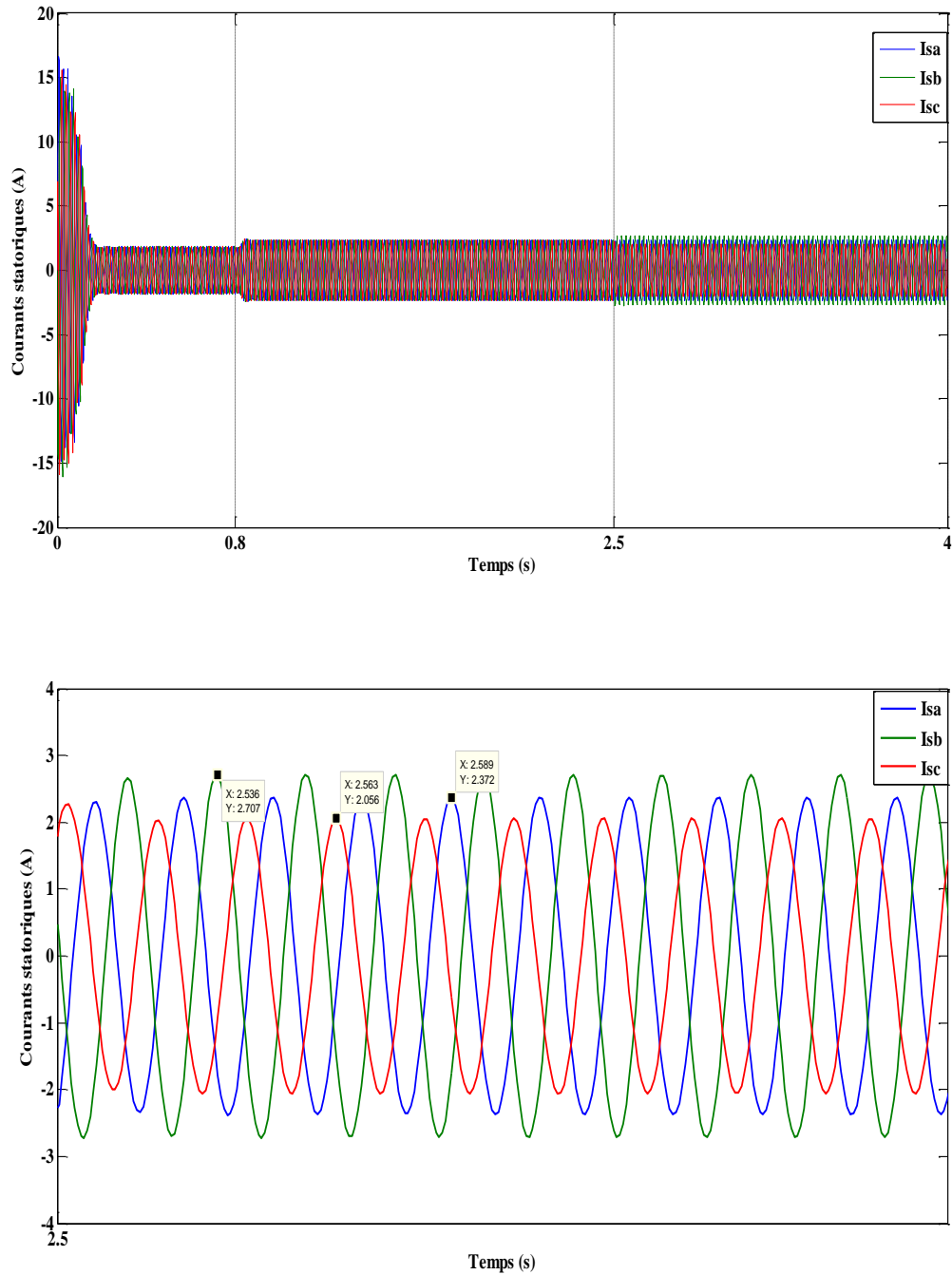
L'ANFIS utilise l'apprentissage par rétropropagation afin de déterminer les paramètres des fonctions d'appartenance d'entrée et la méthode des moindres carrés moyens pour déterminer les paramètres conséquents. Chaque étape de l'algorithme d'apprentissage itératif comporte deux parties. Dans la première partie, la rétropropagation est utilisée pour la mise à jour des paramètres antécédents et les moindres carrés moyens pour mettre à jour les paramètres conséquents, pendant que les paramètres des antécédents sont considérés fixes. Dans la deuxième partie, les modèles d'entrée sont propagés à nouveau et à chaque itération, l'algorithme d'apprentissage par rétropropagation est utilisé pour modifier les paramètres des antécédents, pendant que les conséquents restent fixes [34].

