

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 سعد دحلب البلدية 01  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 01

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكتروتقتي  
Département d'Automatique et Electrotechnique



## Mémoire de Master

Filière Électrotechnique  
Spécialité Machine électrique  
présenté par

**HEMIANI TAYEB**

**&**

**AMEZIANE SAOUSEN**

pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique spécialité Machines  
électriques

---

# MODÉLISATION ET DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE FONCTIONNANT EN RÉGIME DÉSÉQUILIBRÉ

---

Proposé par :

Promoteur : **Mr hachelaf Redouane**

Année Universitaire 2020-2021

## Remerciements

---

*D'abord, nous devons grâce à Dieu qui nous a comblées deses bienfaits et nous a données la force pour accomplir ce travail.*

*J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance  
Envers Monsieur **Mr hachelaf Redouane***

*Mon encadreur pour ses conseils précieux, sa disponibilité et sa patience.*

*J'aurais également le plaisir de présenter mes chaleureux remerciements au membre du jury*

*D'avoir bien voulu assister à la soutenance de mémoire et d'accepter de juger mon travail.*

# Dédicace AMEZIANE

---

*Je dédie ce mémoire à mes très chers parents*

*pour leur soutien moral et matériel pour leurs*

*Encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés*

*dans les moments les plus ardues.*

*A mon encadreur Monsieur HACHLEF .R .*

*A mes chères sœurs NADIA, SOUAAD ,ZINEB, SAMIA*

*A mes frères MOURAD , SOFIANE, SALAH EDINE*

*Et à tous mes amis.*

*Sans oublier mon chat MACHA*

# Dédicace HEMIANI

---

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

Je dédie ce mémoire A mes chers parents pour leurs encouragements et leur soutien moral et financier dans les moments les plus dures.

A mon encadreur qui m'a aidé à réaliser ce travail .

Et mon unique petite sœur MAYA

A mes frères BICHA , ISLAM , SIF EDINE ET BADRO

A tous mes amis

sans oublier ma 2eme famille Club IBDA

---

## ملخص:

يُدرج هذا العمل ضمن موضوع النمذجة و تشخيص الأعطال لألة قفص السنجاب غير المتزامن في وجود عدم توازن في الجهد.

تستخدم النمذجة التي تم إجراؤها بواسطة طريقة العناصر المحدودة (FEM) برنامج flux2D لمحاكاة الآلة غير المتزامنة من أجل التحقق من تأثير عدم توازن الجهد على السلوك الكهربائي للآلة غير المتزامنة.

يعتمد موضوع تشخيص الأعطال على تطبيق تقنية معالجة الإشارات التي تعد حلاً فعالاً لمشكلة تشخيص الأعطال (التحليل الطيفي للتيار الثابت ((FFT)).

**كلمات المفاتيح** آلة غير متزامنة ، خطأ عدم توازن الجهد ، التشخيص ، FFT.

---

## Résumé :

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la modélisation et diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de déséquilibre de la tension.

La modélisation fait par la méthode des éléments finis (MEF) en utilise le logiciel flux2D pour simuler la machine asynchrone au but de vérifier l'effet de déséquilibre de tension sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application d'une technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts (l'analyse spectrale du courant statorique (FFT)).

Mots clés : Machine asynchrone, défaut de déséquilibre de tension, diagnostic, FFT.

---

## cAbstract :

This work is part of the theme of modeling and diagnosis of defects of the squirrel cage asynchronous machine in the presence of voltage unbalance.

The modeling is done by the finite element method (FEM) using the flux2D software in order to verify the effect of voltage unbalance on the electrical behavior of the asynchronous machine.

The fault diagnosis theme is based on the application of a signal processing technique which is an efficient solution for the fault diagnosis problem (the spectral analysis of the stator current (FFT)).

**Key words:** Asynchronous machine, voltage unbalance fault, diagnosis, FFT

---

LISTE DES TABLEAUX :

<b>Tableau II.1</b> : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.....	35
<b>Tableau II.2</b> : tableau d'interprétation .....	61

LISTE DES FIGURES :

<b>Figure I.1 :</b> <i>Machine asynchrone</i> .....	2
<b>Figure I.2 :</b> <i>élément de constitution d'une machine a cage d'écureuil[2]</i> .....	3
<b>Figure I.3 :</b> <i>Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite)</i> .....	3
<b>FigureI.4 :</b> <i>Rotor bobiné</i> .....	4
<b>Figure I.5 :</b> <i>vue en perspective du Rotor</i> .....	5
<b>Figure I.6 :</b> <i>Schéma symbolique du stator</i> .....	6
<b>Figure. I. 7 :</b> <i>Organigramme des défauts externes de la machine asynchrone triphasée à cage</i> .....	7
<b>Figure. I.8 :</b> <i>Organigramme des défauts internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage</i> .....	8
<b>Figure I.9 :</b> <i>Différent défauts des machines asynchrone</i> .....	10-11
<b>Figure I. 10 :</b> <i>Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte</i> .....	13
<b>Figure I. 11:</b> <i>roulement à bille</i> .....	14
<b>Figure I.12 :</b> <i>Les différents cas du déséquilibre de tension dans les machines asynchrones triphasés</i> .....	15
<b>Figure I.13 :</b> <i>Les différents grandeurs de diagnostic dans une machine</i> .....	16
<b>Figure I.14 :</b> <i>Bobine exploratrice pour la Mesure du flux de fuite axial</i> .....	18
<b>Figure I.15 :</b> <i>schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique</i> .....	19
<b>Figure 1.16 :</b> <i>Représentation temporelle vers fréquentielle</i> .....	20
<b>FigureII.1 :</b> <i>Les différentes méthodes de modélisation de la MAS</i> .....	22
<b>Figure II.2 :</b> <i>Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation</i> .....	23
<b>Figure II.3 :</b> <i>Eléments classiques en une et deux dimensions</i> .....	27
<b>Figure II.4 :</b> <i>Enchaînement des étapes dans Flux 2D<sup>®</sup></i> .....	29
<b>Figure II.5 :</b> <i>La géométrie de la machine asynchrone</i> .....	30
<b>FigureII.6:</b> <i>Dimension des encoches , a) l'encoche statorique b) l'encoche rotorique</i> .....	30
<b>FigureII.7:</b> <i>Affectation des régions surfaciques</i> .....	31
<b>Figure II.8 :</b> <i>discrétisation de maillage</i> .....	31
<b>FigureII.9:</b> <i>Répartition du maillage</i> .....	32
<b>FigureII.10:</b> <i>Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie</i> .....	32
<b>FigureII.11:</b> <i>Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal</i> .....	34
<b>Figure II.12 :</b> <i>Induction magnétique pour le fonctionnement nominal</i> .....	34

<b>Figure II.13:</b> <i>Vitesse de rotation</i> .....	35
<b>Figure II.14 :</b> <i>Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2 R-3</i> .....	35
<b>Figure II.15 :</b> <i>Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3</i> .....	36
<b>Figure II.16 :</b> <i>Zoom des Courants statoriques supprposé au niveau des résistances R-1 , R-2, R-3</i> .....	36
<b>Figure II.17 :</b> <i>Couple électromagnétique</i> .....	37
<b>Figure II .18 :</b> <i>Circuit équivalent en présence de défaut</i> .....	38
<b>Figure II.19 :</b> <i>Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement déséquilibré 5%</i> .....	39
<b>Figure II.20:</b> <i>Induction magnétique pour le fonctionnement déséquilibré 5%</i> .....	39
<b>Figure II.21:</b> <i>Vitesse de rotation avec défaut de 5%</i> .....	40
<b>Figure II.22:</b> <i>Zoom sur le défaut de la vitesse de rotation</i> .....	40
<b>Figure II.23 :</b> <i>Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances R-1 R-2 R-3</i> .....	41
<b>Figure II.24 :</b> <i>Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3</i> .....	41
<b>Figure II.25 :</b> <i>Zoom des Courants statoriques superposés au niveau des résistances ; R-C1 ,R-B1,RA1</i> .....	42
<b>Figure II.26 :</b> <i>Couple électromagnétique déséquilibré</i> .....	42
<b>Figure II.27:</b> <i>Répartition des lignes du champ magnétique déséquilibré</i> .....	43
<b>Figure II.28:</b> <i>Induction magnétique déséquilibré</i> .....	43
<b>Figure II. 29:</b> <i>Vitesse de rotation déséquilibré</i> .....	44
<b>Figure II.30:</b> <i>Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2,R-3...</i> .....	44
<b>Figure II.31:</b> <i>Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3</i> .....	45
<b>Figure II.32 :</b> <i>Zoom des Courants statoriques supprposé au niveau des résistances ; R-1, R-2, R3</i> .....	45
<b>Figure II.33 :</b> <i>Couple électromagnétique déséquilibré</i> .....	46
<b>Figure II.34 :</b> <i>Répartition des lignes du champ magnétique déséquilibré</i> .....	47
<b>Figure II.35 :</b> <i>Induction magnétique déséquilibré</i> .....	48
<b>Figure II.36 :</b> <i>Vitesse de rotation</i> .....	48
<b>Figure II.37:</b> <i>Zoom de Vitesse de rotation déséquilibré 10% +5%</i> .....	49
<b>Figure II.38 :</b> <i>Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3..</i> .....	49
<b>Figure II.39 :</b> <i>Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3</i> .....	50
<b>Figure II.40 :</b> <i>Zoom des Courants statoriques supprposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2,</i>	

<i>R-3</i> .....	50
<b>Figure II.41</b> : <i>Couple électromagnétique déséquilibré 10% +5%</i> .....	51
<b>Figure II.42</b> : <i>Répartition des lignes du champ magnétique au présence de déséquilibre 10% +deph</i> .....	51
<b>Figure II.43</b> : <i>Induction magnétique au présence de déséquilibre 10% +deph</i> .....	52
<b>Figure II.44</b> : <i>Vitesse de rotation déséquilibré à 10% +deph</i> .....	52
<b>Figure II.45</b> : <i>Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1,R-2 R-3</i> .....	53
<b>Figure II.46</b> : <i>Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3</i> .....	53
<b>Figure II.47</b> : <i>Couple électromagnétique déséquilibré 10%+deph</i> .....	56

## Listes des acronymes et abréviations :

MA	MACHINE ASYNCHRONE
MEF	MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS
MCSA	MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS
FFT	FAST FOURIER TRANSFERT
R	RESISTANCE
H	LE CHAMP MAGNETIQUE
E	LE CHAMP ELECTRIQUE
B	L'INDUCTION MAGNETIQUE
$\epsilon$	PERMITTIVITE ELECTRIQUE
$\delta$	CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE
$\rho$	DENSITE DE CHARGE VOLUMIQUE
$\mu$	PERMEABILITE MAGNETIQUE

## SOMMAIRE :

<b>I.1 INTRODUCTION :</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE :</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2.1 Le stator :</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2.2 Le rotor :</b> .....	<b>4</b>
I.2.2.1 Rotor a bobine : .....	4
I.2.2.2 Rotor a cage: .....	4
<b>I.2.3 Les organes mécaniques :</b> .....	<b>5</b>
<b>I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :</b> .....	<b>6</b>
<b>I.4 DEFAILLANCE DE LA MACHINE ASYNCHRONE :</b> .....	<b>6</b>
<b>I.4.1 Définitions et concept [9]</b> .....	<b>6</b>
<b>I.4.2 Différent défaillance de la machine asynchrone [10]</b> .....	<b>7</b>
I.4.2.1 Défauts statoriques : .....	8
I.4.2.1.1 Court-circuit dans une phase : .....	9
I.4.2.1.2 Circuit ouvert sur une phase : .....	9
I.4.2.1.3 Court-circuit entre deux phases : .....	9
I.4.2.1.4 Court-circuit avec le bâti [16] .....	10
I.4.2.2 Défauts rotoriques : .....	11
I.4.2.2.1 Ruptures de barres : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4.2.2.2 Ruptures d'anneaux : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4.2.3 Excentricité dynamique et statique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4.2.4 Défauts de roulement : .....	13
I.4.2.5 Défauts de déséquilibre de tension : .....	14
<b>I.5 DIFFERENTES METHODES DE DIAGNOSTIC :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.5.1 Techniques mécaniques</b> .....	<b>16</b>
I.5.1.1 diagnostique ar mesure de la température .....	16
I.5.1.2 Diagnostique par mesure des vibrations .....	17
<b>I.5.2 Diagnostics chimiques</b> .....	<b>17</b>

<b>I.5.3 Techniques magnétiques et électriques :</b> .....	<b>18</b>
I.5.3.1 Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite .....	18
I.5.3.2 Diagnostique par l'analyse du courant statorique .....	18
<b>I.5.4 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic</b> .....	<b>20</b>
I.5.4.1 Transformée de Fourier rapide (FFT) .....	20
I.5.4.2 Transformée en Ondelette (TO) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS</b>	
<b>NUMÉRIQUES</b> .....	<b>22</b>
<b>II.1 INTRODUCTION :</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2 MÉTHODE DE MODÉLISATION DE MAS :</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2.1 Méthode des éléments finis (MÉF)</b> .....	<b>25</b>
II.2.1.1 DÉFINITION : .....	25
II.2.1.2 Modèle employé : .....	26
II.2.1.2.1 Le mode magnétique transitoire.....	26
II.2.1.2.2 Mode magnétostatique .....	26
II.2.1.2.3 Mode magnétodynamique : .....	26
II.2.1.3 Principe de la méthode des éléments finis .....	26
II.2.1.4 Types d'éléments finis .....	27
<b>II.3 PRESENTATION ET STRUCTURE DU LOGICIEL DE RESOLUTION FLUX 2D®</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.1 Etapes de création d'un modèle sain de la MAS à cage d'écureuil avec Flux 2D</b> .....	<b>28</b>
II.3.1.1 Construction géométrique.....	29
II.3.1.2Génération du maillage .....	29
II.3.1.3 Résolution.....	29
II.3.1.4 Exploitation des résultats.....	29
<b>II.4 APPLICATION ET SIMULATION DE LA MAS</b> .....	<b>30</b>
<b>II.5 COUPLAGE AVEC LES EQUATIONS DE CIRCUIT</b> .....	<b>33</b>
<b>II.6 RESULTATS DE SIMULATION PAR LA MAGNETODYNAMIQUE</b> .....	<b>33</b>
<b>II.6.1 Caractéristique de simulation en magnétodynamique</b> .....	<b>33</b>
a) Avantages : .....	33

b) Inconvénients : .....	33
<b>II.6.2 Résultats graphiques.....</b>	<b>34</b>
<b>II.7 FONCTIONNEMENT SAIN DE LA MAS : .....</b>	<b>36</b>
<b>II.7.1 Interprétation .....</b>	<b>38</b>
<b>II.8 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DEFAUT (DESEQUILIBRE).....</b>	<b>39</b>
<b>II.8.1 Présence de défaut 5%.....</b>	<b>40</b>
II.8.1.1 Résultat graphique : .....	40
II.8.1.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 5%).....	41
<b>II.8.2 Présence de défaut 10%.....</b>	<b>44</b>
II.8.2.1 Résultat graphique : .....	44
II.8.2.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10%).....	45
<b>II.8.3 Présence de défaut 10% sur la 2ème phase et 5% sur la 3ème phase :.....</b>	<b>48</b>
II.8.3.1 Résultat graphique : .....	48
II.8.3.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10% / 5%).....	49
<b>II.8.4 PRESENCE DE DEFAUT SUR LE DEPHASAGE + DESEQUILIBRE DE TENSION 10% : .....</b>	<b>52</b>
II.8.4.1 Résultat graphique : .....	52
II.8.4.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10% + déphasage déséquilibré).....	53
<b>II.8.5 INTERPRÉTATION GLOBALE : .....</b>	<b>55</b>
<b>II.9 CONCLUSION : .....</b>	<b>56</b>
<b>CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE.....</b>	<b>57</b>
<b>III.1 INTRODUCTION : .....</b>	<b>57</b>
<b>III.2 DESEQUILIBRE : .....</b>	<b>58</b>
<b>III.2.1 Définition : .....</b>	<b>58</b>
<b>III.2.2 Effets du déséquilibre : .....</b>	<b>58</b>

<b>III.2.3 Sources du déséquilibre :</b> .....	<b>59</b>
<b>III.3 DIAGNOSTIC PAR LA MÉTHODE MCSA :</b> .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
<b>III.3.1 spectre d'un signal :</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1.1 Définition de spectre d'un signal : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1.2 Analyse spectrale de courant statorique(MCSA):.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3.1.2.1 Définitions : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
L'analyse spectrale du courant statorique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
L'analyse du courant statorique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>III.3.2 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA :</b> .....	<b>61</b>
<b>III.3.3 Technique de la FFT</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>III.4 RÉSULTATS GRAPHIQUE PAR MCSA</b> .....	<b>63</b>
<b>III.4.1 Résultats expérimentaux et Analyse</b> .....	<b>63</b>
III.4.1.1 Signature du courant statorique dans le cas du moteur sain.....	<b>63</b>
III.4.1.1.1 INTERPRÉTATION : .....	<b>64</b>
III.4.1.2 Signature du vitesse dans le cas du moteur sain.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.4.1.3 Signature du couple dans le cas du moteur sain.....	<b>65</b>
<b>III.4.2 Défaut de déséquilibre de tension 10% :</b> .....	<b>66</b>
III.4.2.1 Signature du courant dans le cas du moteur déséquilibrée.....	<b>66</b>
III.4.2.1.1 INTERPRÉTATION : .....	<b>67</b>
III.4.2.2 Signature du couple dans le cas du moteur déséquilibrée .....	<b>67</b>
III.4.2.3.1INTERPRÉTATION : .....	<b>68</b>
<b>... III.5 CONCLUSION :</b> .....	<b>68</b>

## INTRODUCTION GENERALE :

---

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible cout, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice. Autrefois, sa mise en œuvre (démarrage et variation de vitesse) se révélait compliqué mais tout cela s'est résolu grâce aux progrès de l'électronique de puissance. La conséquence de ce développement de l'électronique de commande fait que le moteur asynchrone est maintenant utilisé dans des domaines très variés Transport (TGV et tramways), Industrie, Production d'énergie (éolienne).....

L'objectif de notre travail est la modélisation et le diagnostic de la machine asynchrone, pour la simulation du déséquilibre de tension. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Ce travail contient trois chapitres, Nous allons présenter dans le premier chapitre une généralité sur les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil, un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes et les différentes méthodes de diagnostic. Le deuxième chapitre nous avons traité la modélisation de la MAS par la méthode des éléments finis, la modélisation numérique de la machine saine/présence de défaut puis on a parlé du logiciel FLUX2D. D'autre part nous avons traité la simulation de la MAS par logiciel flux2D à l'état sain et l'état de présence de défaut. Le troisième chapitre on a parlé du déséquilibre, puis on a étudié la diagnostic avec la méthode l'analyse spectrale par FFT .

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

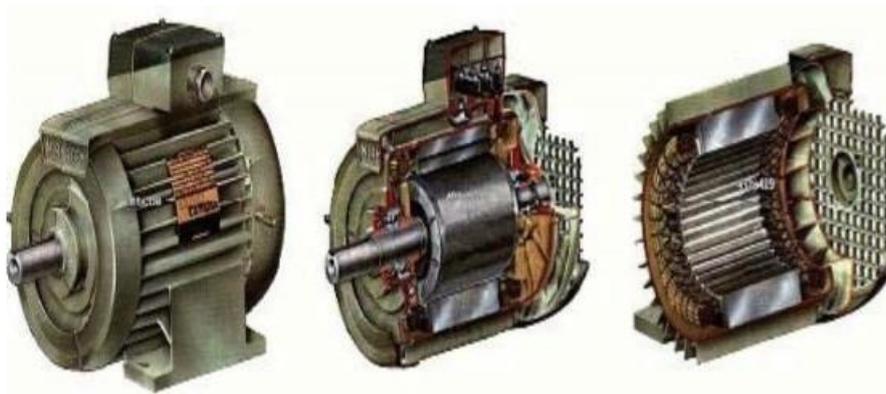
## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

### I.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous présentons la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, et cela par la constitution de la machine asynchrone : rotor (partie mobile), stator (partie fixe). Et son principe de fonctionnement, et puis nous nous précisons les différents défauts de la MAS (électrique, mécanique, environnement), les causes de défauts que ce soit externe ou bien interne et les différents techniques de diagnostic.