### III.7 Extraction de signatures de défauts statoriques

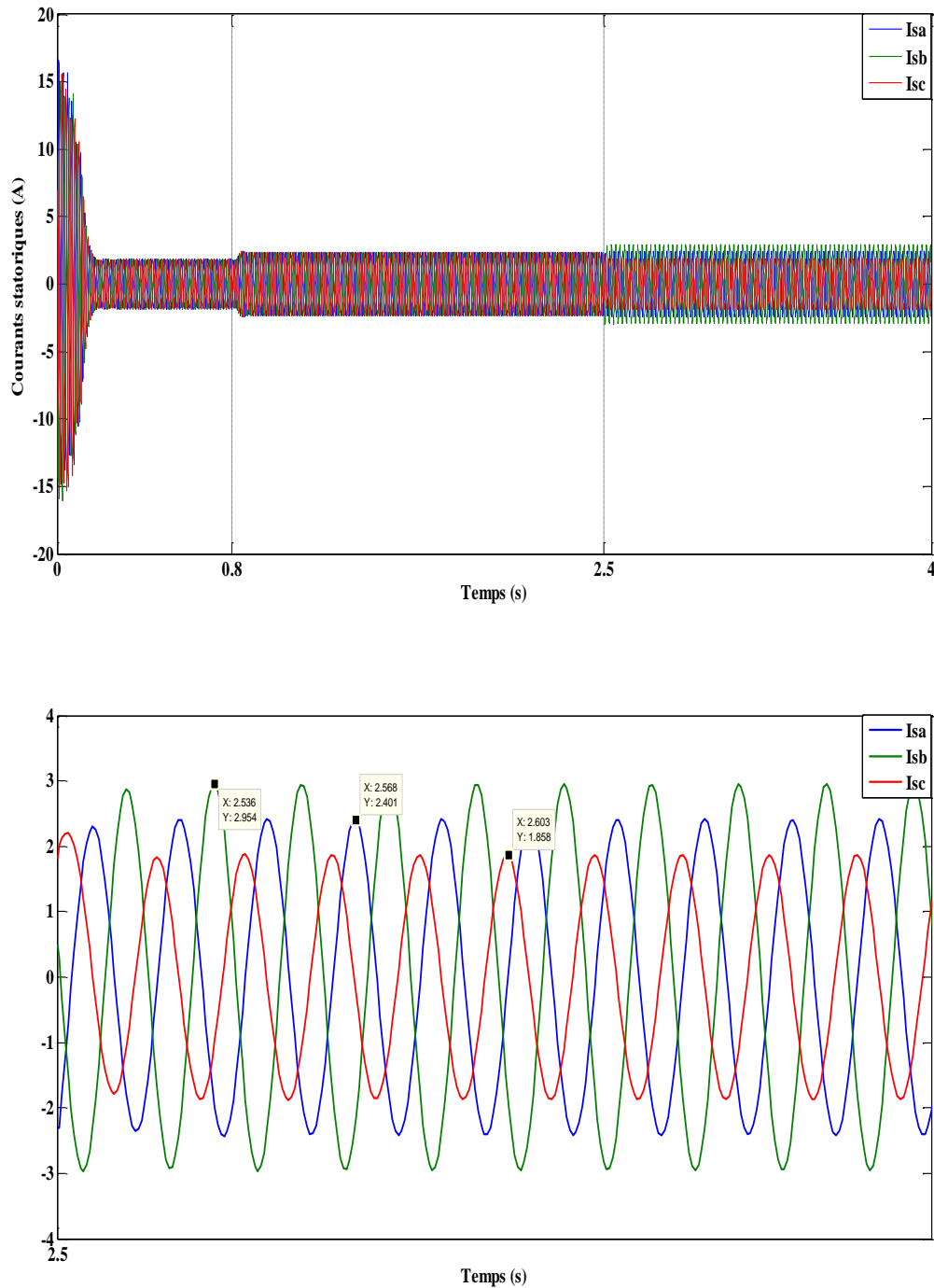
Dans le but d'identifier les signatures les plus représentatives des défaillances statoriques, nous avons utilisé les résultats de simulations obtenus à partir du modèle de la machine asynchrone décrit dans le deuxième chapitre de notre étude. Nous avons recueilli les données relatives à l'évolution des amplitudes des courants statoriques dans différents modes de fonctionnement, en particulier au régime établi. **Les figures III.6, III.7 et III.8** illustrent l'analyse des amplitudes des courants statoriques en présence et en absence de défaut statorique, sous une charge de 4 Nm. Nous avons considéré plusieurs cas dans différentes conditions de charge afin de collecter une base de données complète.



**Figure III.6 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent de la machine en mode sain.**



**Figure III.7 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour un court- circuit de 2.59% (soit 12 spires) et son zoom.**



**Figure III.8 :** Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour un court-circuit de 4.31% (soit 20 spires) et son zoom.

### III.8 Construction de la base d'apprentissage et de test

La figure III.9 présente le schéma synoptique du système de diagnostic ANFIS, qui décrit les différentes étapes nécessaires à la création d'un système de détection intelligent pour identifier les défauts des enroulements statoriques, en particulier les courts-circuits entre spires. Le traitement des défaillances repose sur l'extraction et l'analyse des amplitudes des signaux de courants statoriques, qui fournissent des informations pertinentes pour prendre des décisions sur l'état de la machine (sain ou endommagé), permettant ainsi la détection et la classification des défauts de court-circuit statoriques en fonction de leur sévérité. Les amplitudes des trois courants statoriques, à savoir  $\|I_{sa}\|$ ,  $\|I_{sb}\|$  et  $\|I_{sc}\|$ , sont utilisées comme variables d'entrée pour le système ANFIS. La sortie souhaitée du système peut être étiquetée comme suit :

- 0 : moteur sain.
- 3 : défaut de court-circuit de 3 spires d'une bobine.
- 6 : défaut de court-circuit de 6 spires d'une bobine.
- 9 : défaut de court-circuit de 9 spires d'une bobine.
- 12 : défaut de court-circuit de 12 spires d'une bobine.
- 15 : défaut de court-circuit de 15 spires d'une bobine.
- 25 : défaut de court-circuit entre spires de deux bobines (2 & 5 spires).
- 34 : défaut de court-circuit entre spires de deux bobines (5 & 9 spires).
- 41 : défaut de court-circuit entre spires de deux bobines (12 & 19 spires).

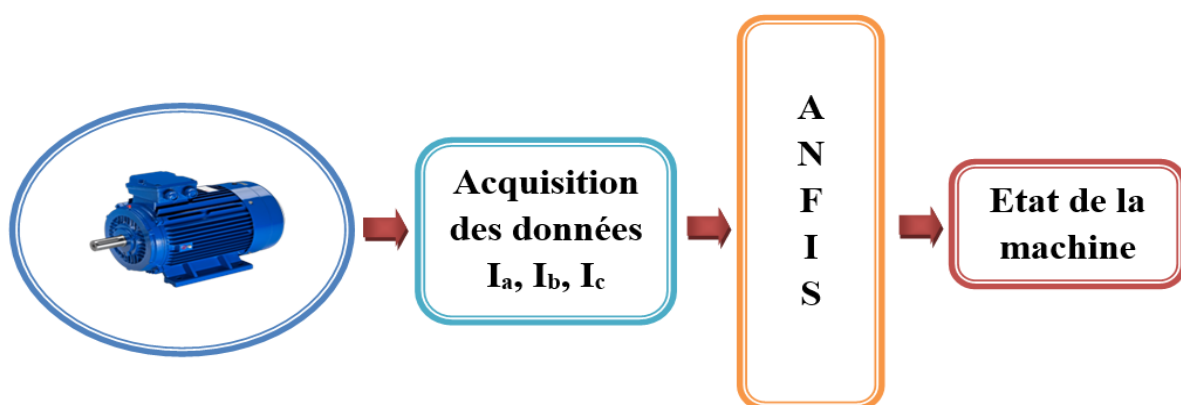


Figure III.9 : Schéma synoptique du système de diagnostic ANFIS

La base d'apprentissage et de test utilisée pour entraîner et évaluer le modèle ANFIS a été construite à partir des données générées par la machine asynchrone en bon état de fonctionnement, ainsi qu'en présence d'un défaut de court-circuit entre spires, dans différentes conditions de charge. Cette base de données reflète donc des situations réalistes et variées pour permettre une bonne généralisation du modèle. Les données collectées ont été ensuite prétraitées pour les rendre utilisables par le modèle ANFIS. Cette base de données d'apprentissage et de test est donc essentielle pour la création d'un modèle de détection de défauts statoriques précis et fiable.

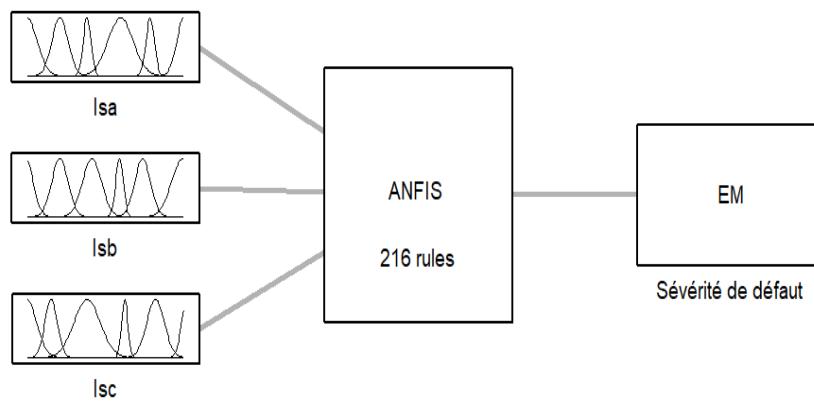
### III.9 Résultats de simulation

Pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser trois fonctions d'appartenance de type **Gaussien** pour les trois variables d'entrée  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  et  $I_{sc}$ , comme illustré sur **la figure III.11**. Cette forme de fonction d'appartenance est couramment utilisée en logique floue en raison de sa simplicité et de sa capacité à modéliser des distributions de probabilité normales dans les données.

**Le tableau III.2** fournit les paramètres du système ANFIS utilisé dans cette étude. Ces paramètres ont été choisis de manière à obtenir une bonne performance du modèle, tout en évitant le surapprentissage ou la sous-apprentissage. Le choix judicieux de ces paramètres est crucial pour la qualité et la précision du modèle ANFIS.