### I.2 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit 2 types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est, électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil. [1]



*Figure I.1 : Machine asynchrone*

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

représente les éléments de constitution de la machine asynchrone a cage d'écureuil

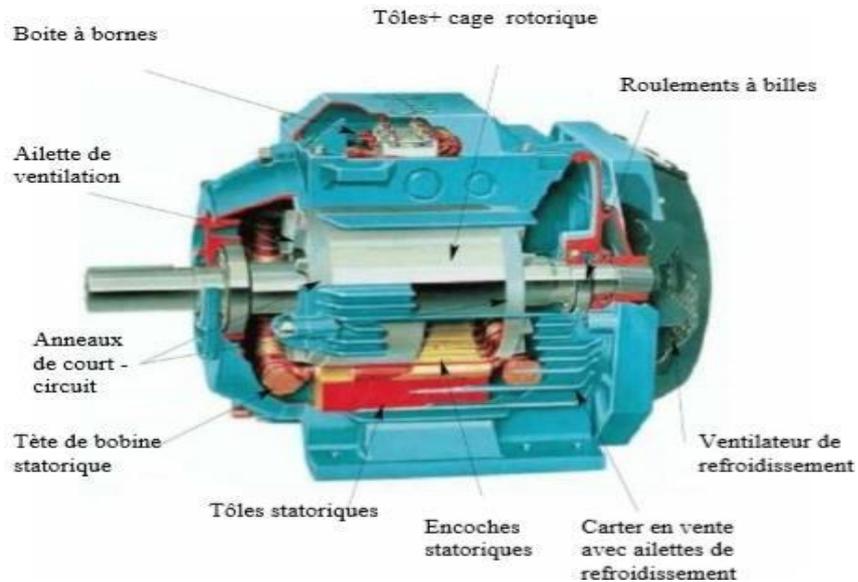


Figure I.2 : élément de constitution d'une machine a cage d'écureuil [2]

## I.2.1 Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans les quelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure I.3). Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [3].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de 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. [3]

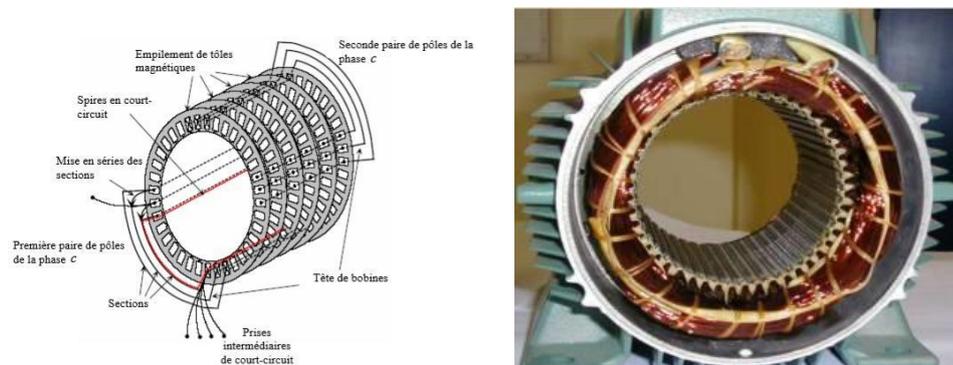


Figure I.3 : Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite)

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

## I.2.2 Le rotor :

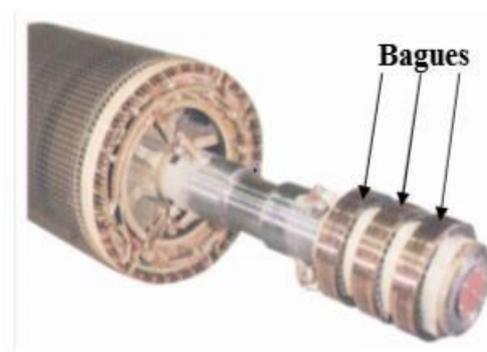
Partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique, tout comme le stator, le circuit magnétique est constitué de tôles d'acier qui sont en général, de même origine que celle utiliser pour la construction du stator, les rotors des machines asynchrones peuvent êtres de deux types : rotor bobine et rotor a cage [4]

### I.2.2.1 Rotor a bobine :

Sont constitué de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâceà un système des bague-balai positionné sur l'arbre de la machine. [3]

Les enroulements rotoriques localise dans les encoches situe au périphérique du rotor.

Ces enroulements sont bobinés de la machine à obtenir un enroulement triphasé à 'P' pair de pole. Le bobinage rotoriques sont toujours couple en Etoile, et les trois bornes accessibles sont reliés à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitue de trois bagues et trois balaisfixes.



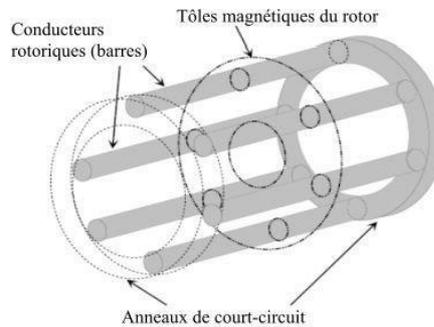
*Figure I.4: Rotor bobiné*

### I.2.2.2 Rotor a cage:

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas du rotor a cage d'écureuil, les conducteurs sont réaliser par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives decuivre performées et frettes dans les tôles du rotor.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 dans les tôles soient négligeables sauf lorsqu'il y a une rupture de barre

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le rotor bobiné, et de ce fait son prix de revient reste inférieur. De plus, il dispose d'une robustesse importante que celle du bobiné, il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.[6]



*Figure I.5 : vue en perspective du Rotor*

## I.2.3 Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. 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 lequel est fixé un demi-accouplement. Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc.).

Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.

Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). 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 dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances.

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

## I.3 Principe de fonctionnement :

Tel que mentionné précédemment, la machine asynchrone est constituée principalement d'un stator et d'un rotor. Ces éléments sont fabriqués à l'aide de matériaux spéciaux et de manière à ce que le moteur à induction puisse fonctionner de la meilleure des manières possibles. Le stator, partie fixe de la machine, est constitué de  $3p$  (où  $p$  désigne le nombre de paires de pôles) bobines alimentées par un système de tension et de courant triphasé de fréquence  $f$  fournies soit par le réseau électrique, soit par le variateur. Le déphasage entre les tensions et les courants des trois phases est de  $\frac{2P}{3}$  radians. Cependant, chaque  $p$  série comporte trois bobines qui sont séparées de  $\frac{2P}{3}$  les unes des autres. Ainsi, nous pouvons ramener l'explication du principe de fonctionnement de la machine asynchrone à 3 enroulements que nous notons "a", "b" et "c". (La Figure I.6) illustre une schématisation symbolique du stator.

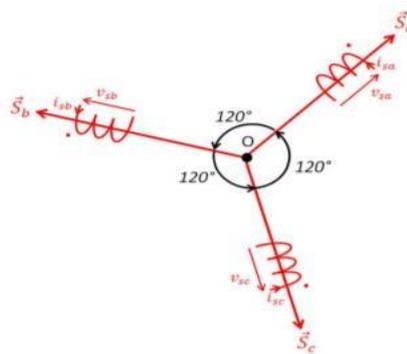


Figure I.6 : Schéma symbolique du stator

## I.4 Défaillance de la machine asynchrone :

### I.4.1 Définitions et concept [9]

Une anomalie : est un particulaire non conforme à la loi naturelle ou logique

Une défaillance : est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique

Une panne : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

Un défaut : est une anomalie de comportement au sein d'un système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. il est donc claire qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas forcément une défaillance, en effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

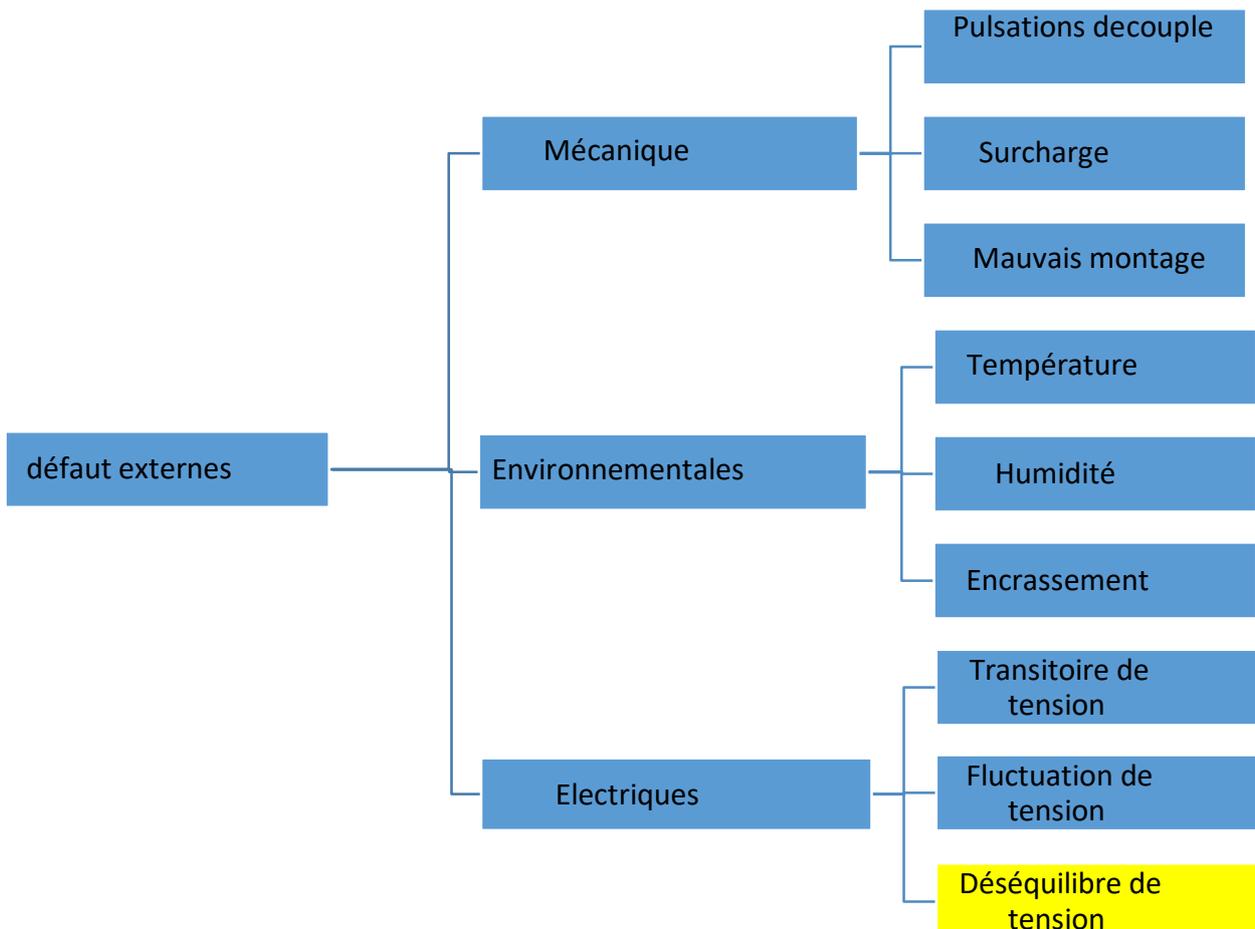
diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance donc de panne.

Une perturbation : consiste en tous phénomènes conçus comme anormale influençant un processus, Non ou mal, représente par un modèle de référence.

## I.4.2 Diffèrent défaillance de la machine asynchrone [10]

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défaut. Ces derniers peuvent être classés selon leur cause en deux familles (figure I.7) les défauts à cause interne et les défauts à cause externe. Les défauts externes sont provoqués par des tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement de l'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuit magnétique, bobinage du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotoriques). A titre d'exemple nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

- *Les défauts externes de la machine asynchrone*



**Figure. I. 7 :** *Organigramme des défauts externes de la machine asynchrone triphasée à cage*

D'après l'organigramme de (figure I.7), les origines des défauts sont diverses ; nous citerons à titre indicatif des origines de type :

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

- Mécaniques : mauvais montage, surcharge, fluctuation du couple
- Environnementales : température, humidité, poussière.
- Electriques : transitoire de la tension, fluctuation de la tension, déséquilibre de tension

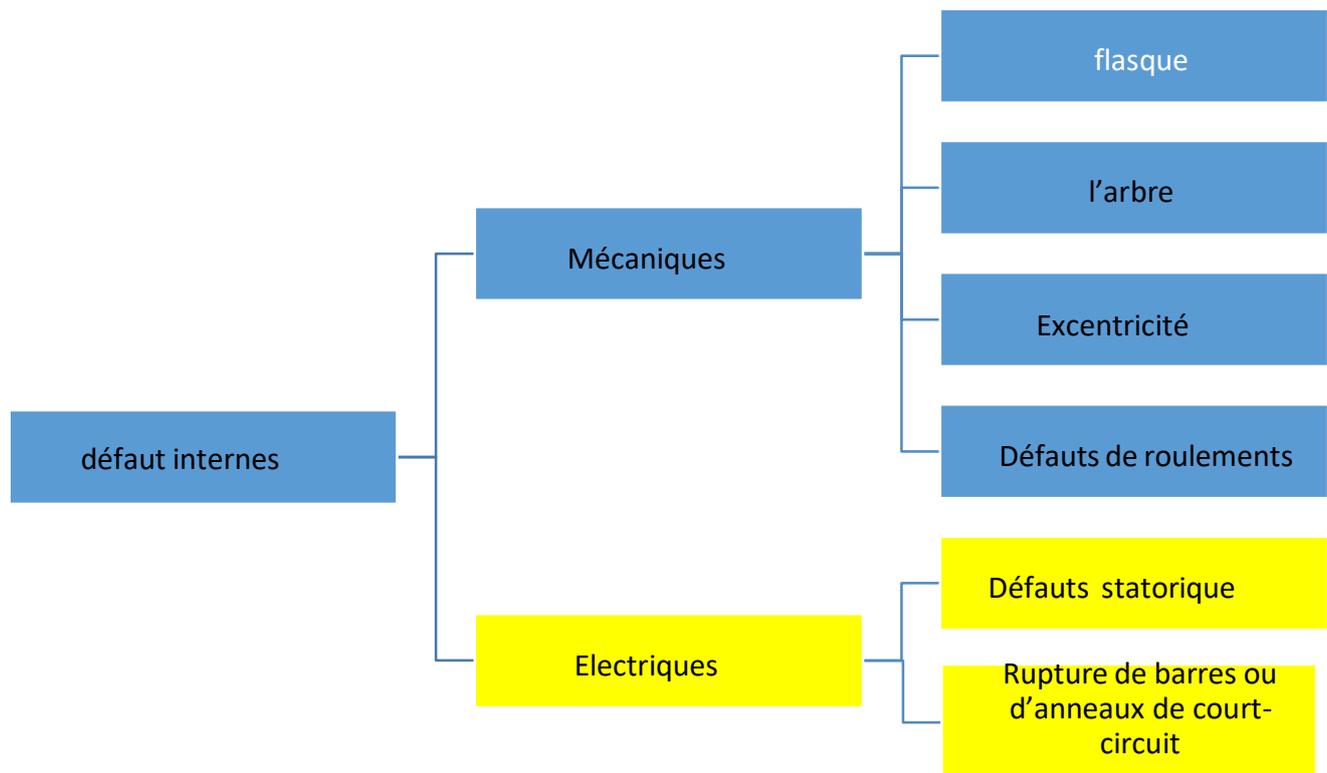
## *Les défauts internes de la machine asynchrone*

Les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotoriques et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique, ...)

Dans le but d'une présentation synthétique, nous avons classé ces défauts en deux familles principales : les défauts mécaniques et les défauts électriques. Ces défauts sont donc rappelés brièvement dans l'organigramme de (figure I.8). L'étude des défauts des machines asynchrones à un double objectif [36] :

Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.

Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, a posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.



**Figure. I.8 :** Organigramme des défauts internes de la machine asynchrone triphasé à cage

### **I.4.2.1 Défauts statoriques :**

La principale source de défauts dans un moteur électrique provient des bobinages. [13]. Les effets d'usure comme les frottements ou le vieillissement des matériaux ont un effet sur

# **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

l'intégrité des fils et de leur isolant. Si cet isolant : t est trop endommagé, ces bobinages peuvent alors se mettre en court-circuit ou alors, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert.

## **I.4.2.1.1 Court-circuit dans une phase :**

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer [14]. Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue [15] sur une machine triphasée avec un onduleur à 3 bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important pouvant propager la faute. L'importance des courants de faute dépend directement du nombre de spires en court-circuit.

Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement suite à la panne de la machine.

## **I.4.2.1.2 Circuit ouvert sur une phase :**

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum le fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle).

## **I.4.2.1.3 Court-circuit entre deux phases :**

Un court-circuit entre deux phases est une faute grave qui peut avoir de lourdes conséquences sur une machine. La première est la perte de ces deux phases pour la production du couple. Dans une machine triphasée, cela implique l'arrêt de la machine devenue impossible à commander. La seconde est qu'un court-circuit entraîne des courants de défaut provoquant des échauffements pouvant engendrer.

# **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

Des détériorations supplémentaires. De même que pour le cas du court-circuit dans une phase, ces spires en court-circuit engendrent un couple résistant en s'opposant aux variations du flux d'excitation.

## **I.4.2.1.4 Court-circuit avec le bâti [16]**

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.

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.



Ouverture d'une phase



Court-circuit entre phases



Masse dans l'encoche



Dégradation causée par une surtension



Déséquilibre de l'alimentation



Damage dû à la surcharge

**Figure I.9 :** Différents défauts des machines asynchrones

## I.4.2.2 Défauts rotoriques :

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte.

### I.4.2.2.1 Ruptures de barres :

Cassure ou la rupture de barre est l'un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer 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. 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

# **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

de ladéfaillance. L'effet d'une cassure de barre croit rapidement avec le nombre de barres cassées [16].

## **I.4.2.2 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. 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 [16].

## **I.4.2.3 Excentricité dynamique et statique :**

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). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication [17]. Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

L'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage 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 mixte : associant les deux cas, statique et dynamique.

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromotrices, ce qui agit 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 conséquences 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.

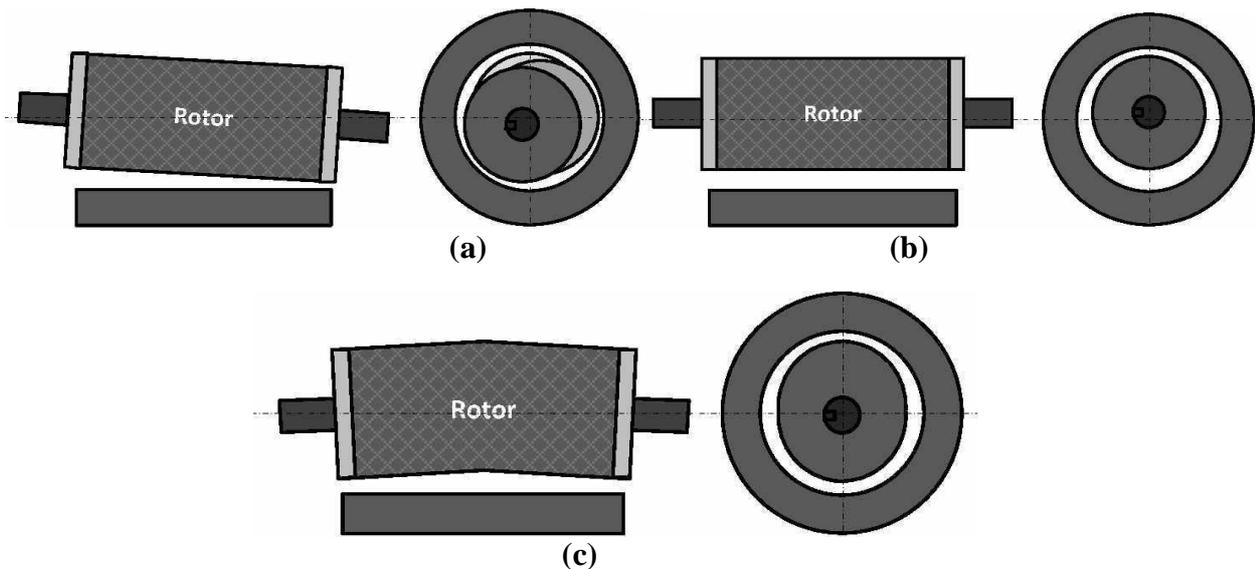


Figure I. 10 : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

## I.4.2.4 Défauts de roulement :

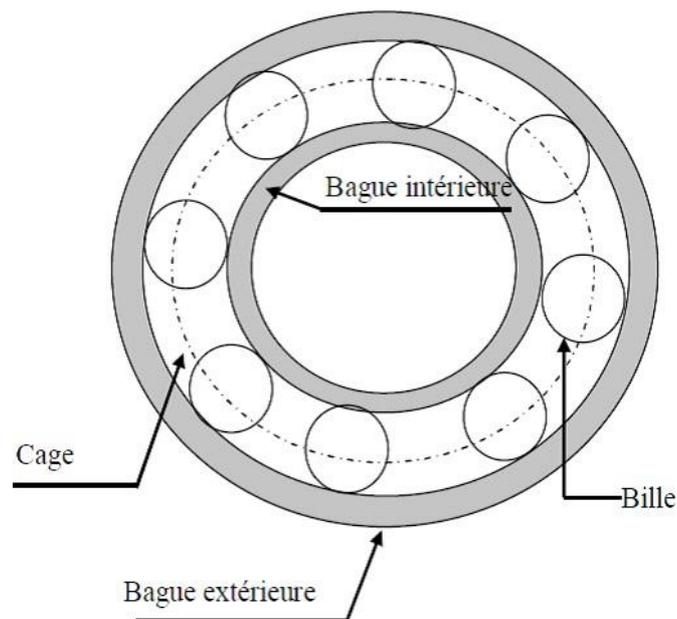
Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. La plupart des défauts Survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles :

1. L'usure due au vieillissement
2. La température de fonctionnement élevée
3. La perte de lubrification
4. L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
5. Le défaut de montage
6. Les courants d'arbres (Shaft Current)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

7. Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
8. L'ondulation de leur surface de roulement
9. L'attaque des billes
10. La corrosion due à l'eau
11. Défaut de graissage, problème dû à la température
12. Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [12]



**Figure I. 11:** roulement à bille

## **I.4.2.5 Défauts de déséquilibre de tension :**

Les effets de déséquilibre de tension sur les moteurs à induction se traduisent par une réduction du rendement, des oscillations mécaniques et des courants fortement déséquilibrés sur le stator. Ces courants élevés entraînent une augmentation de la température. Par conséquent, l'isolation des conducteurs électriques dans le stator est affectée et considérée comme la partie la plus

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

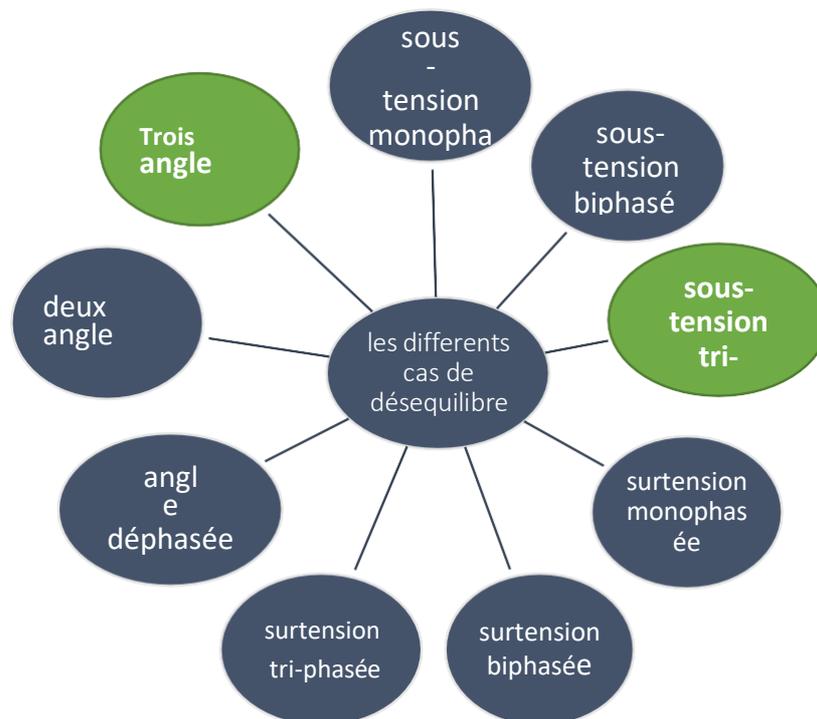
faible des moteurs à induction à cage d'écureuil. Cette contrainte thermique entraîne une réduction de la durée de vie du moteur à induction.