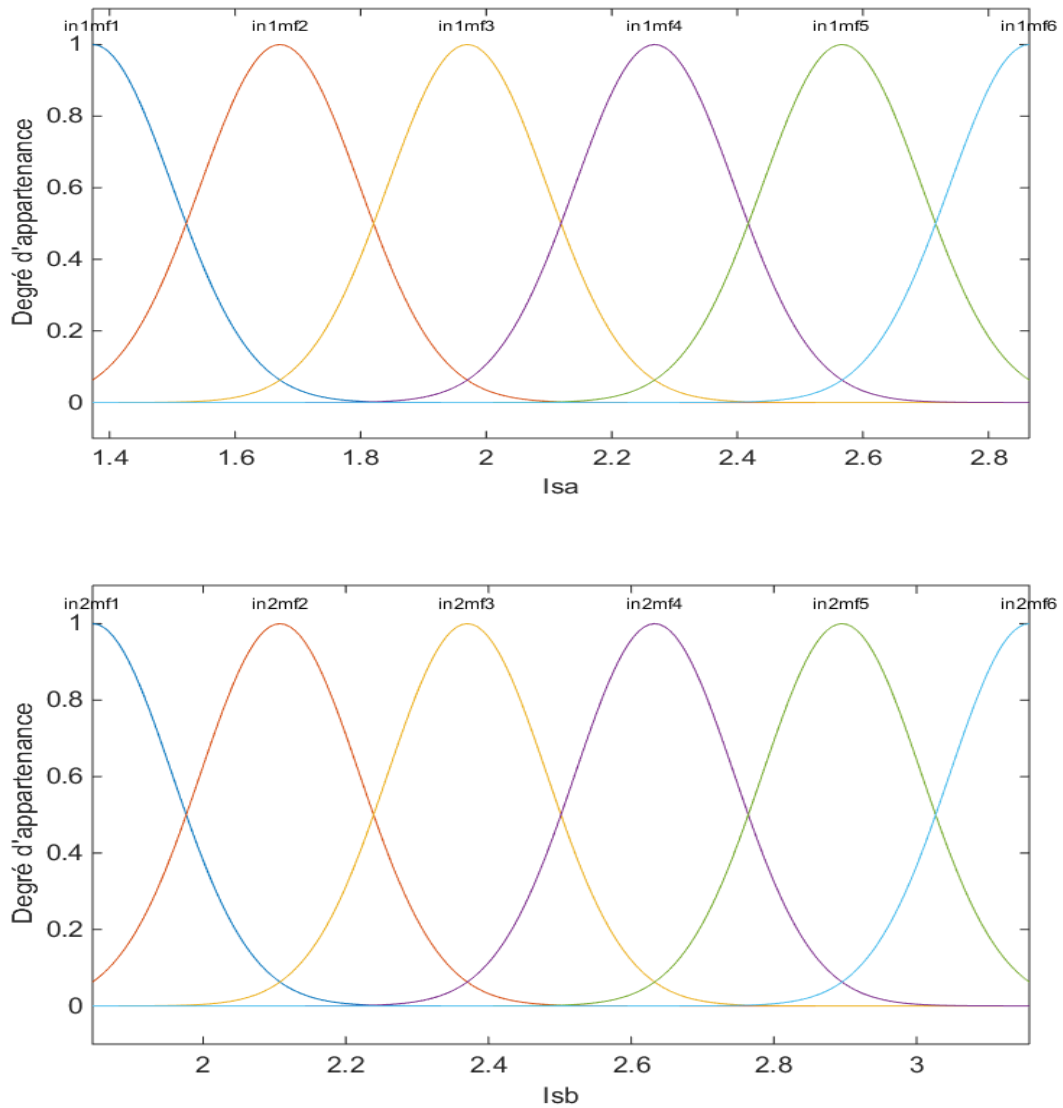
**Tableau III.2:** Paramètres de l'approche ANFIS

Paramètres d'ANFIS	
Nombre d'entrées	3
Nombre de sorties	1
Type de MF des entrées	Gaussienne
Type de sortie floue	Constant
Nombre de règles floues	216
Nombre d'itérations d'apprentissage	1200



System anfis: 3 inputs, 1 outputs, 216 rules

**Figure III.10 : Système ANFIS sous Matlab/Simulink**



**Figure III.11 : Les fonctions d'appartenance obtenus par l'ANFIS**

La figure III.12 montre une représentation en surface 3D de la sévérité du défaut de court-circuit entre spires en fonction de deux variables d'entrée, à savoir  $I_{sa}$  et  $I_{sb}$ . Cette représentation permet de visualiser la relation complexe entre les entrées et la sortie du modèle ANFIS, et de mieux comprendre comment les différentes combinaisons d'entrées influencent la sévérité du défaut. Cette visualisation en 3D est utile pour l'interprétation des résultats et la prise de décision.

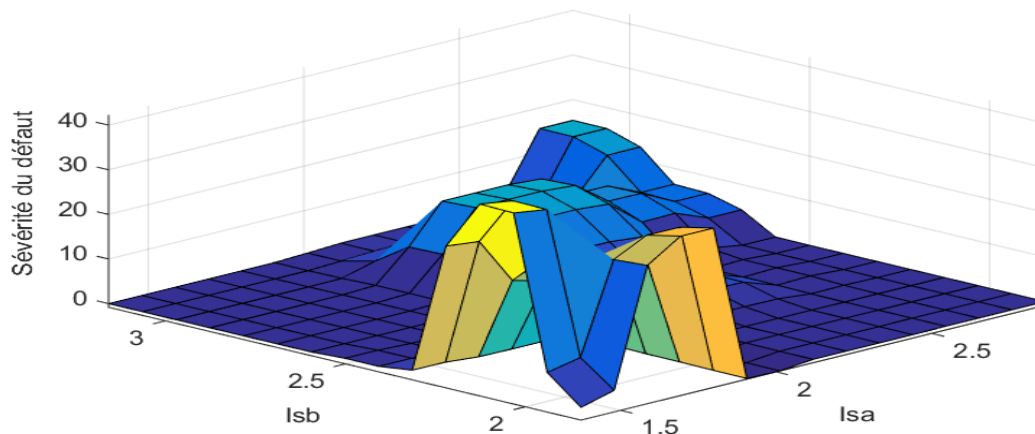
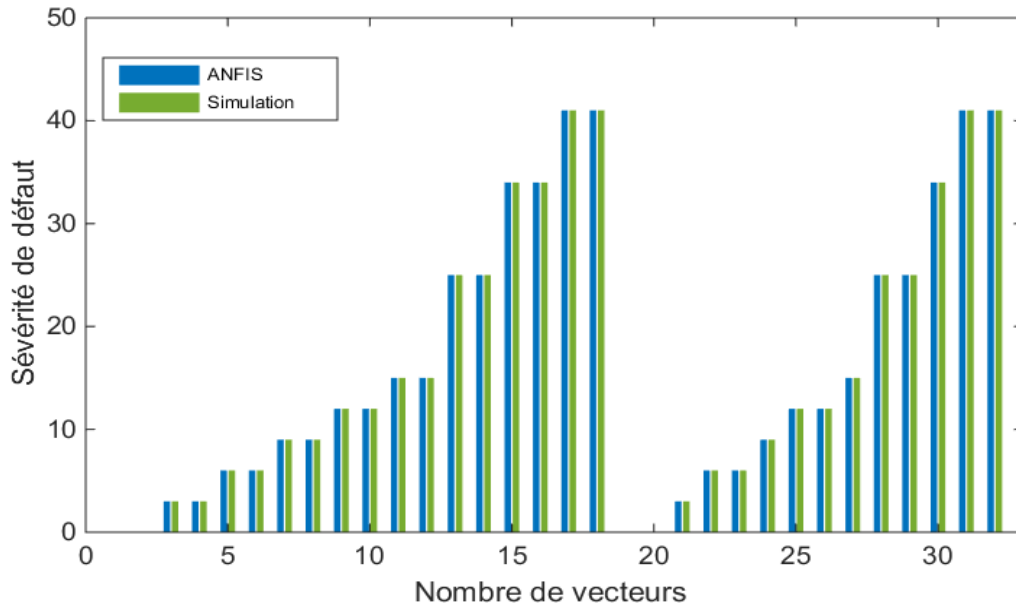
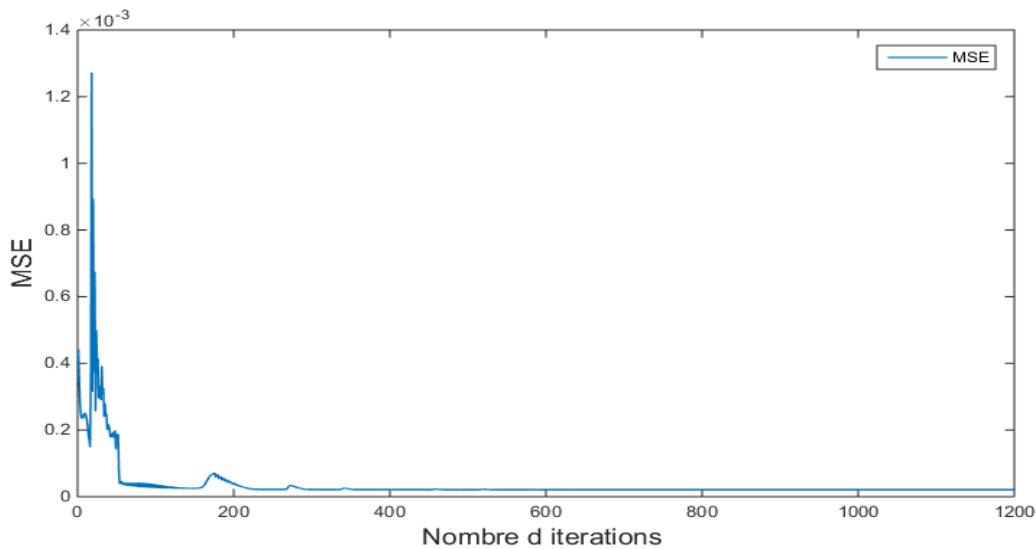


Figure III.12 : La sévérité du défaut en fonction de deux entrées

La figure III.13 présente une comparaison entre les résultats de simulation et la sortie estimée du modèle ANFIS, pour la phase d'apprentissage. Cette comparaison permet d'évaluer la qualité de la prédiction du modèle, en mesurant l'erreur quadratique moyenne MSE (Mean Square Error) entre les valeurs cibles et les valeurs prédites (figure III.14). On peut observer que le modèle ANFIS parvient à reproduire fidèlement les résultats de simulation, avec une faible erreur de prédiction. Cette figure est donc importante pour évaluer la performance du modèle et pour ajuster les paramètres de l'algorithme d'apprentissage si nécessaire.