Le déséquilibre de tension génère une composante de séquence négative dans la tension, l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer est proportionnelle à l'amplitude de la séquence positive et / ou négative. Le sens de rotation du champ correspondant à la séquence négative est opposé à celui correspondant à la séquence positive. C'est pourquoi, dans le cas d'une tension non équilibrée, le champ magnétique résultant devient elliptique plutôt que circulaire.

Cette séquence à flux négatif produit plusieurs effets indésirables, tels qu'une augmentation des pertes de cuivre dans le stator et dans le rotor, ainsi que des pulsations de puissance et de couple.

Ces pulsations sont causées par un couple supplémentaire à double fréquence de la tension appliquée. Tous ces effets réduisent la durée de vie de la machine et des moteurs en bon état peuvent être hors service. [11]

La figure suivante résume les différents cas de déséquilibre [37] :



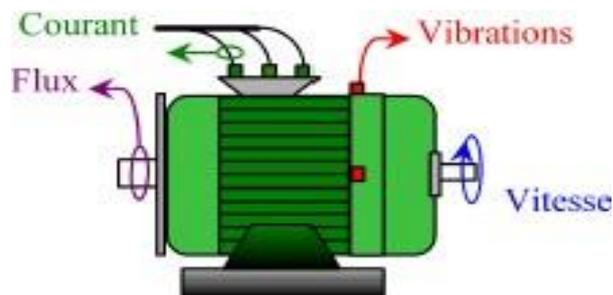
**Figure I.12 :** Les différents cas du déséquilibre de tension dans les machines asynchrones triphasées

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

## I.5 Différentes méthodes de diagnostic :

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts [23] [18]. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) (Figure I-13) [22].



**Figure I.13** : Les différents grandeurs de diagnostic dans une machine.

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques.

### I.5.1 Techniques mécaniques

Parmi ces techniques, on trouve :

#### I.5.1.1 diagnostique ar mesure de la température

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance.

Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant.

# **CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.[53]

## **I.5.1.2 Diagnostique par mesure des vibrations**

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques.

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine.

Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boudins.

Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre.

Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence .[53]

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine.

## **I.5.2 Diagnostics chimiques**

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seules les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [23].

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

## I.5.3 Techniques magnétiques et électriques :

### I.5.3.1 Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite

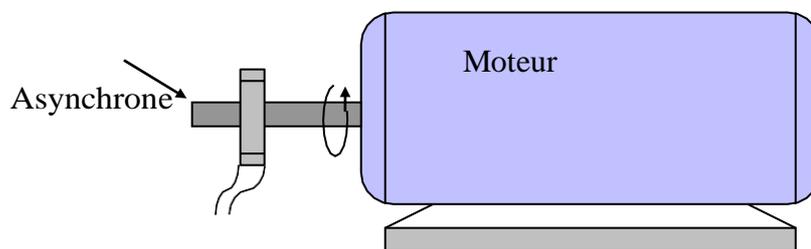
Le flux de fuite axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la machine (Figure I-14) et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall.

Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice ( $F_{em}$ ) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux.

Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante.



**Figure I.14** : Bobine exploratrice pour la Mesure du flux de fuite axial

### I.5.3.2 Diagnostique par l'analyse du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique.

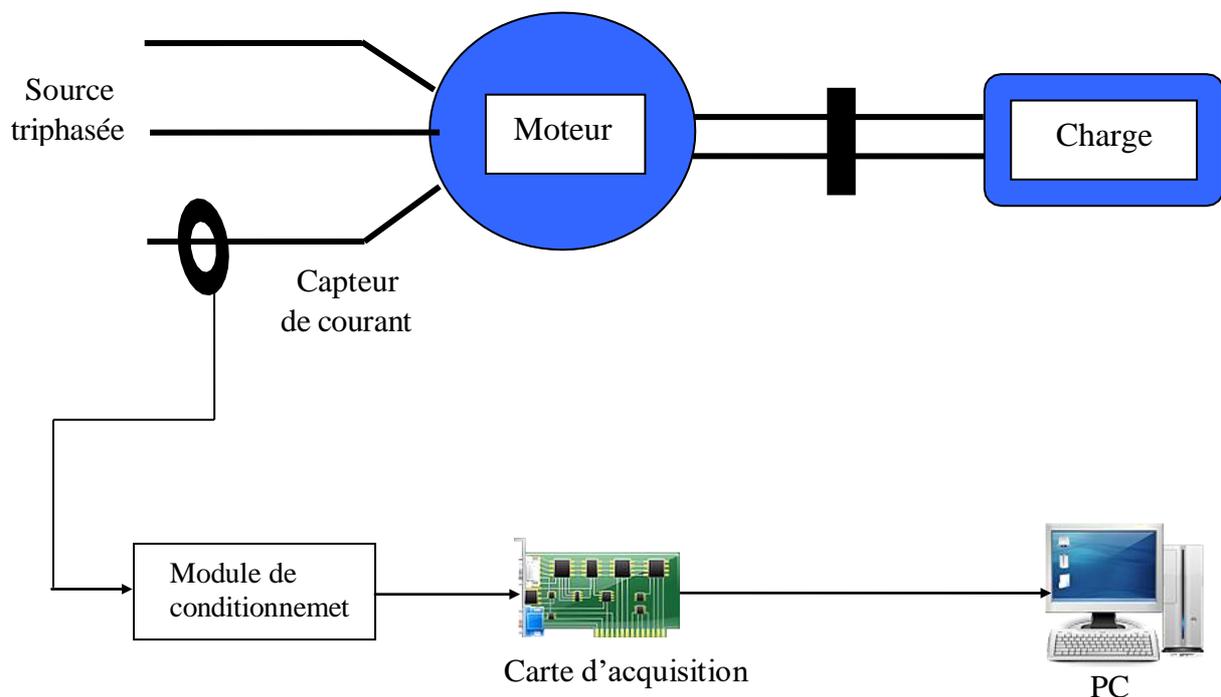
C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

[19] [20] [21]. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la Fmm .

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage.

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est  $(sf)$ , cette Fmm Produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant Fréquence  $(1 + 2s)f$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1 - 2s)f$ . (figure I-15).



**Figure I.15** : schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison qu'elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance.

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation, bien que les machines sont des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostics sont de plus en plus

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé .

## I.5.4 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

### I.5.4.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal  $X(t)$  à temps continu. Si  $X$  est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence  $f$  est la suivante [42] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (I.1)$$

Son inverse est donnée par:

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

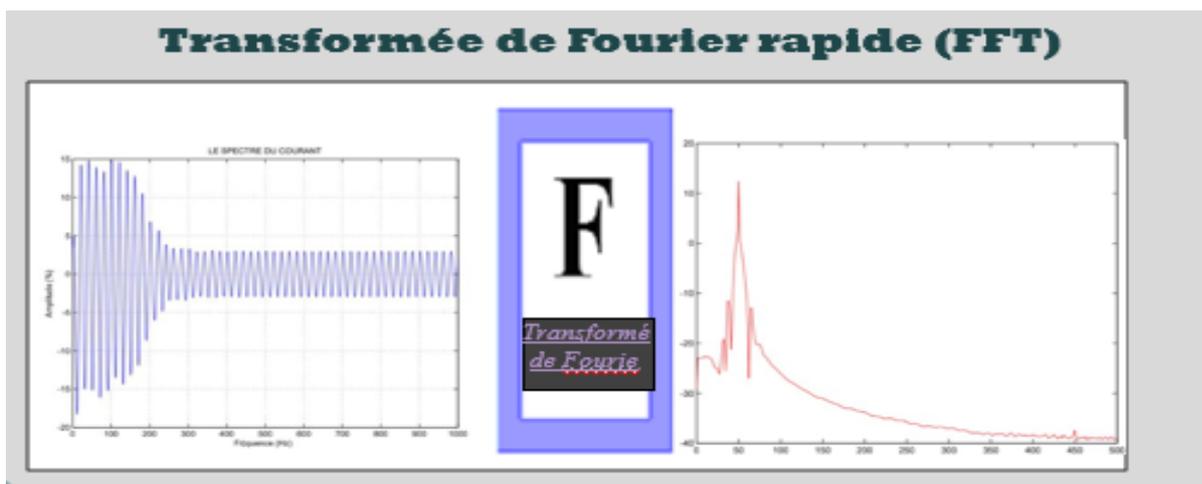


Figure 1.16: Représentation temporelle vers fréquentielle

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

rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de  $\frac{N}{\log_2(N)}$

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

---

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux  $e^{2\pi f_k T}$

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [43], [44]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transform).

## **CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES**

---

### **CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES**

#### **II.1 INTRODUCTION :**

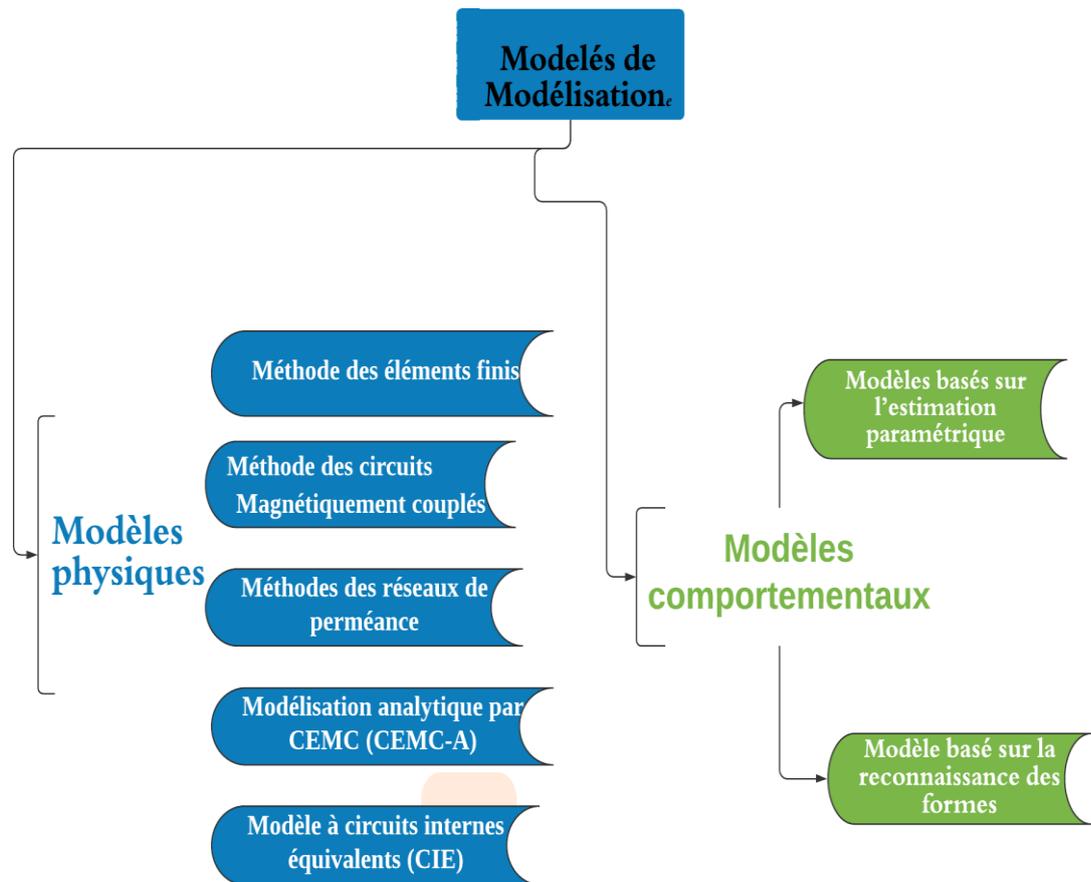
Il y a quelques années, les programmes de simulation faisaient intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court . A ce jour, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons nous passer de ces transformations, ce qui permet, dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit.

Ce chapitre présente un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil dont la particularité est de n'introduire aucune transformation. Dans un premier temps nous discutons des méthodes couramment utilisées pour modéliser ce type de machine électrique. Nous introduisons ensuite les outils nécessaires à la résolution du modèle choisi. Nous montrerons que ce modèle est composé essentiellement de résistances et d'inductances, ce qui nous amènera à présenter les méthodologies existantes pour déterminer la valeur de ces paramètres. Des résultats de simulation, dans le cas d'un fonctionnement sain et défaillant de la machine, seront présentés ainsi qu'une analyse harmonique des grandeurs temporelles telles que le couple électromagnétique ou le courant statorique.

#### **II.2 MÉTHODE DE MODÉLISATION DE MAS :**

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence des défauts peuvent être groupés en modèles physiques et en modèles comportementaux :

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES



**Fig.II.1.** Les différentes méthodes de modélisation de la MAS  
*Modèles physiques*

Se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [39].

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

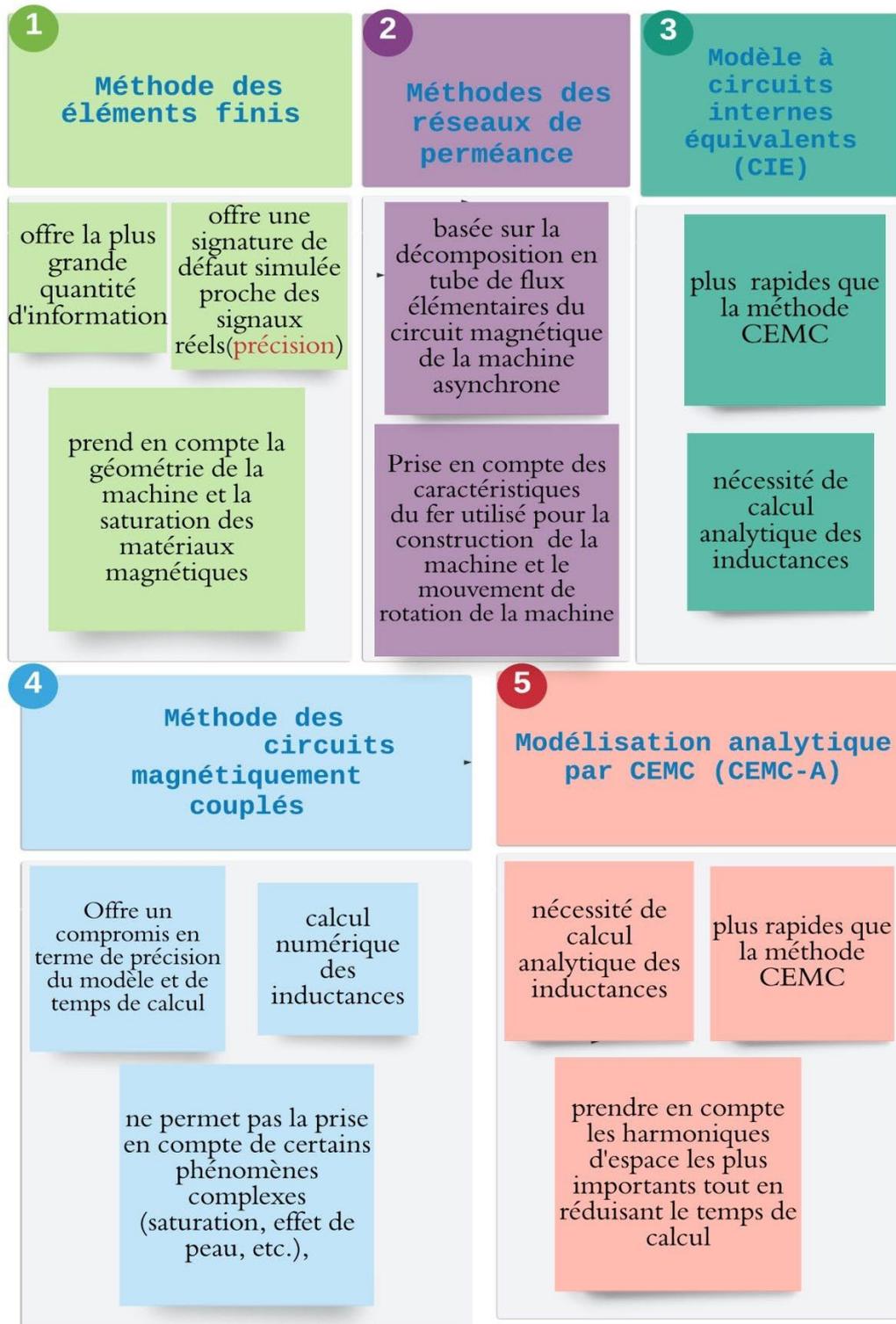


Fig. II.2: Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.2.1 Méthode des éléments finis (MÉF)

La méthode des éléments finis est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées. La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème. L'utilisation de la méthode de calcul par éléments finis prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques [40].

#### II.2.1.1 DÉFINITION :

La méthode à éléments finis MEF est une approche qui nécessite un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de faibles dimensions pour permettre de considérer que le matériau magnétique est linéaire sur les surfaces correspondantes.

L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée. De nombreux logiciels ont été développés à cet effet, tel que le Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but de ces logiciels est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques afin d'optimiser leurs dimensionnements [24].

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations

constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \partial B / \partial t \quad (\text{II.2})$$

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

---

### II.2.1.2 Modèle employé :

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé [26] :

#### II.2.1.2.1 Le mode magnétique transitoire

Est le plus complet, il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps.

#### II.2.1.2.2 Mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps.

Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

#### II.2.1.2.3 Mode magnétodynamique :

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps.

Le terme  $\frac{B}{\partial t}$  n'est pas nul

Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine

### II.2.1.3 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation.

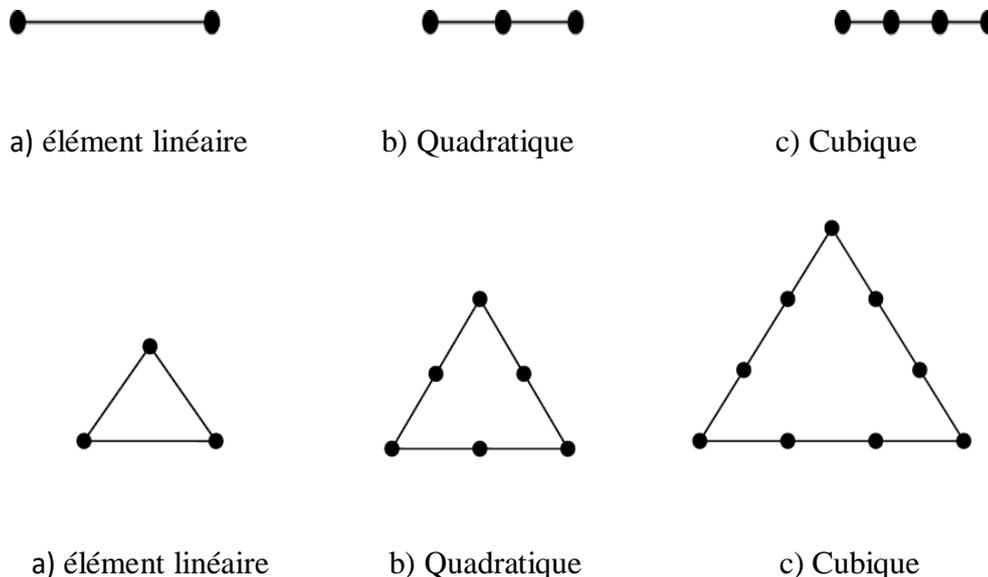
## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

---

Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques [27] .

### II.2.1.4 Types d'éléments finis

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.



**Figure II.3 :** Eléments classiques en une et deux dimensions.

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage [28].

### II.3 Présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D®

Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Électrostatique et Matériaux Diélectrique et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits [25].

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

---

Flux2D<sup>®</sup> est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage [25].

Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

➤ **Module Construction**

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (geometry & physics), de choisir et de construire une banque de matériaux (Materials database) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (Circuit).

➤ **Module Solving Process**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (Direct) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

➤ **Module Analysis**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

### **II.3.1 Etapes de création d'un modèle sain de la MAS à cage d'écureuil avec Flux 2D**

Pour notre modèle on veut créer une MAS à cage d'écureuil dans un état sain, pour cela on doit passer par ces étapes :

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.3.1.1 Construction géométrique

La première étape pour construire une MAS, est de créer une entité stator qui est fixe et une entité rotor mobile. Chaque pièce créée, doit être affectée vers l'une de ces deux entités ou la laisser aïre ou vide.

Le stator contient des encoches où sont enroulés les 3 conducteurs bobinés en cuivre.

### II.3.1.2 Génération du maillage

Pour simuler la MAS, il faut impérativement mailler le modèle créé.