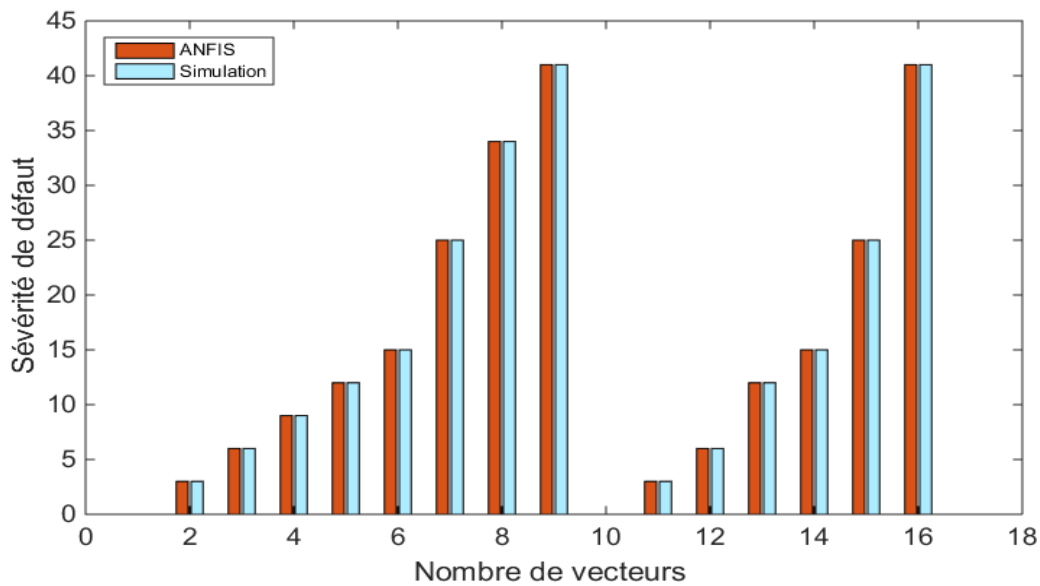
**Figure III.13 : Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteurs pour l'ensemble d'apprentissage**



**Figure III.14 : Variation de l'erreur quadratique moyenne MSE (Apprentissage)**

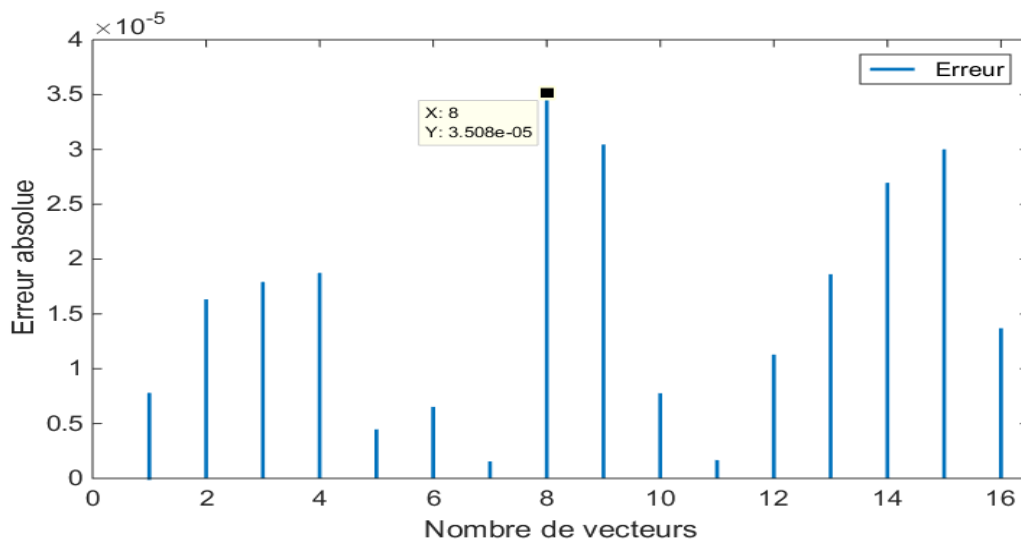
Après l'apprentissage, il est impératif de tester le modèle ANFIS sur une base de données distincte de celle utilisée pour l'entraînement. Cette étape de test permet d'évaluer les performances du modèle et de s'assurer que celui-ci est capable de généraliser correctement aux données inconnues. **La figure III.15** illustre la comparaison entre les résultats de simulation et la sortie prédite du modèle ANFIS, pour la phase de test. Cette comparaison permet d'évaluer l'aptitude du modèle à généraliser aux données inconnues. On peut constater que le modèle

ANFIS parvient à prédire avec précision les résultats de simulation pour les données de test, ce qui confirme sa capacité à généraliser correctement.



**Figure III.15: Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteurs pour l'ensemble de test**

Il convient également de souligner que le système de diagnostic ANFIS présente une erreur absolue maximale très faible de  $3.508 \times 10^{-5}$  pour l'ensemble de test, comme la montre la figure III.16. Cette performance prouve l'efficacité de ce système de surveillance pour le diagnostic des défauts électriques, en particulier les courts-circuits entre spires statoriques, dans les machines asynchrones à cage.



**Figure III.16 : Variation de l'erreur absolue (Test)**

### **III.10 Conclusion**

De manière générale, ce dernier chapitre présente l'utilisation d'un système de diagnostic avancé basé sur un réseau Neuro-Flou de type ANFIS pour la prédiction de la sévérité des défauts statoriques de type court-circuit entre spires. Les résultats obtenus à partir de ce modèle montrent que le réseau ANFIS est capable de détecter avec une grande précision ce type de défaut. Les différentes étapes de conception et d'optimisation du modèle ANFIS sont détaillées, depuis la construction de la base de données jusqu'à la sélection des paramètres de l'algorithme d'apprentissage. La comparaison des résultats obtenus par le modèle ANFIS avec les résultats de simulation montre une très bonne concordance, confirmant ainsi l'efficacité du modèle pour la prédiction de la sévérité des défauts. Cette étude met en évidence la pertinence de l'utilisation de techniques avancées telles que les réseaux Neuro-Flou pour le diagnostic des défauts électriques dans les machines asynchrones à cage, et montre l'intérêt de ces outils pour l'optimisation des procédés industriels.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Le mémoire présenté se focalise sur la modélisation et le diagnostic de la machine asynchrone, en se basant sur une approche neuro-floue ANFIS, avec un accent particulier sur le court-circuit entre spires statoriques. Après une introduction générale sur la machine asynchrone et les différentes méthodes de diagnostic des défaillances, nous avons développé un outil de simulation capable de simuler la machine en mode sain et en mode défaillant. Nous avons expliqué en détail la méthodologie utilisée pour formuler les différentes équations régissant le système, afin de garantir la précision et la fiabilité des résultats obtenus à partir du modèle de simulation. Les résultats obtenus ont montré que le courant de phase est un indicateur très efficace pour détecter les défauts statoriques de la machine asynchrone, contrairement au couple électromagnétique et à la vitesse. Nous avons donc choisi d'utiliser le courant de phase (ligne) comme principal indicateur de défaut, en raison de sa forte corrélation avec l'état de la machine et de sa sensibilité aux défauts statoriques. Cette constatation a été exploitée pour appliquer l'approche neuro-floue ANFIS au diagnostic de défauts de la machine.

Le modèle ANFIS a été conçu en utilisant une méthode guidée par les données, avec une sélection minutieuse des paramètres de l'algorithme d'apprentissage. Les résultats obtenus à partir du modèle ANFIS ont montré une grande précision et une grande efficacité dans la prédiction de la sévérité des défauts de court-circuit entre spires. Nous avons également comparé les performances du modèle ANFIS avec celles du modèle de simulation, et avons observé que le modèle ANFIS est supérieur en termes de précision.

Ce travail a prouvé l'efficacité et la fiabilité de l'approche neuro-floue ANFIS pour le diagnostic des défaillances des machines asynchrones, en particulier pour le court-circuit entre spires statoriques. Cette étude a également mis en évidence l'intérêt de l'utilisation de techniques avancées telles que les réseaux Neuro-Flous pour le diagnostic des défauts électriques dans les machines asynchrones à cage, et leur potentiel pour l'optimisation des procédés industriels. Enfin, ce travail contribue à une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance dans les machines asynchrones, et pourrait aider les professionnels de l'industrie à améliorer les performances et la fiabilité de leurs équipements électriques.

Des perspectives de recherche intéressantes pourraient inclure l'extension de cette approche de diagnostic pour inclure d'autres types de défauts dans la machine asynchrone, tels que les défauts rotoriques et mécaniques. Il serait également intéressant d'explorer l'utilisation de techniques de traitement du signal avancées pour améliorer la précision et la fiabilité du modèle ANFIS. En outre, l'application de cette approche de diagnostic à d'autres types de machines

électriques, telles que les machines synchrones, pourrait être envisagée. Enfin, l'optimisation des paramètres de l'algorithme d'apprentissage pour améliorer les performances du modèle ANFIS pourrait également être explorée dans le cadre de futures recherches.

## Références

- [1] Nait Saidj Amrane et Tiguercha Lynda: *"Etude de la machine asynchrone double étoiles en régime dégradé"*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Eléctrotechnique, 2018.
- [2] Metrouh Mohamed et Moussi Rafik: *"Identification d'une machine asynchrone à cage"*, Mémoire de Master", Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Electrotechnique, 2017, pp. 3-6.
- [3] Derbali Belgacem et Badjadi Chouaib: *"Diagnostic d'un moteur asynchrone d'un compresseur à piston"*, Mémoire de Master, Université Hamma Lakhder Oued Souf Faculté de la Technologie, 2021, pp. 12-13.
- [4] P. O'Donnell: *"Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part 1"*, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 21(4), pp. 853-864, July/August 1985.
- [5] *"Présentation des avaries. Machines électriques tournantes"*, Cahier des Préventions. CP2, Munich, Allemagne, 1988.
- [6] O. V Thorsen et M. Dalva: *"A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries"*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, N°5, pp. 1186-1196, 1995.
- [7] A. Lebaroud: *"Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables"*, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2006.
- [8] O. Ondel: *"Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone"*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2006.
- [9] S. Laribi: *"Contribution à la commande et diagnostic des défauts statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à cage d'ecureuil"*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016.
- [10] H. Razik et G.Dédier: *"Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone"*, Université Henri Poincaré, Nancy.
- [11] D.Toumi: *"Détection des défauts rotoriques dans la machine synchrone (cassure des barres et excentricité)"*, Mémoire de Magister, USTO Oran, 2002.
- [12] S.Laribi: *"Synthèse des méthodes de diagnostic appliquées à la détection des défauts dans les machines asynchrones"*, Mémoire de Magister, USTO Oran, 2005.
- [13] H.Toliat, S.Arfeen et A.G.Parlo: *"A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines"*, 1996.