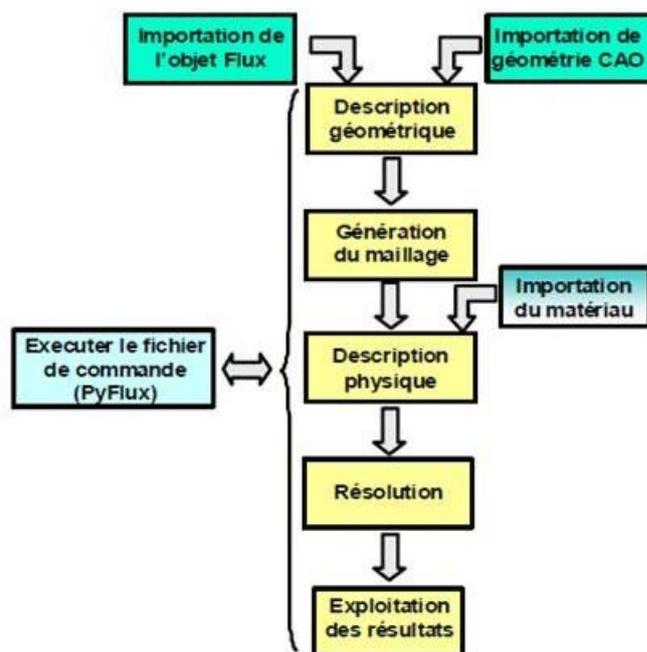
### II.3.1.3 Résolution

Après la vérification du maillage et la vérification physique du modèle créé, on définit les paramètres de simulation que ce soit : le temps de résolution de 1 second avec un pas de  $1.10^{-3}$ .

### II.3.1.4 Exploitation des résultats

La dernière étape est l'exploitation des résultats obtenus du modèle sain de la MAS, deux types de résultats : résultats graphiques où on trouve les propriétés magnétiques et physiques de la machine comme la distribution du champ magnétique et la vitesse de rotation, et aussi les résultats numériques qui donnent des chiffres exactes sur les grandeurs mises à calculer.

Figure II.4 Enchaînement des étapes dans Flux 2D®



## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.4 Application et simulation de la MAS

On obtient une machine asynchrone à partir de rembobinage de la machine asynchrone quia les caractéristiques suivantes :

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Stator	Nombre de phases	3	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	120	mm
	Diamètre externe	212	mm
Rotor	Diamètre externe	119	mm
	Diamètre interne	40	mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.5	mm
	Nombre de barres	32	

Tableau II.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone

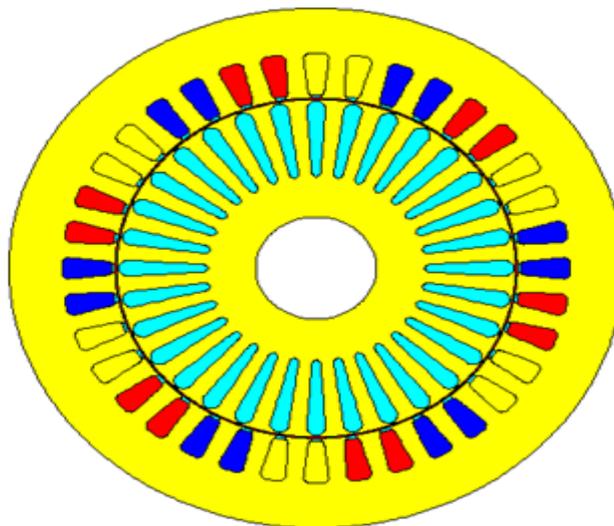


Figure II.5 : La géométrie de la machine asynchrone

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées (figure II.6)

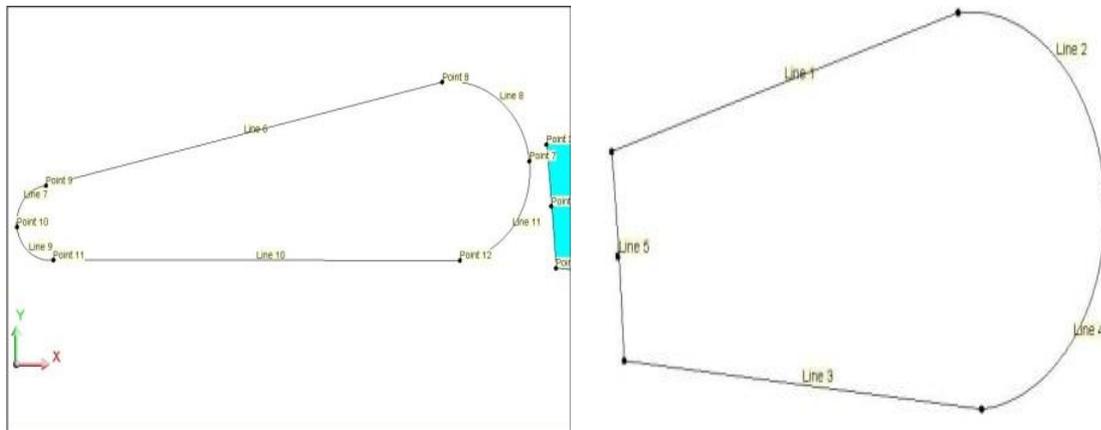


Figure II.6 : Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique

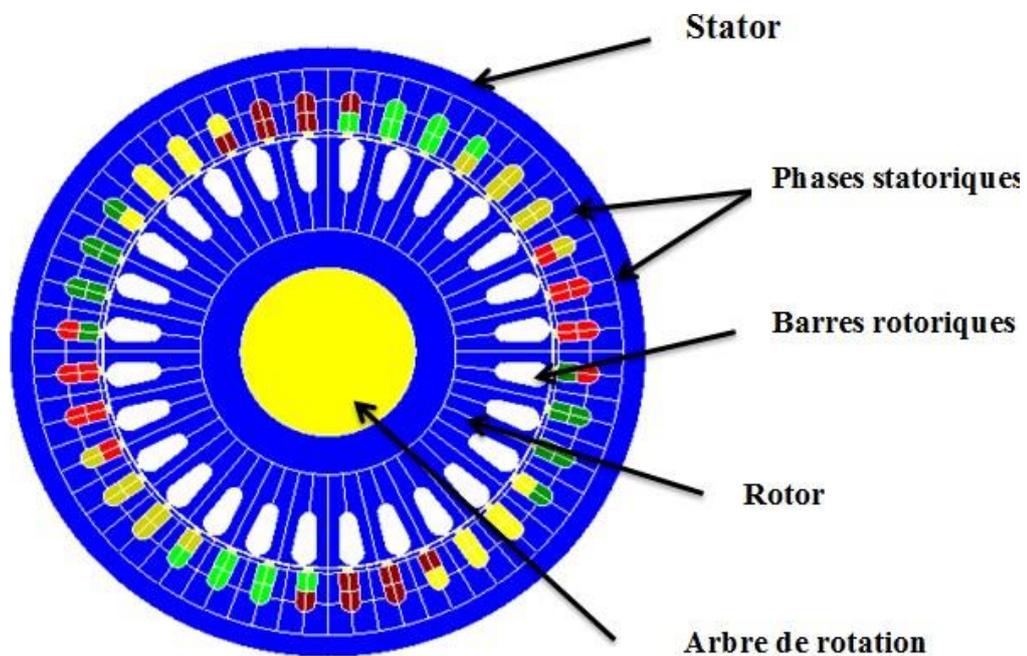
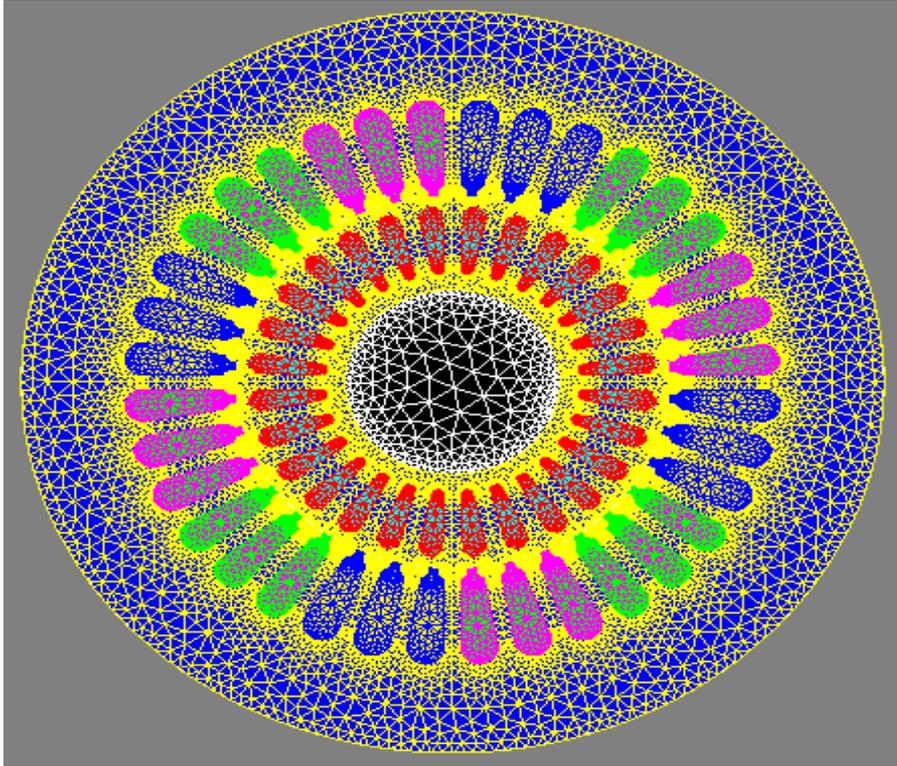


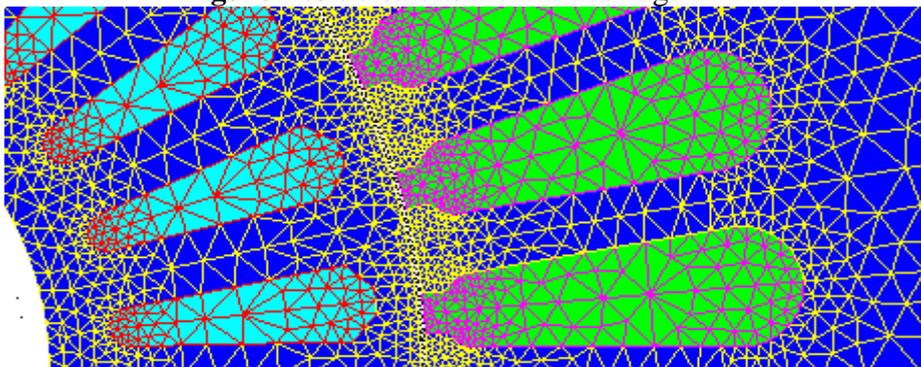
Figure II.7 : Affectation des régions superficiques

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

---



**Figure II.8** : discrétisation de maillage



**Figure II.9** : Répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

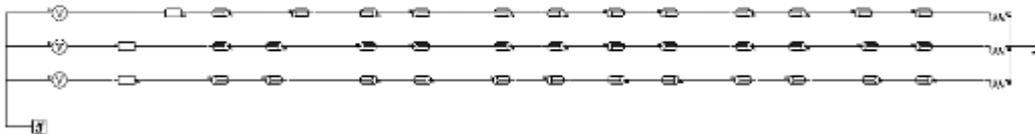
## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

---

### II.5 Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit).

Le circuit électrique, (Figure II.10), représentant : les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3), Les bobinages statoriques (B1, B2, B3, B4, B5 B36), les Inductances, (L1, L2, L3), les résistances (RA1, RA1, RA1).



**Figure II.10** : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotoriques

### II.6 Résultats de simulation par la magnétodynamique

#### II.6.1 Caractéristique de simulation en magnétodynamique

Dans ce mode de fonctionnement, il faut déterminer les valeurs de la fréquence d'alimentation et du glissement. On utilisera le couplage avec les équations de circuit qui permettent de simuler les courts-circuits de la cage.

On rappelle les avantages et les inconvénients de la magnétodynamique [48] :

#### a) Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive
- la prise en compte des courants induits.

#### b) Inconvénients :

- utilisation possible uniquement pour le régime permanent.

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.
- Le mouvement du rotor n'est pas «physiquement» prise en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte.

Les simulations magnéto-harmoniques de Flux2D® de la machine asynchrone double étoile sont effectuées pour des valeurs constantes de glissement (valeurs constantes de vitesse rotoriques).

Les résultats des simulations magnétodynamiques dépendent de la position relative de rotor-stator, prise en compte par la simulation, « la position initiale du rotor ». Ainsi nous avons déterminé la position relative de rotor-stator pour laquelle le couple électromagnétique  $e$  est égal à la valeur moyenne. "La position initiale" du rotor représente des données d'entrée pour le processeur de SOLVER\_2D de Flux2D®.

### II.6.2 Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure II.11) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure II.12)

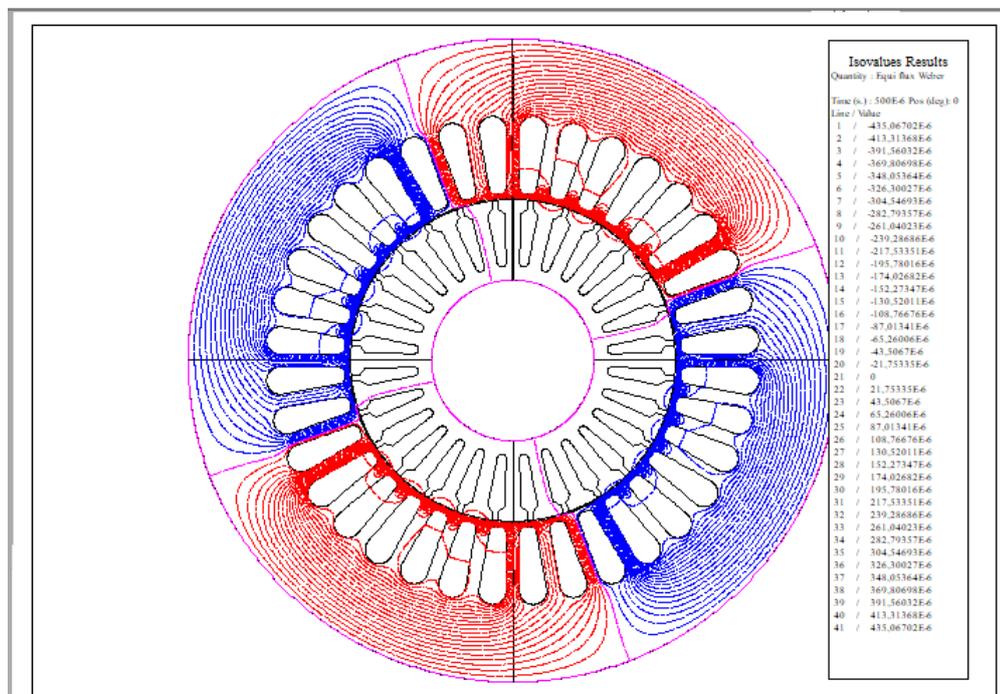
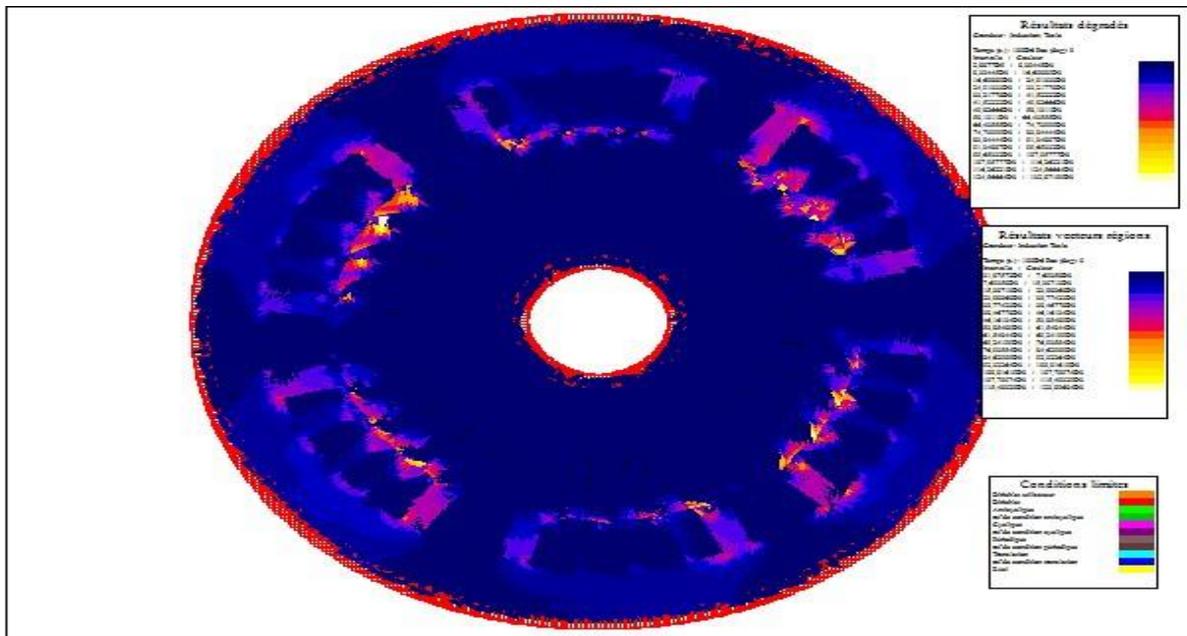


Figure II.11 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES



**Figure II.12 :** Induction magnétique pour le fonctionnement nominal

Nous remarquons bien la présence deux paire de pôles. est La figure II.11 montre la répartition des lignes équiflux dans le circuit magnétique, avec la présence de symétries par rapport aux axes inter polaires. Les lignes de flux entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor La répartition de l'induction dans la figure II.11 est, elle aussi, quasi-symétrique.

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.7 FONCTIONNEMENT SAIN DE LA MAS :

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine saine, a donné les résultats suivants :

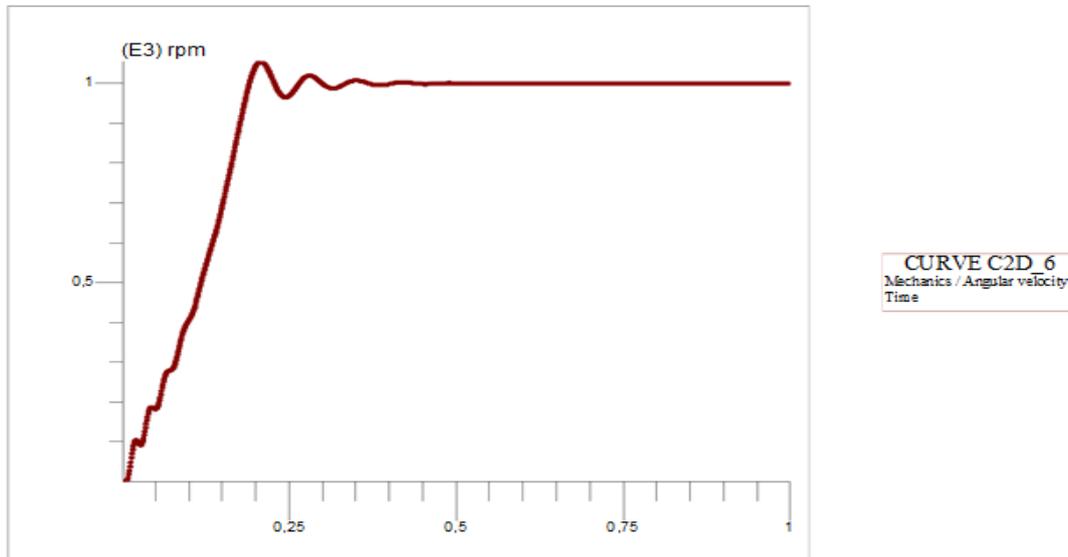


Figure II.13 : Vitesse de rotation

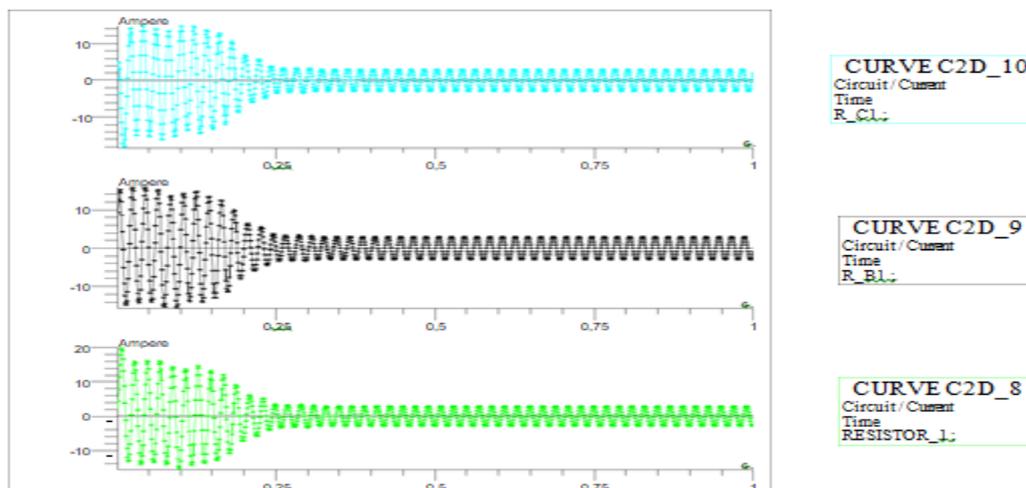


Figure II.14 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

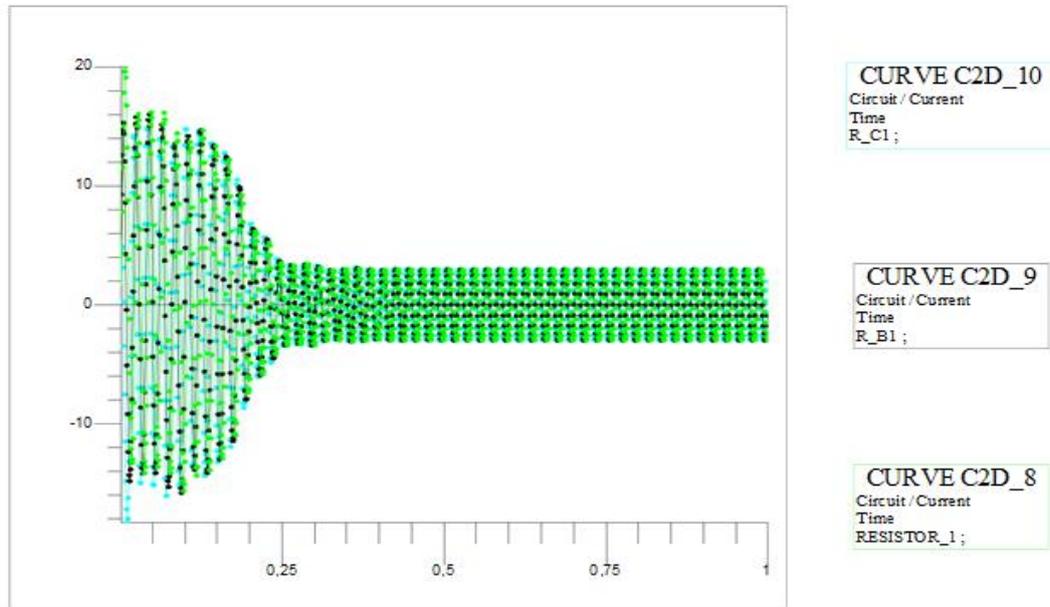


Figure II.15 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ;R-1 ,R-2, R-3

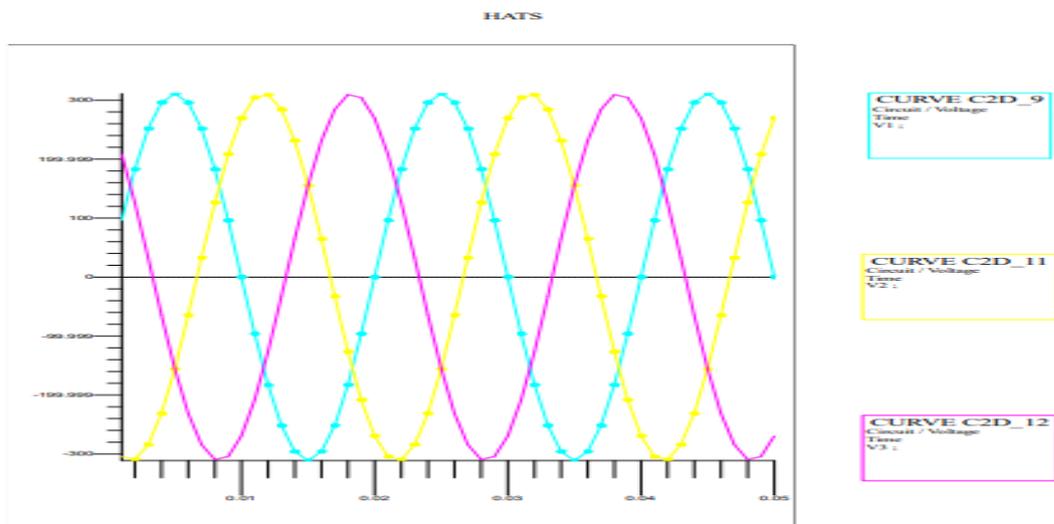
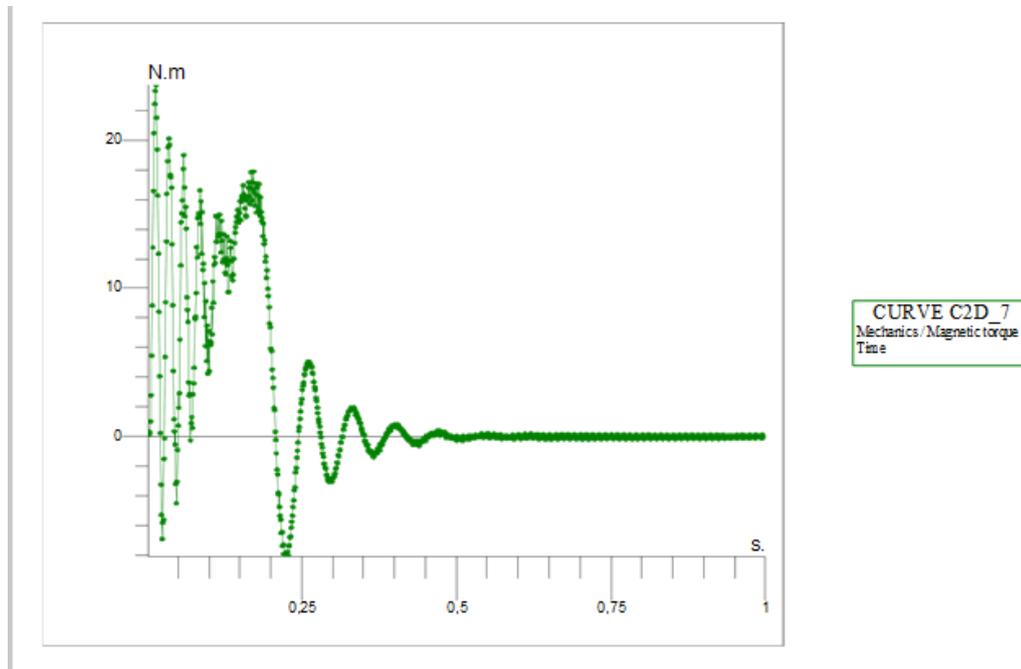


Figure II.16 : Zoom des Courants statorique superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES



**Figure II.17** : Couple électromagnétique

### II.7.1 Interprétation

Les figures représentent les résultats de simulation de la machine asynchrone

Les courants résultants sont des courants sinusoïdaux, Nous constatons à partir de la figure II.14 présentant l'évolution des courants statoriques en absence de défauts statoriques que le moteur subit un allongement de régime transitoire pour les courants ce dernier durer presque (0.25 sec) (Après un fort courant de démarrage) avant que le moteur entre dans le régime stationnaire (permanent).

Même pour la vitesse et le couple, dans le régime permanent La vitesse atteint presque la vitesse de synchronisme (1500 tr/m), dans le régime transitoire le couple atteint une valeur maximale avant de se stabiliser à une valeur en régime permanent

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8 Fonctionnement en présence de défaut (déséquilibre)

Dans le cas de la présence de défauts dans la machine asynchrone on a effectué une modification sur le circuit, ce ci par l'ajout des Switch (S1, S2, S3, S4) au niveau des lignes 2 et 3. Afin de changer les tensions et le déphasage à certain instant (0.7s), à condition : Lorsque les Switch S2 et S3 sont fermés automatiquement les Switch S1 et S4 sont ouverts.

Les cas présentés :

- déséquilibre de tension 5%.
- déséquilibre de tension 10%.
- déséquilibre de tension une phase 5% et l'autre 10%.
- déséquilibre de tension 10% + déséquilibre de déphasage.

Circuit :

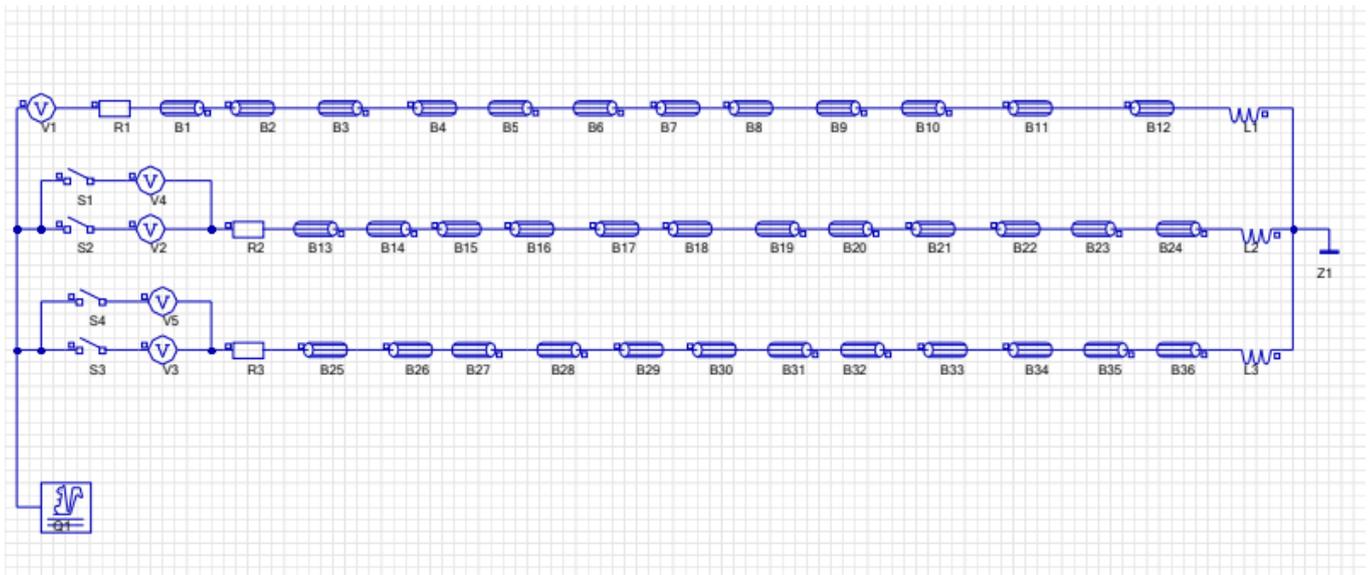


Figure II .18 : Circuit équivalent en présence de défaut

# CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

## II.8.1 Présence de défaut 5%

### II.8.1.1 Résultat graphique :

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure II.19) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure II.20)

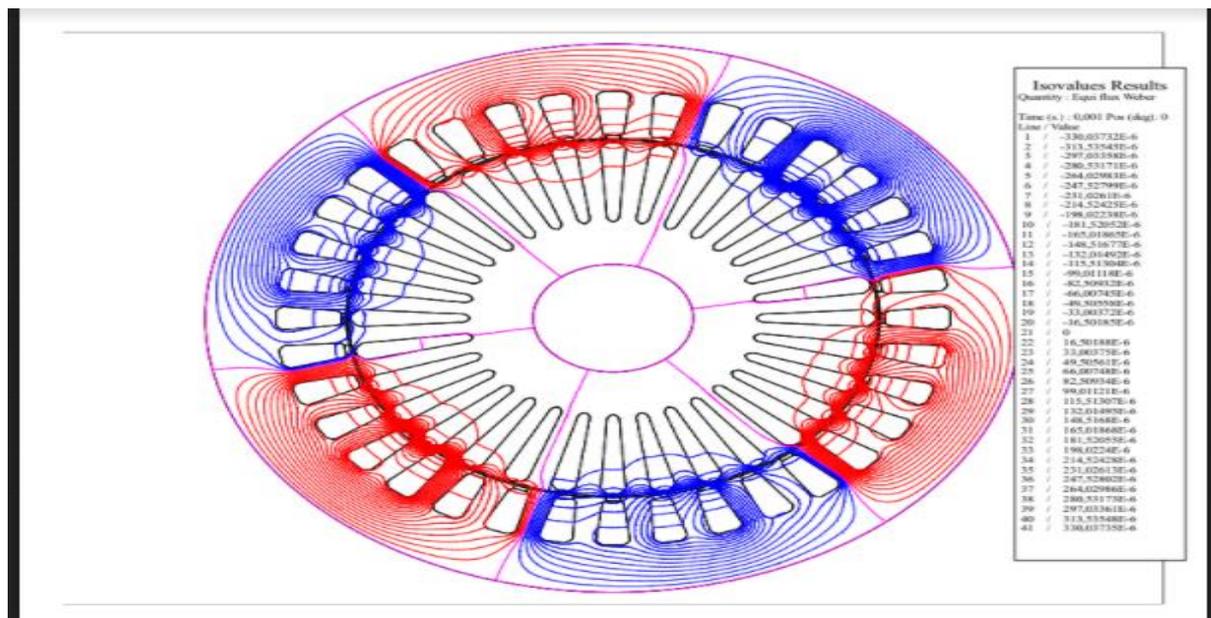


Figure II.19 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement déséquilibré 5%

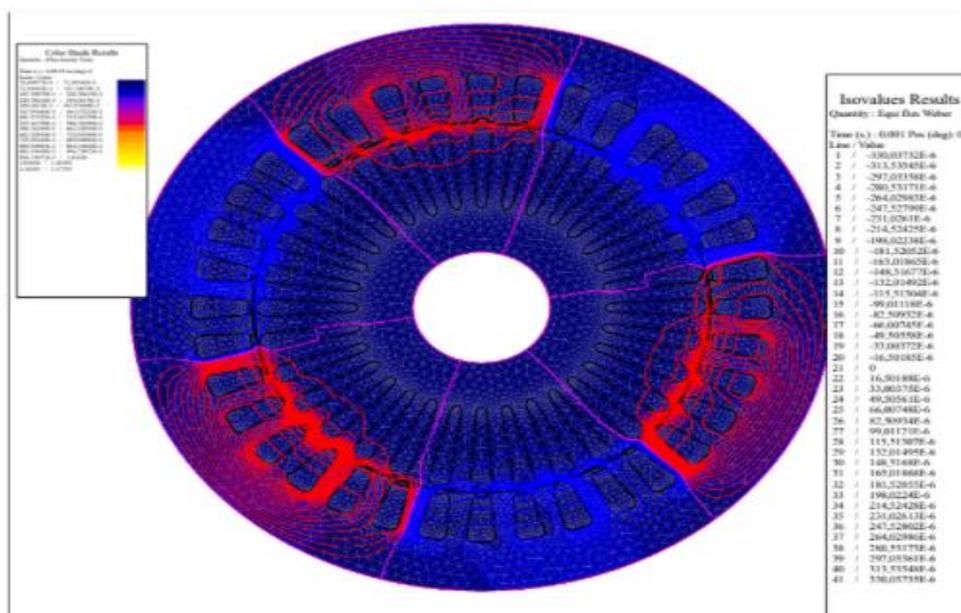


Figure II.20 : Induction magnétique pour le fonctionnement déséquilibré 5%

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.1.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 5%)

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine déséquilibré, a donné les résultats suivants