- [14] P.Vas: *"Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines"*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1993.
- [15] A. Ibrahim: *"Contribution au diagnostic de machines électromécaniques: exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée"*, Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [16] N. Allal: *"Cours sur le diagnostic des défauts dans les machines électriques"*, Université Amar Telidji de Laghouat Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, 2023.
- [17] Kharbache Elhoucine et Makrane Zakaria: *"Diagnostic des défauts des machines asynchrones par emploi de l'intelligence artificielle"*, Mémoire de Master, Université Amar Telidji de Laghouat Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, 2022, p. 26.
- [18] J.-P. Caron et J.-P. Hautier: *"Modélisation et commande de la machine asynchrone"*, Editions Technique, France, 1995.
- [19] B. A. Bazine: *"Identification en boucle fermée de la machine asynchrone: application à la détection de défaut"*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers et Université de Tunis El- Manar, 2008.
- [20] Kheffache Sami et Khemila Souad: *"Identification, modélisation et simulation d'un variateur de vitesse pour une machine asynchrone"*, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaïa Faculté de Technologie Département de Génie Electrique, 2019.
- [21] A. Hamoudi: *"Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par les techniques d'identification"*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2018.
- [22] G. Grellet et G. Clerc: *"Actionneurs électriques. Principes, modèles et commande"*, Eyrolles, Paris, 1997.
- [23] M. B. K. Bouzid: *"Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones"*, Thèse de Doctorat, Université Tunis El Manar Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis , 2009.
- [24] S. Bachir: *"Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique"*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [25] E. Schaeffer: *"Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts"*, Thèse de Doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, France, 1999.
- [26] V. Devanneaux: *"Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic"*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2002.

- [27] G. Didier: *"Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances"*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [28] M. Bouharaket: *"Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique"*, Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2006.
- [29] J.M. Pelbois, M. Boussak et P. Goerger: *"Modèle simplifié de la machine asynchrone triphasée en défaut de court-circuit entre spires au stator"*, Electrotechnique du futur EF Décembre 2003.
- [30] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou et G. Champeno: *"Diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique-modélisation et détection des défauts stator et rotor"*, Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 05, N° 03, 2002.
- [31] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou et G. Champenois: *"Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines"*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N° 03, p. 963–973, June 2006.
- [32] S. Bachir, S. Tnani, T. Poinot et J-C. Trigeassou: *"Stator fault diagnosis in induction machines by parameter estimation"*, IEEE International (SDEMPED'01), Grado, Italie, p. 235–239, Septembre 2001.
- [33] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou et G. Champenois: *"Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines"*, European Power Electronics (EPE'01), Graz, Autriche, August 2001.
- [34] M. S. Achbi et S. Kechida: *"Modélisation et diagnostic des systèmes dynamiques hybrides par anfis application à un système à deux réservoirs"*, International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID 2015), Djelfa, 2015.
- [35] Boudjerda Moncef et Saidi Yakoub: *"Contribution au pronostic de défaillances d'un système de production a base d'une approche neuro-flou (ANFIS). application au système CTA de l'unité SAIDAL"*, Mémoire de Master ,Université Abou Baker Belkaid-Tlemcen Faculté de Technologie, 2017.
- [36] J. Jodouin: *"Les réseaux neuromimétiques"*, Hermes, Paris, 1994.
- [37] F. Chevré et F. Guély: *"Cahier technique N° 191 la logique floue"*, 1998 .
- [38] S. Alili: *"l'Agent neuro flou: application: prevision de la precipitation dans une region agraire"*, Mémoire de Master , Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi faculté des sciences exactes et de la technologie département de mathématiques et informatique , 2013-2014.
- [39] D. Nauck et R. Kruse: *"Neuro-fuzzy systems for function approximation, fuzzy sets and systems"*, 1999, pp. 261-271.
- [40] Racoceanu.daniel: *"Contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle"*, Thèse DEA, Université De Franche-Comté De Besançon, 2006.

- [41] M. Diab: "*Contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques*", Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [42] R.Mahdaoui et H.L Mouss: "*Diagnostic industriel par neuro-floue application à un système de production*", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007 , Laboratoire d'Automatique et Productique (LAP) Université de Batna, 03-04 Novembre 2007.
- [43] H. Khemissi: "*Application des systemes hybrides (neuro-flous) a la modelisation de la salinite des cours d'eau : cas du bassin versant tafna*", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA), El-Harrach (Alger) ,2019-2020.
- [44] Benfatma Yassine et Manaa Mohamed Salah: "*Commande d'un simulateur d'helicoptere (trms) par une approche hybride (neuro-floue)*", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département De Génie Electrique, 2012.
- [45] M. Al-Harathi: "*Design of a fuzzy-based PID controller for a dc servomotor position control*", First International Conference on Electrical Systems PCSE'05, O.E.Bouaghi University, Algeria, May 9-11 2005.