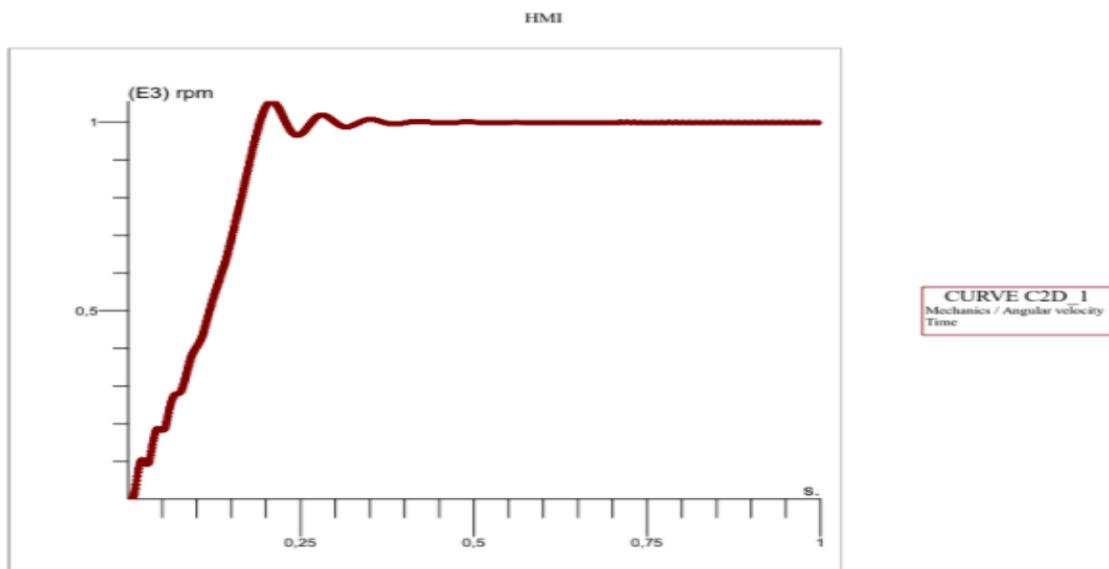


Figure II.21 : Vitesse de rotation avec défaut de 5%

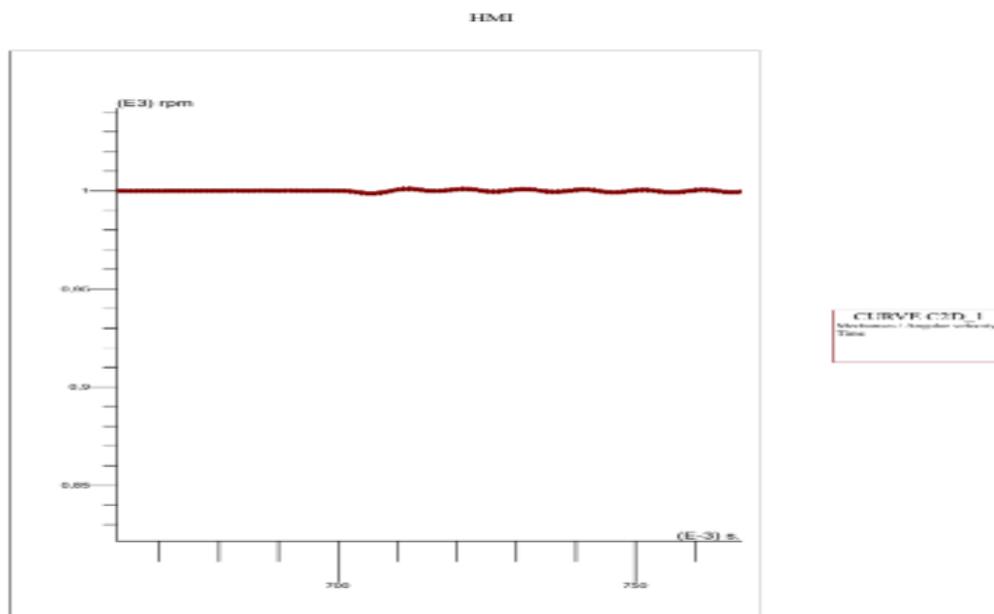


Figure II.22 : Zoom sur le défaut de la Vitesse de rotation

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

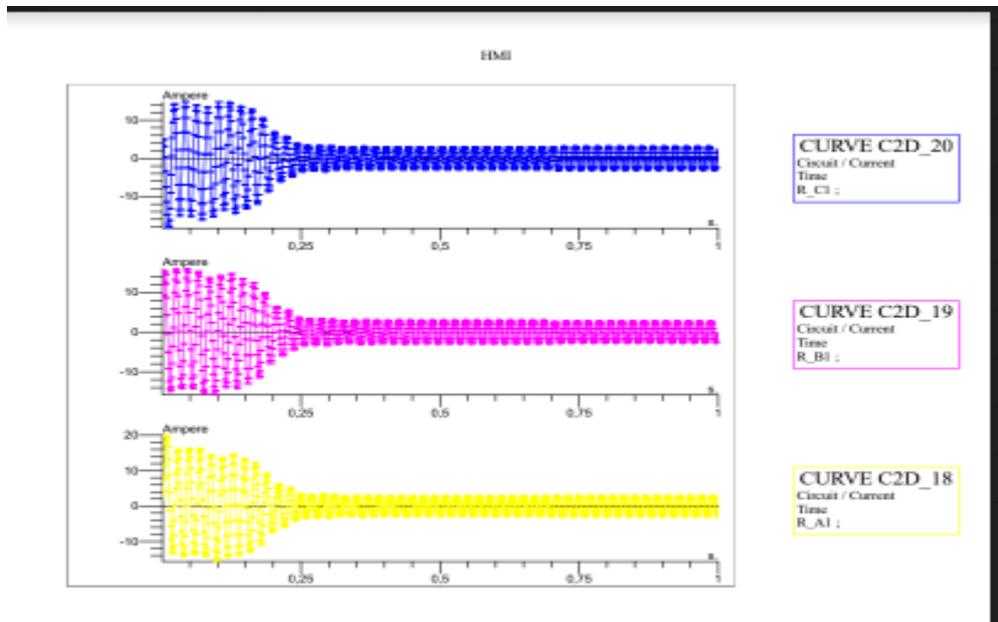


Figure II.23 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

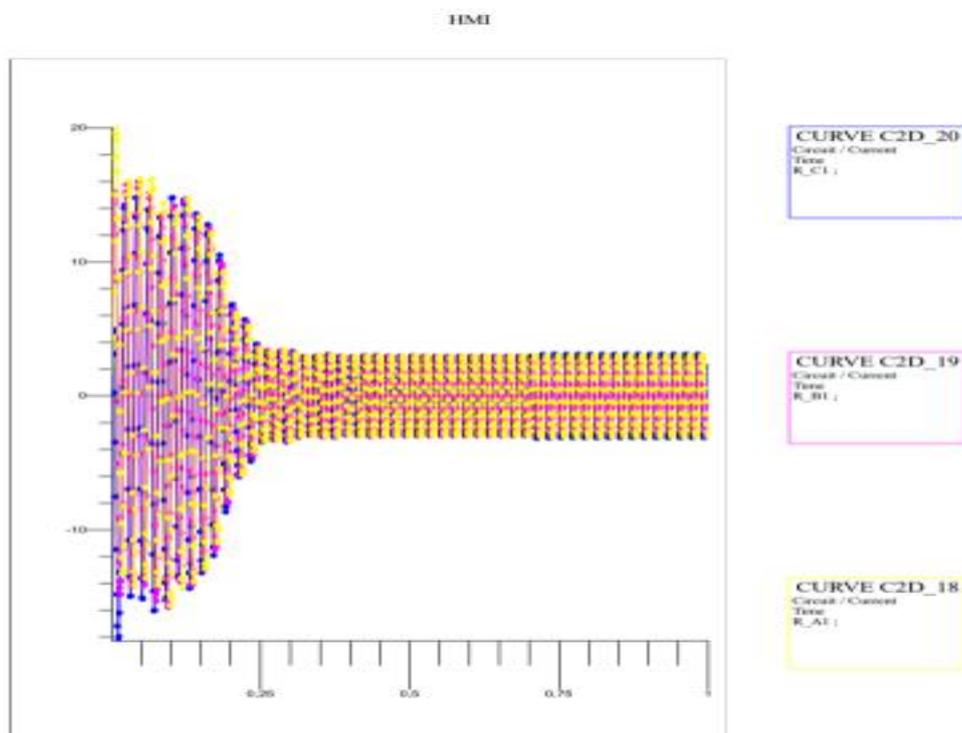
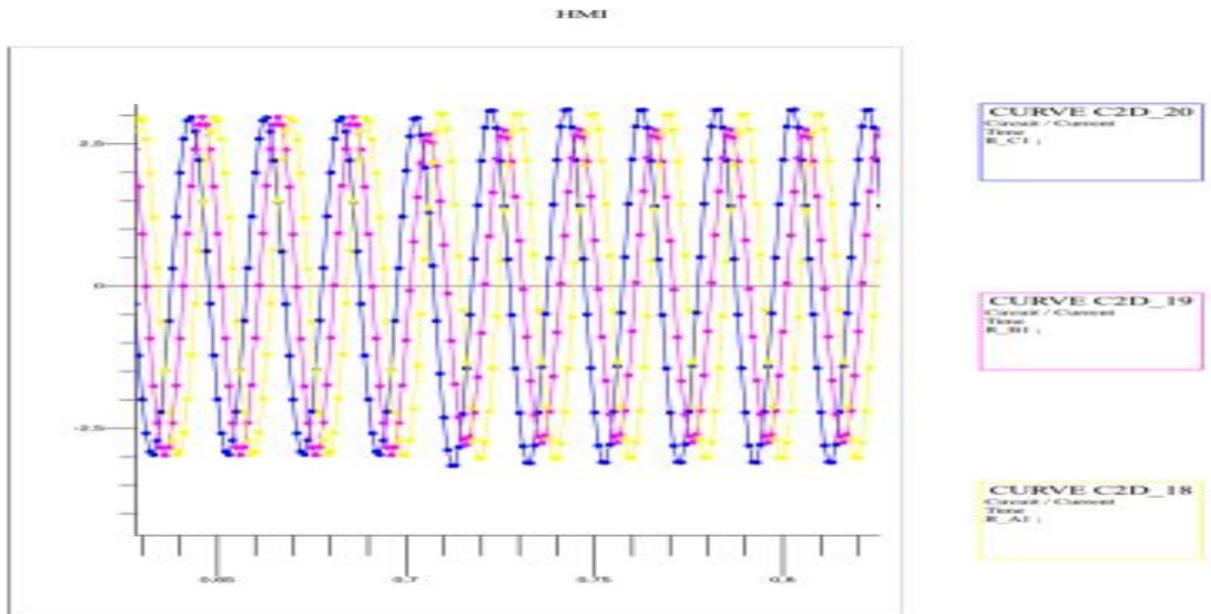
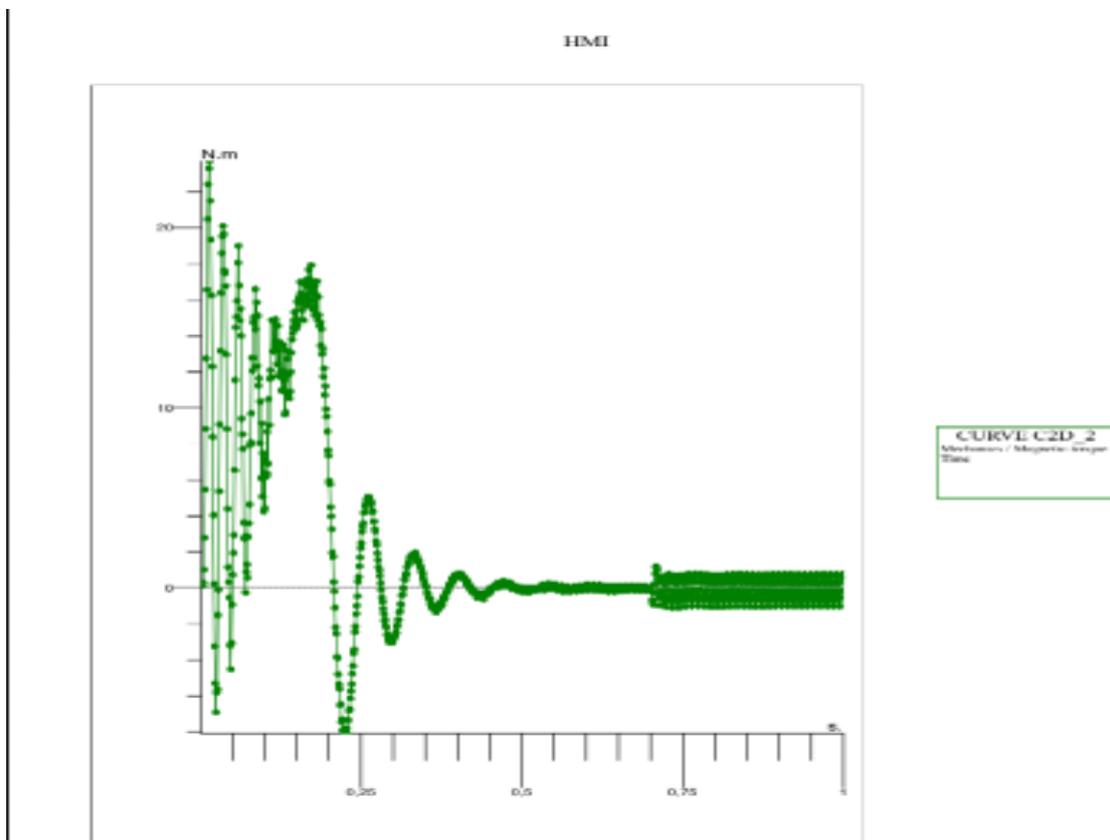


Figure II.24 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES



**Figure II.25 :** Zoom des Courants statoriques superposés au niveau des résistances R-C1 ,R-B1, R-A1



**Figure II.26 :** Couple électromagnétique déséquilibré

# CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

## II.8.2 Présence de défaut 10%

### II.8.2.1 Résultat graphique :

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure II.27) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure II.28)

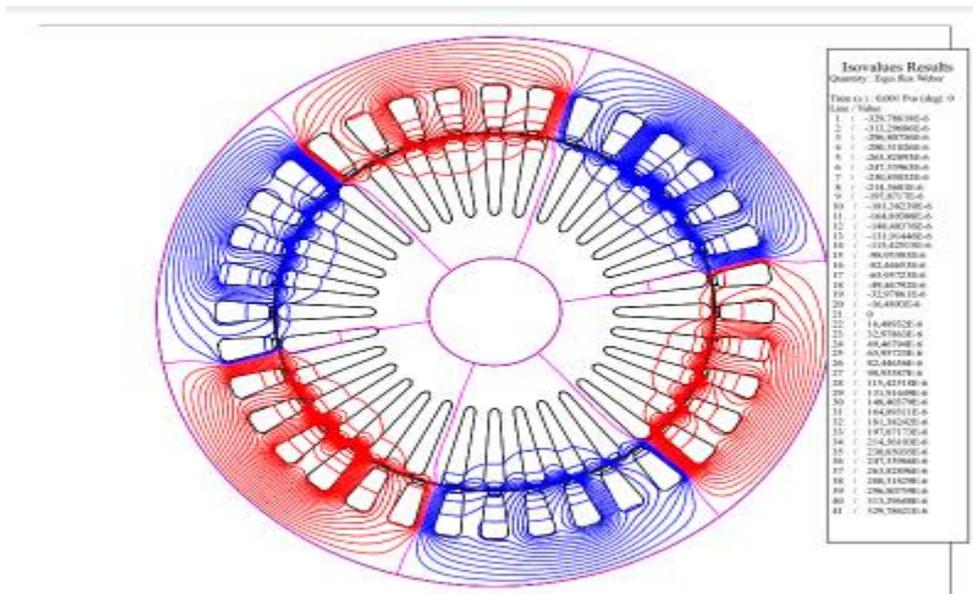


Figure II.27 : Répartition des lignes du champ magnétique déséquilibré

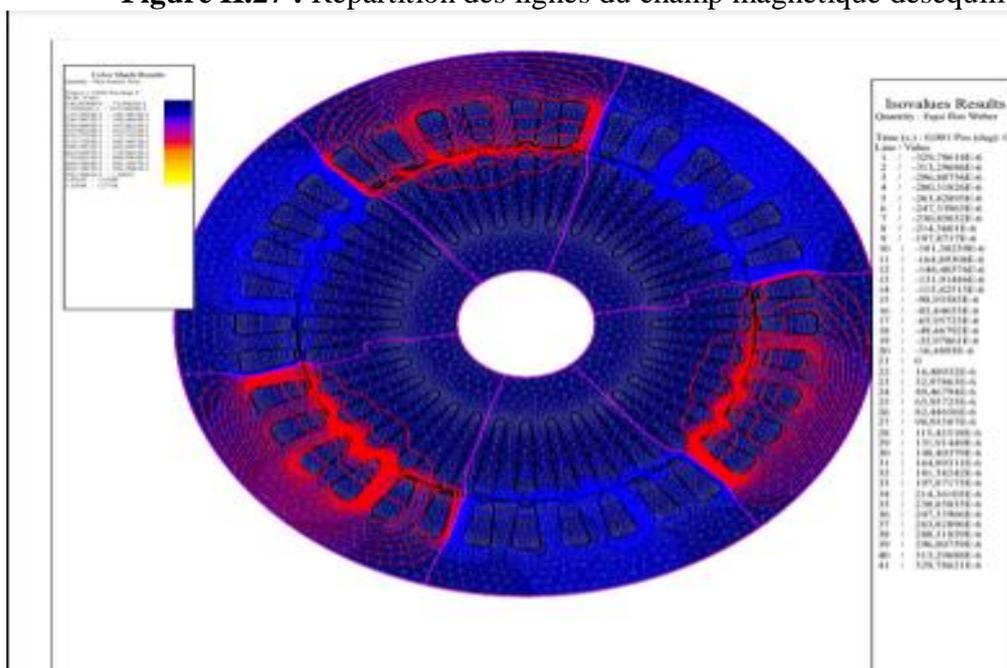


Figure II.28 : Induction magnétique déséquilibré

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.2.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10%)

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine déséquilibré, a donné les résultats suivants :

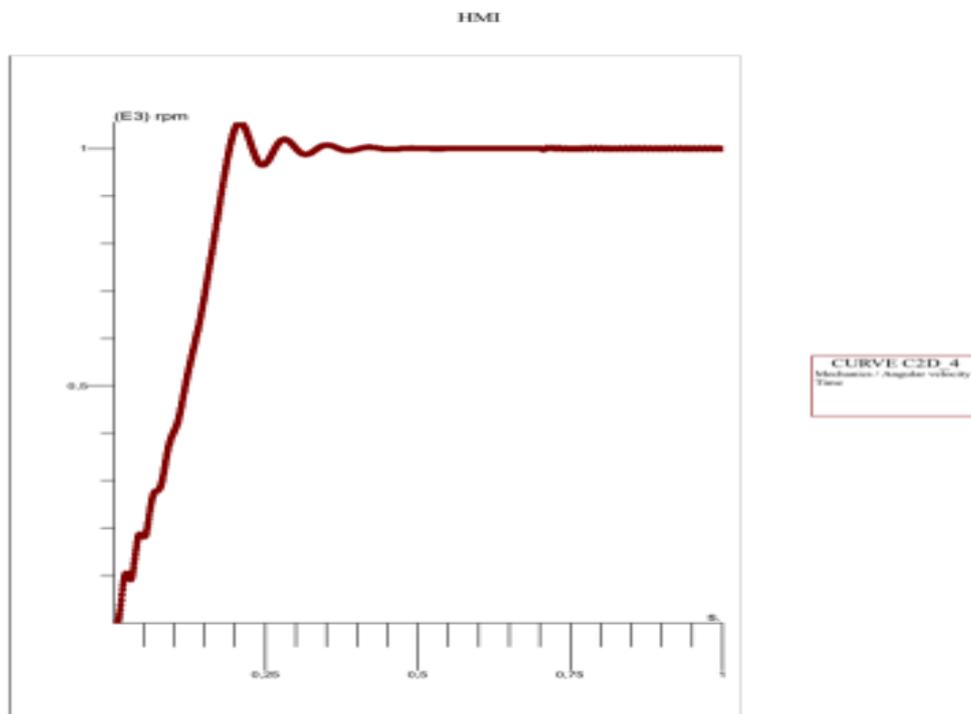


Figure II.29 : Vitesse de rotation déséquilibré

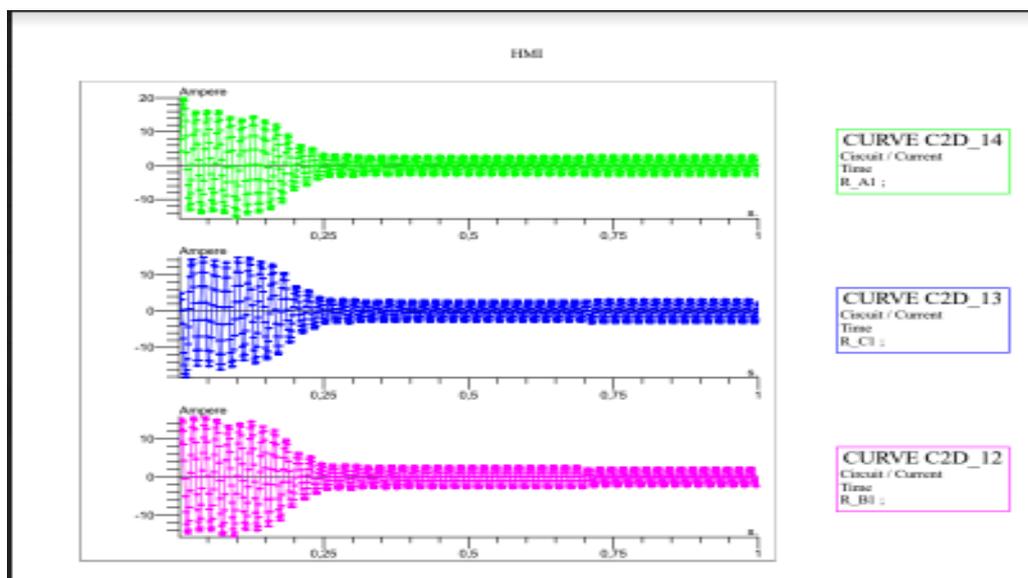


Figure II.30 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

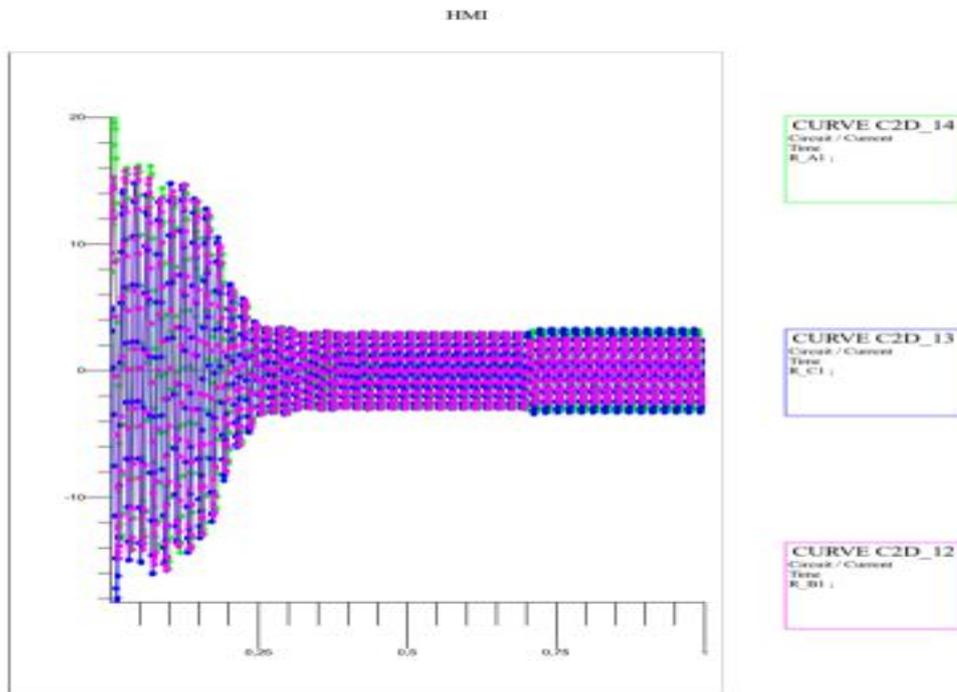


Figure II.31 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ;R-1 ,R-2, R-3

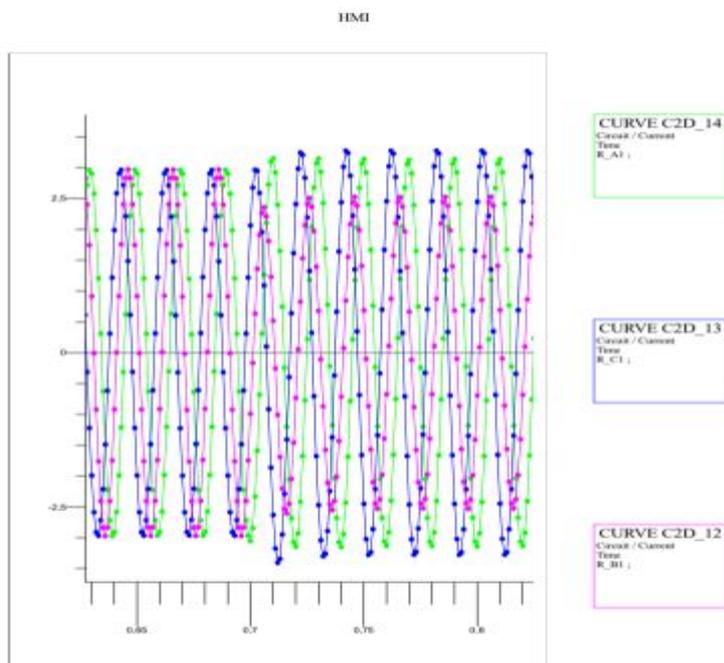
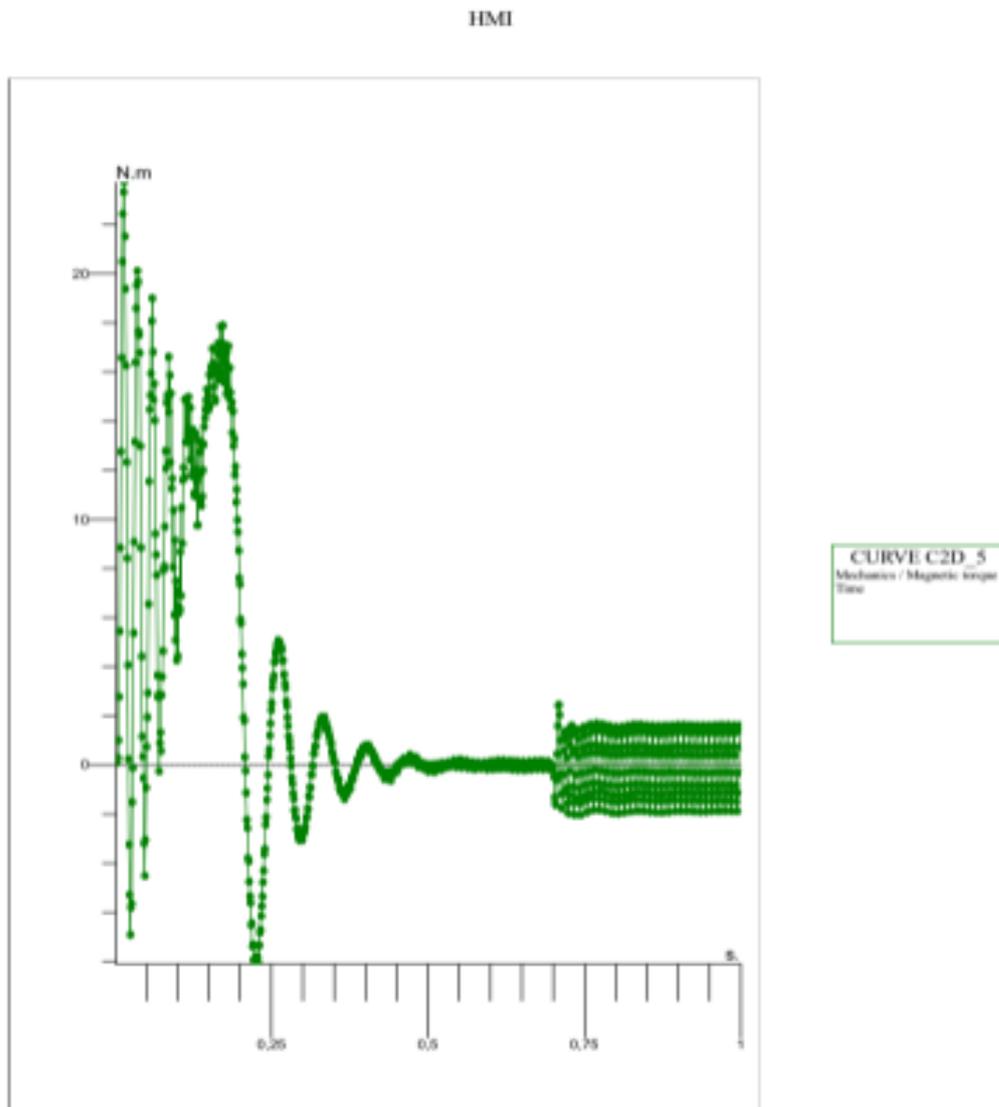


Figure II.32: Zoom des Courants statoriques superposé au niveau des résistances R-1, R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

---



**Figure II.33** : Couple électromagnétique déséquilibré

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.3 Présence de défaut 10% sur la 2ème phase et 5% sur la 3ème phase :

#### II.8.3.1 Résultat graphique :

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure II.34) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure II.35)

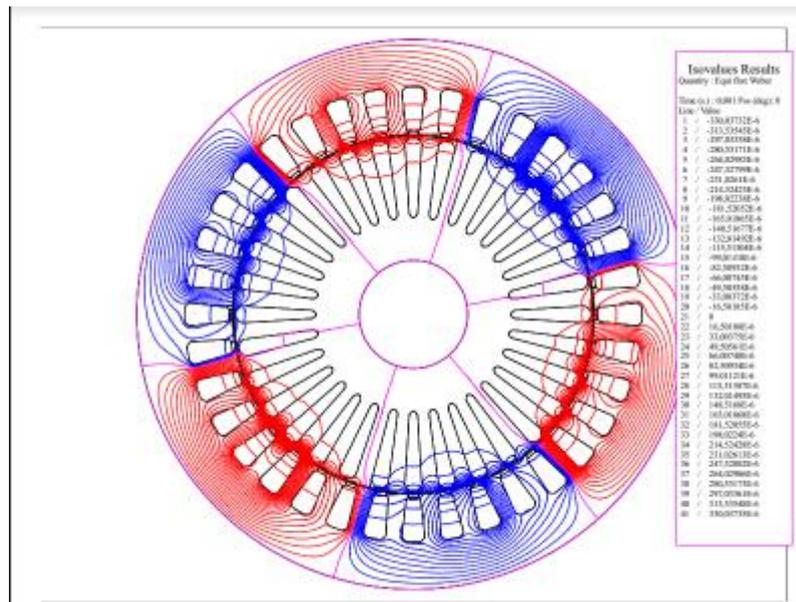


Figure II.34 : Répartition des lignes du champ magnétique déséquilibré

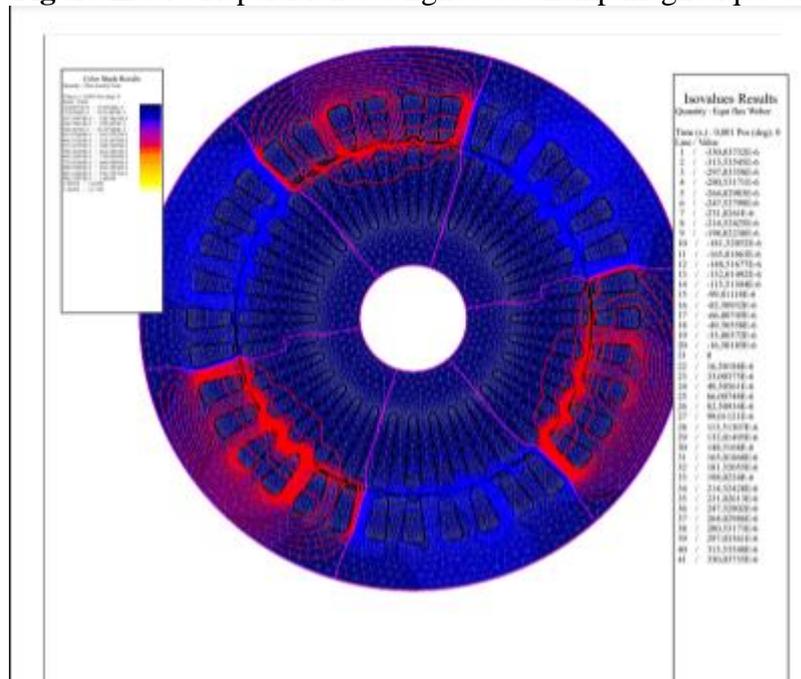


Figure II.35 : Induction magnétique déséquilibré

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

---

### II.8.3.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10% / 5%)

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine déséquilibré, a donné les résultats suivants :

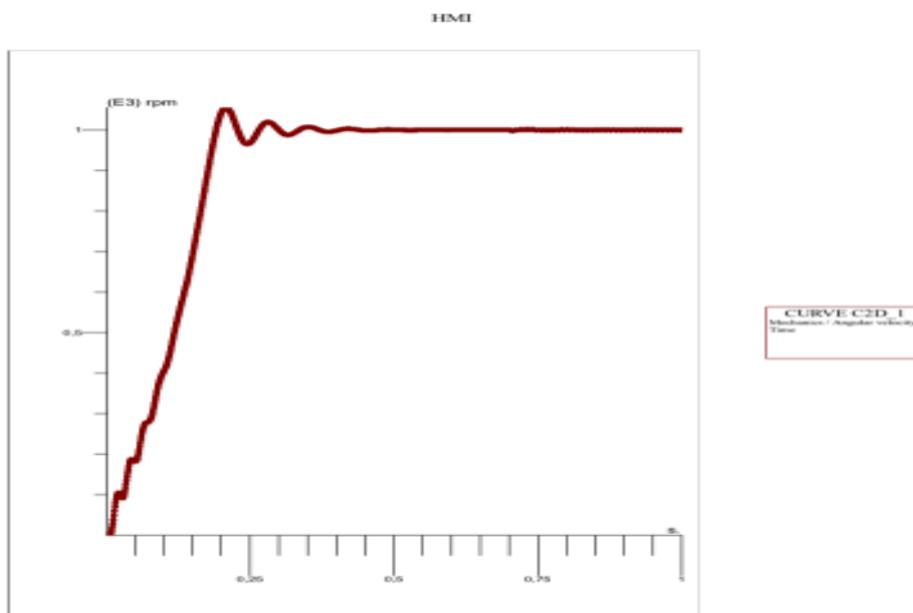


Figure II.36 : Vitesse de rotation

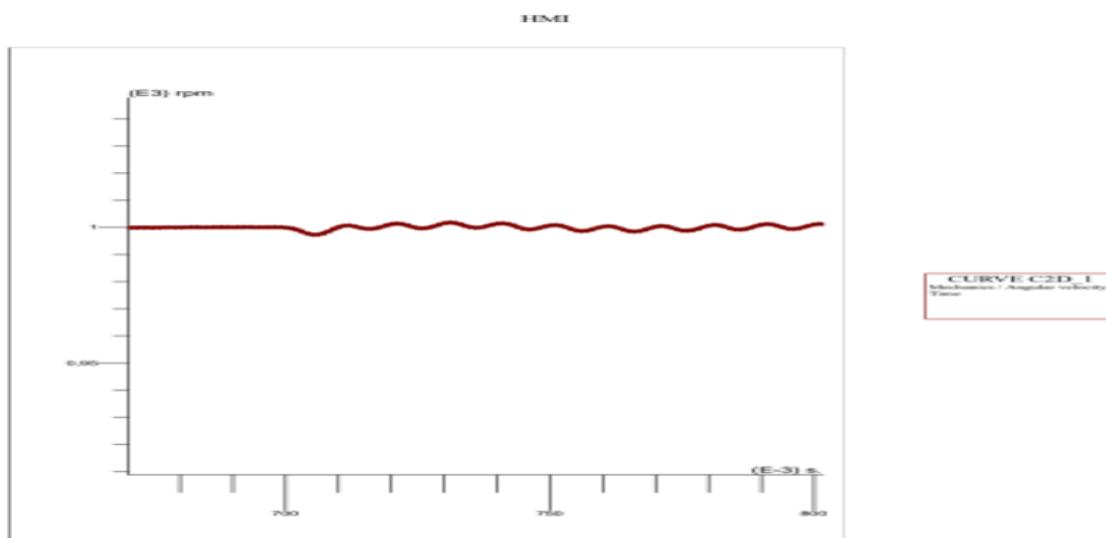


Figure II.37 : Zoom de Vitesse de rotation déséquilibré 10% +5%

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

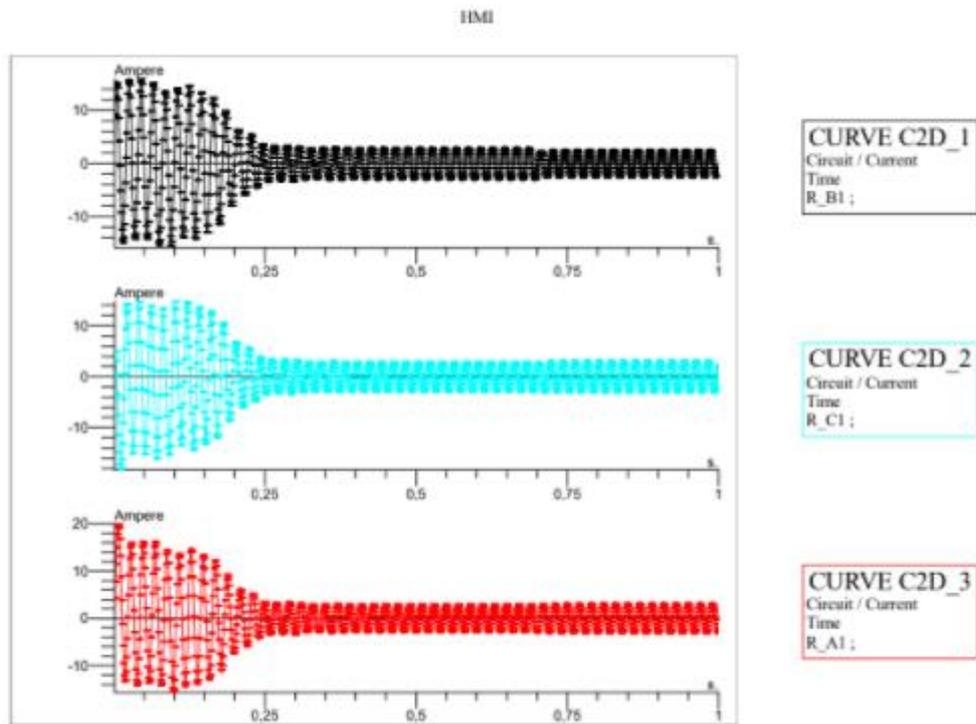


Figure II.38 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

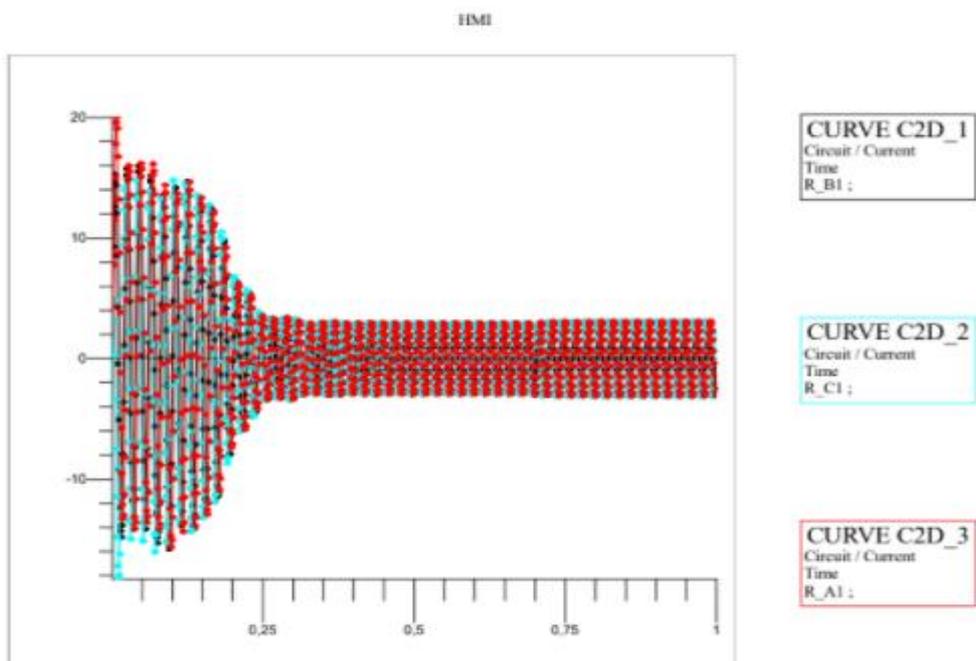


Figure II.39 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉOLUTIONS NUMÉRIQUES

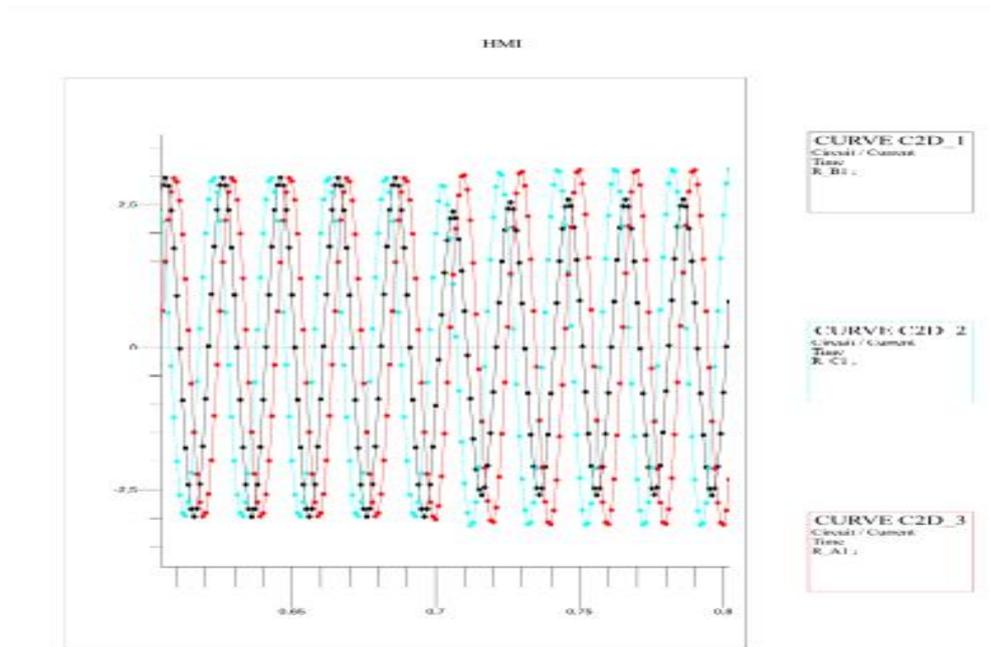


Figure II.40: Zoom des Courants statoriques superposé au niveau des résistances R-1 ,R-2, R-3

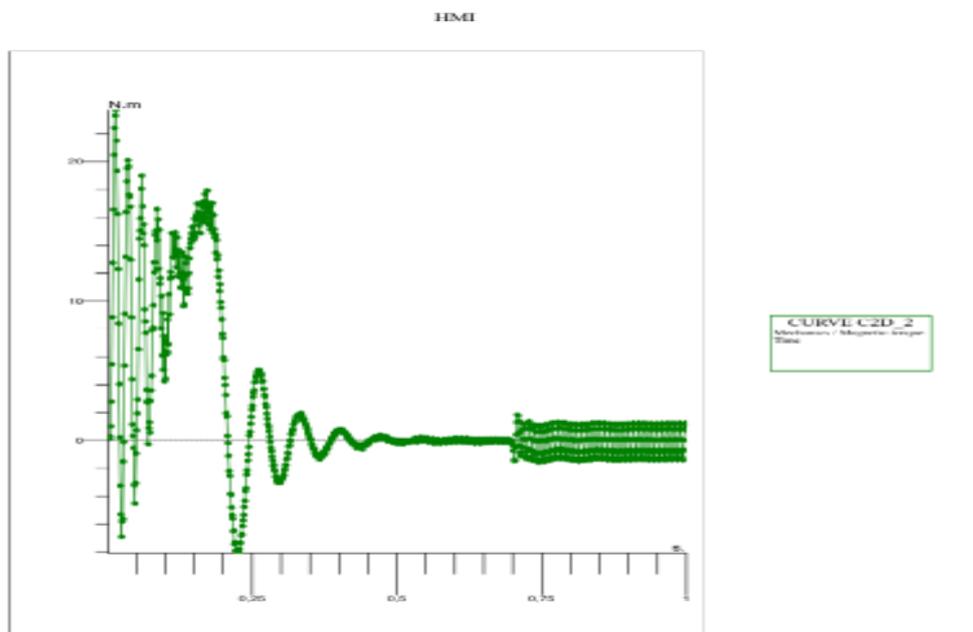


Figure II.41 : Couple électromagnétique déséquilibré 10% +5%

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.4 Présence de défaut sur le déphasage + déséquilibre de tension 10% :

#### II.8.4.1 Résultat graphique :

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure II.42) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure II.43)

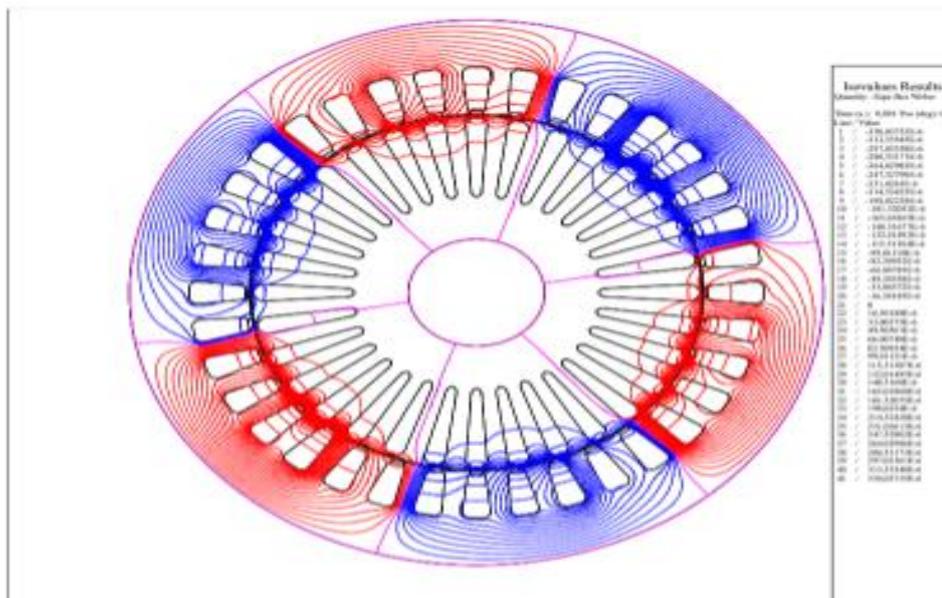


Figure II.42 : Répartition des lignes du champ magnétique au présence de déséquilibre 10% +deph

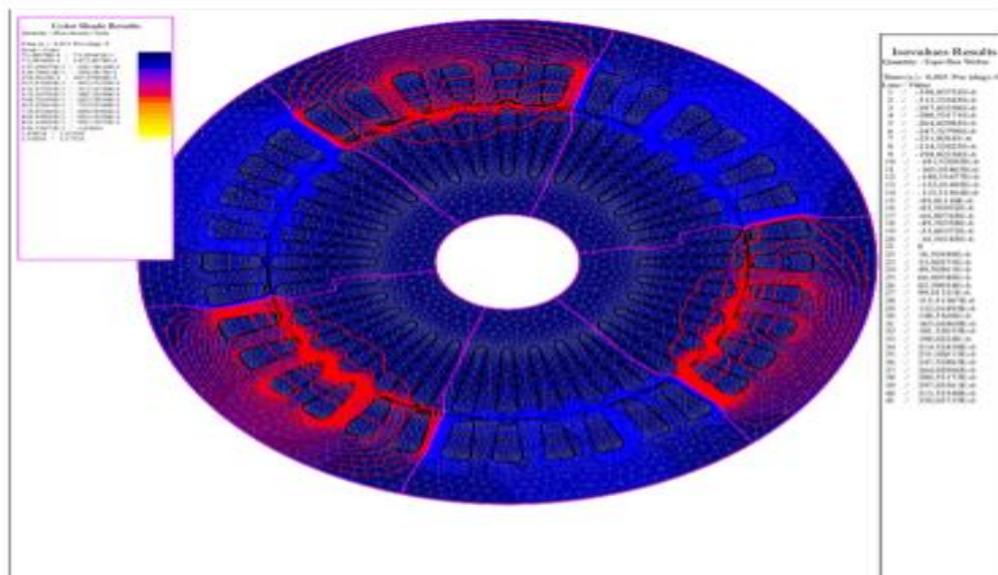


Figure II.43 : Induction magnétique au présence de déséquilibre 10% +deph

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.4.2 FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DÉFAUT (déséquilibre de tension 10% + déphasage déséquilibré)

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine déséquilibré, a donné les résultats suivants :

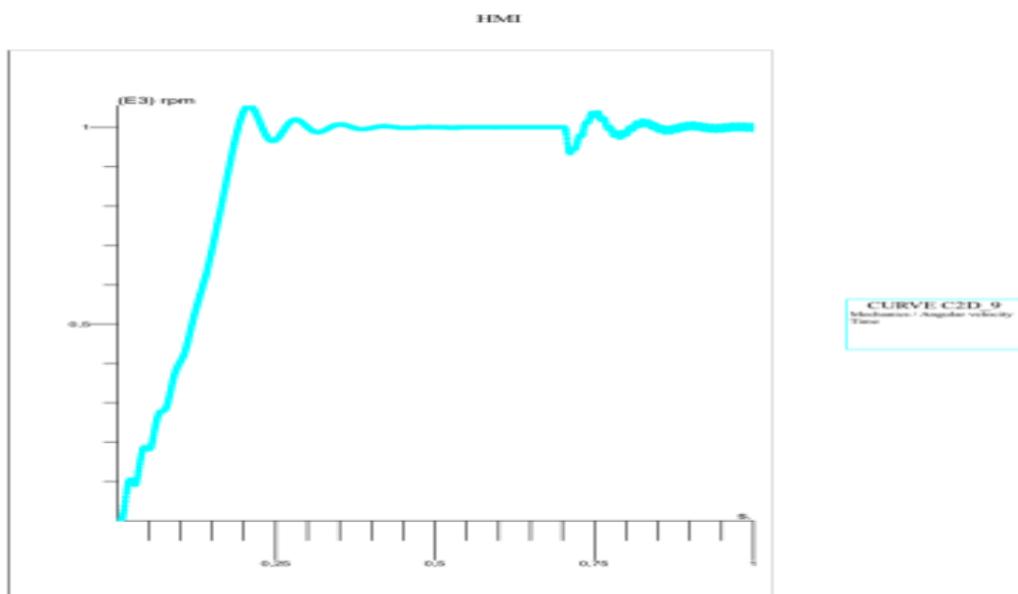


Figure II.44 : Vitesse de rotation déséquilibré à 10% +deph

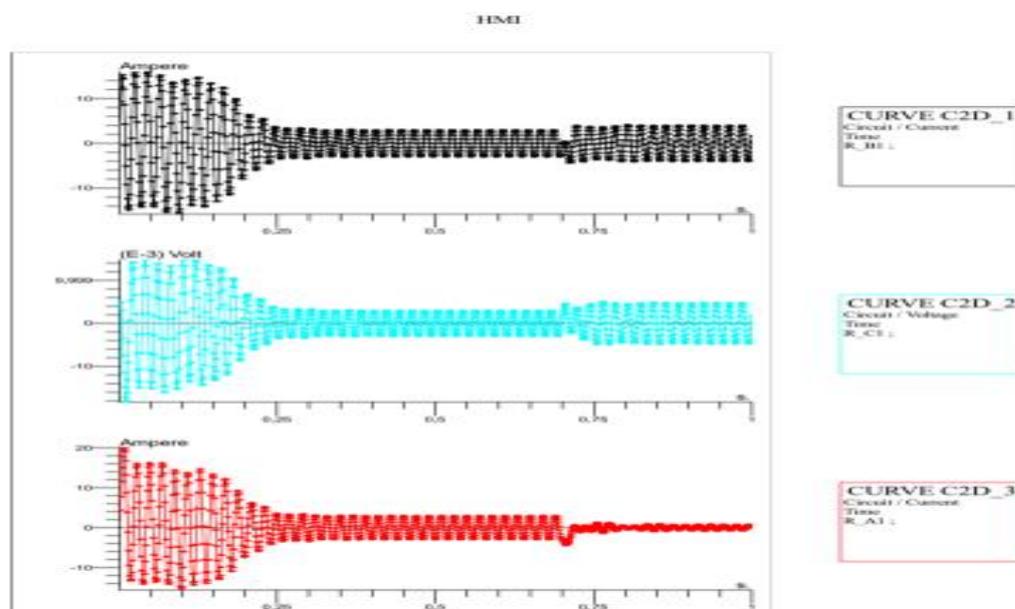


Figure II.45 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

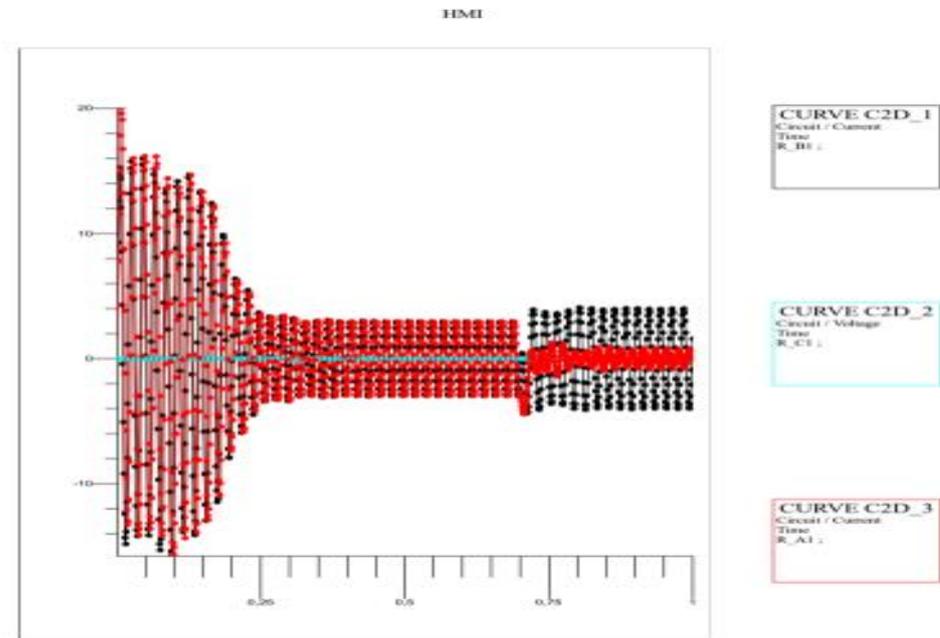


Figure II.46 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

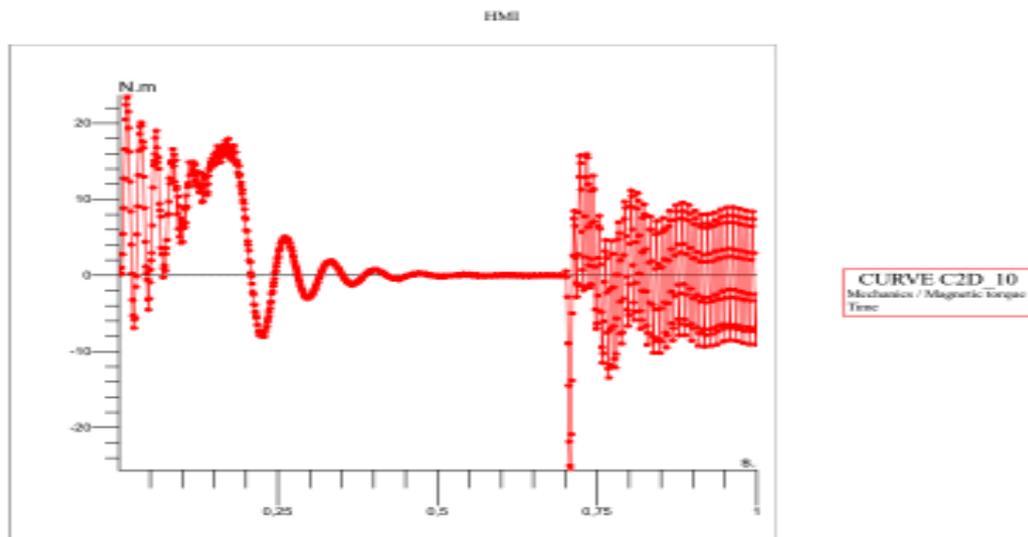


Figure II.47 : Couple électromagnétique déséquilibré 10% +deph

## CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES

### II.8.5 INTERPRÉTATION GLOBALE :

	Tensions des lignes(V)	déphasage	interprétation
5%	220 209 231	0 $-\frac{2\pi}{3}$ $\frac{2\pi}{3}$	Nous présentons sur les figures (II.20 ...II.26, II.29....II.33, II.36....II.41, II.44 ...II.47) l'évolution temporelle des grandeurs de lamachine asynchrone lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement déséquilibré. Pour analyser l'effet de déséquilibre de tension sur ces grandeurs, où nous le avons fait sur le moteur au niveau de lignes de phases deux et trois, nous avons choisi de la rendre du défaut à l'instant t=0.7 secondes et pour obtenir des résultats plus précis, nous avons déséquilibré le moteur avec différents pourcentages à partir de 5%, 10%, 5% sur la phase deux et 10% sur la phase trois puis 10% avec un déséquilibre sur le déphasage.
10%	220 198 242	0 $-\frac{2\pi}{3}$ $\frac{2\pi}{3}$	-Comme nous l'avons remarqué pour le couple une augmentation d'oscillation à partir de 0.7s dans tous les cas avec une déférence de la valeur. -Par contre au courant statorique on remarque un léger diminution d'oscillation dans le cas de 5%, à
5% +10%	220 198 231	0 $-\frac{2\pi}{3}$ $\frac{2\pi}{3}$	chaque fois que le degré de déséquilibre augmente, le courant diminué. -la vitesse de rotation avant le déséquilibre est en régime permanent dans l'instant 0.7s, nous avons le
10%+deph	220 198 242	0 $-\frac{\pi}{3}$ $\frac{\pi}{3}$	déséquilibre en ce moment-là, où nous avons remarqué que la vitesse change sa forme stable (régime permanent) à une forme presque sinusoïdale

Tableau III.1 : tableau d'interprétation

## **CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MAS À PARTIR DE LA RÉSOLUTIONS NUMÉRIQUES**

---

### **II.9 CONCLUSION :**

L'utilisation du logiciel flux 2D nous a permis d'établir un modèle en éléments finis décrivant le fonctionnement réel de la machine asynchrone.

Grace à ça on a pu étudier dans ce chapitre le modèle sain/défaut de cette machine, et à partir des résolutions numériques et des différentes représentations. On a réussi à observer les caractéristiques et les performances d'une MAS dans un état normal puis déséquilibré, la simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode des éléments finis dans son état sain et avec le défaut de déséquilibre. Les résultats de simulation nous donnent une image claire sur son comportement lors de fonctionnement normal et en cas de défaut.

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

### CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE : INTRODUCTION :

### III.1

Dans ce chapitre nous nous sommes concentrés sur le déséquilibre qui se produit dans la machine asynchrone, nous avons plusieurs types de déséquilibre ; mais nous étions plus intéressés par le déséquilibre de tension.

Le déséquilibre de tension existe dans presque tous les réseaux de systèmes d'alimentation triphasés, d'ailleurs il est démontré que près de 98 % de la tension générée par tous les services d'électricité ont un déséquilibre qui peut atteindre jusqu'à 3 % [29]. Une tension asymétrique aux bornes d'une machine asynchrone provoque un grand déséquilibre de courant qui circule dans les enroulements statoriques, ce qui à son tour génère des pulsations dans le couple électromagnétique, et entraîne par voie de conséquence une augmentation des vibrations et des contraintes mécaniques. Il en résulte une augmentation des pertes qui se traduit par une efficacité moindre, la surchauffe de la machine ce qui réduit considérablement la durée de vie de l'isolation des enroulements [30]. Ainsi d'après l'Association des Fabricants Electriques Nationaux "National Electrical Manufacturers Association" (NEMA) [32], quand le déséquilibre de tension atteint 5%, la température dans les enroulements du stator commence à augmenter, entraînant éventuellement la fonte d'isolation du bobinage. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette anomalie, un consensus semble indiquer les plus en vue tels que le défaut des tensions aux bornes des générateurs, les courants de la charge, défaillance des équipements de correction du facteur de puissance et surtout les régulateurs de tension dans les lignes de distribution d'électricité [32]. Plusieurs définitions et formulation sont raccordées au déséquilibre de tensions [33], [34].

Le déséquilibre de tensions d'alimentation a bénéficié depuis une décennie d'un intérêt grandissant, en témoigne la pléthore des travaux dans ce domaine [29-35]. Unanimement les travaux s'accordent pour donner à cet aspect un intérêt incontournable pour assurer un degré élevé de sécurité des moteurs à induction. La détection de cette anomalie dans la machine asynchrone est nécessaire dans un premier stade pour éviter la diminution de l'efficacité, de chauffage et, par conséquent, la détérioration du moteur à induction. Pour cela nous nous choisissons dans ce chapitre une méthode de diagnostic s'appelée la méthode de transformation de fourrier rapide FFT, L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur.

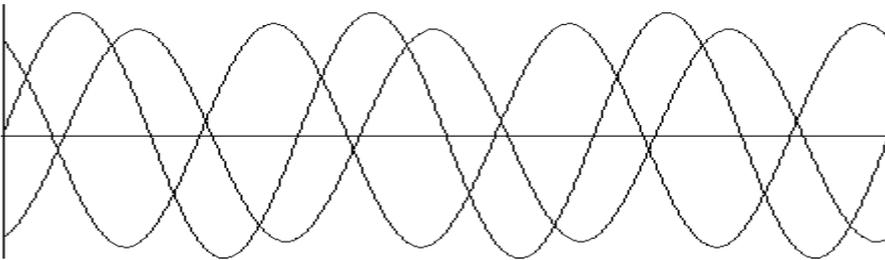
### III.2 Déséquilibre :

#### III.2.1 Définition :

Le déséquilibre est une mesure de l'inégalité des tensions de phase. Un déséquilibre de tension est la mesure des différences de tension entre les phases d'un système triphasé. Il dégrade les performances et raccourcit la durée de vie des moteurs triphasés.

Lorsque les trois signaux ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle de  $120^0$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système (voir figure III.1). [47]

#### III.2.2 Effets du déséquilibre :



**Figure III.1** : Système triphasé déséquilibré

Le déséquilibre de tension conduit à un déséquilibre de courant à travers les équipements triphasés [45].

Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectées [46] :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampes à incandescence qui fournissent un mauvais éclairage).
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Les machines tournantes ont une impédance inverse faible par rapport à l'impédance directe, le courant additionnel résultant conduira à des pertes supplémentaires, donc échauffement supplémentaire des machines. Les composantes inverses créeront dans la

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

machine un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent aussi l'échauffement de ces machines.

### III.2.3 Sources du déséquilibre :

Le déséquilibre de tension est principalement dû aux :

Courant de charge déséquilibrer : ceci est fréquent pour les récepteurs triphasés basse tension, et pour les réceptrices monophasées hautes tensions comme la machine à souder, des fours à arc et la traction ferroviaire.

Courant équilibré circulant dans des impédances déséquilibrées : comme les impédances des réseaux électriques (inductance et capacité), les enroulements des transformateurs triphasés et des machines tournantes dus à une conception erronée.

#### *Approximation du déséquilibre dans un réseau [38]*

Voici comment obtenir une bonne approximation du déséquilibre dans un réseau :

1. Mesurer les trois tensions phase-phase.
2. Calculer la tension moyenne.
3. Déterminer la tension qui présente le plus grand écart par rapport à la moyenne.
4. Calculer le rapport entre cet écart et la tension moyenne. Si le rapport est supérieur à 2 %,

### III.3 DIAGNOSTIC PAR LA MÉTHODE MCSA :

La méthode de la MCSA est l'abréviation des mots Motor Current Signal Analysis qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

#### III.3.1 spectre d'un signal :

##### III.3.1.1 Définition de spectre d'un signal :

C'est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

### III.3.1.2 Analyse spectrale de courant statorique(MCSA):

#### III.3.1.2.1 Définitions :

##### L'analyse spectrale du courant statorique :

Est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparaît la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur. Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement.

##### L'analyse du courant statorique :

Est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature.

- \* Les signaux de courants présentent l'avantage d'être facilement mesurable, et à moindre cout.
- \* Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.
- \* Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques.
- \* Cette méthode qui est connue sous le nom "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), se base sur les phénomènes électro magnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique. Elle est appuyée par un algorithme de calcul rapide appelée Transformée de Fourier Rapide ou bien en Anglais : **Fast Fourier Transform (FFT)**.

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par [50], [53] :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts [50].
- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [49].

### III.3.2 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA :

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibration mécanique
- Courant statorique

Parmi tous ces signaux utilisable, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons :

13. La surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibre de phase, court-circuit entre spire, excentricités d'entrefer, rupture de barres....) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement ....)

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

14. Le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation

### III.3.3 Technique de la FFT

La FFT est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans des nombreux domaines scientifiques. L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur [51], [52], [50].

# CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---

## III.4 RÉSULTATS GRAPHIQUE PAR MCSA

### III.4.1 Résultats expérimentaux et Analyse

#### III.4.1.1 Signature du courant statorique dans le cas du moteur sain.

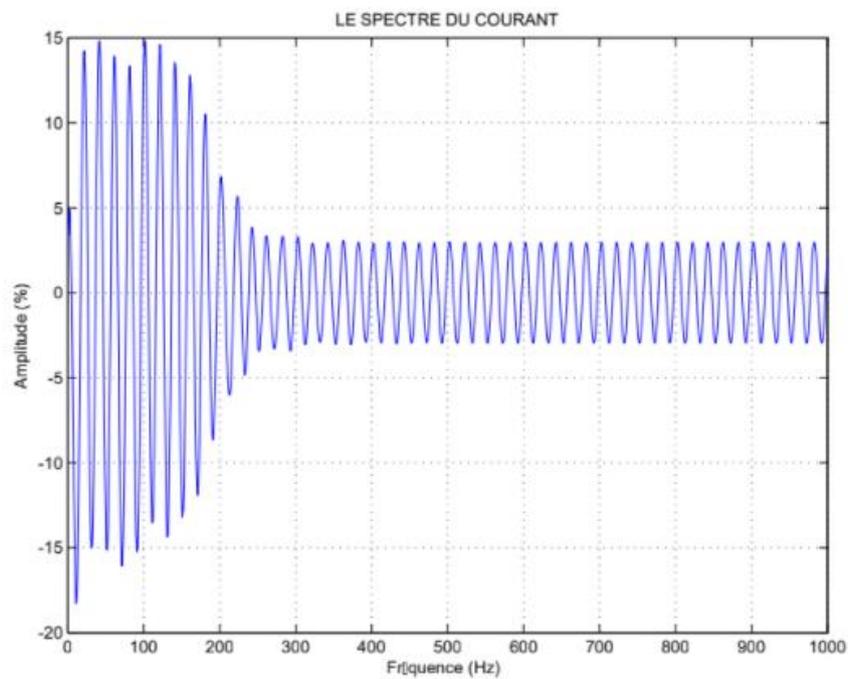


Figure III.2 : Le courant statorique de la machine saine

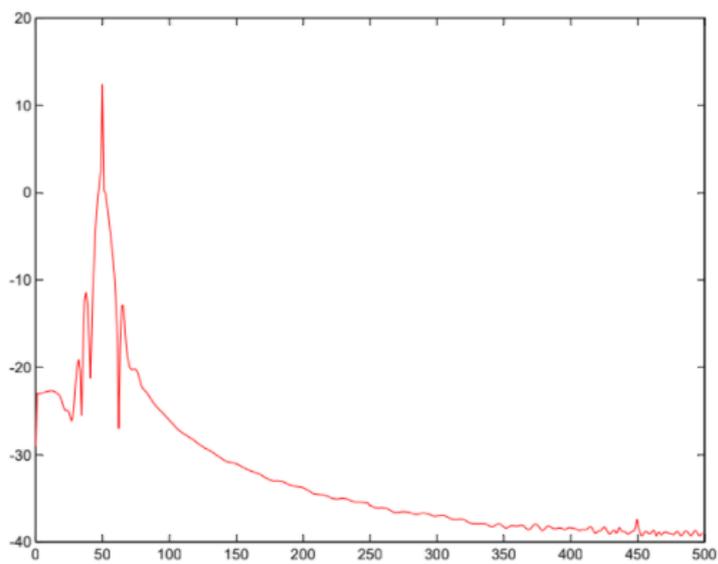


Figure III.3 : Le spectre de courant du moteur sain

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

### III.4.1.1.1 INTERPRÉTATION :

Le courant statorique capté est représenté en (figure III.2) à travers sa caractéristique temporelle lors du fonctionnement sans la présence d'aucune anomalie qu'elle soit externe ou interne à la machine. (Figure III.3) représente le spectre du courant statorique du moteur à l'état sain, en remarque qu'une seule harmonique  $f_s=50\text{Hz}$

### III.4.1.2 Signature du vitesse dans le cas du moteur sain.

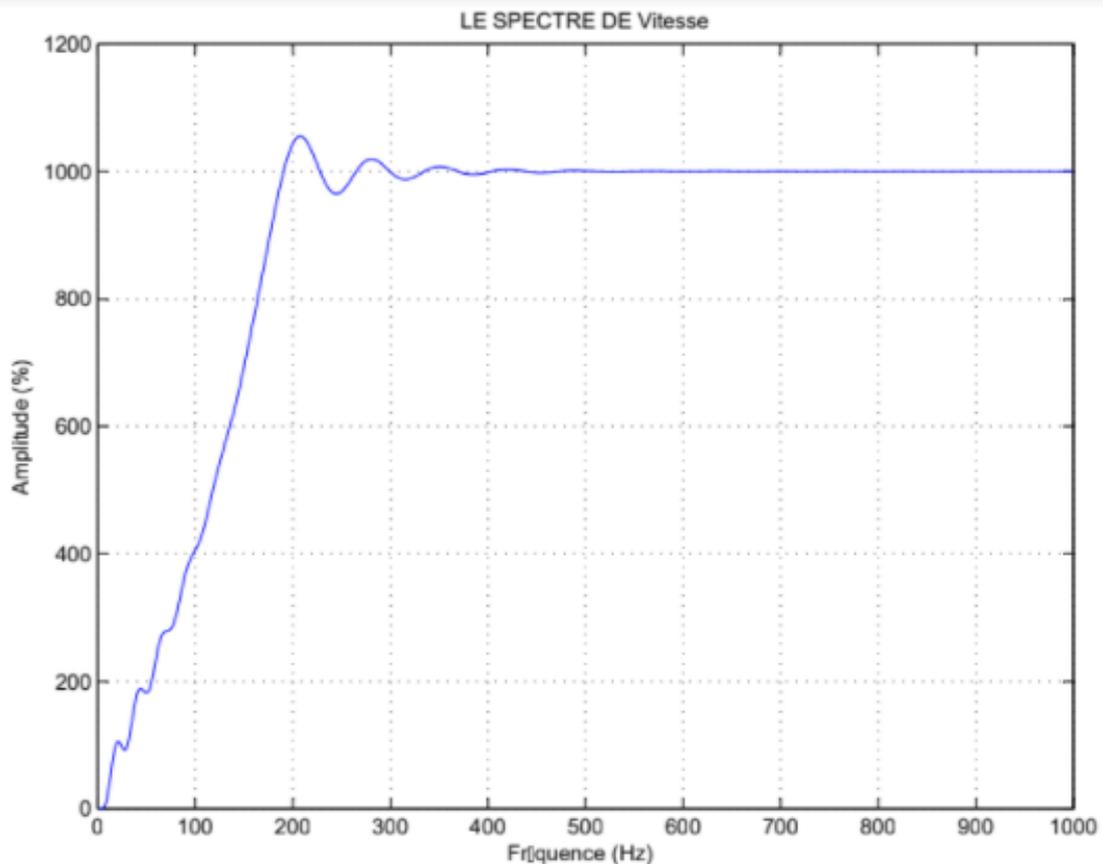


Figure III.4 : La vitesse statorique de la machine saine

# CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

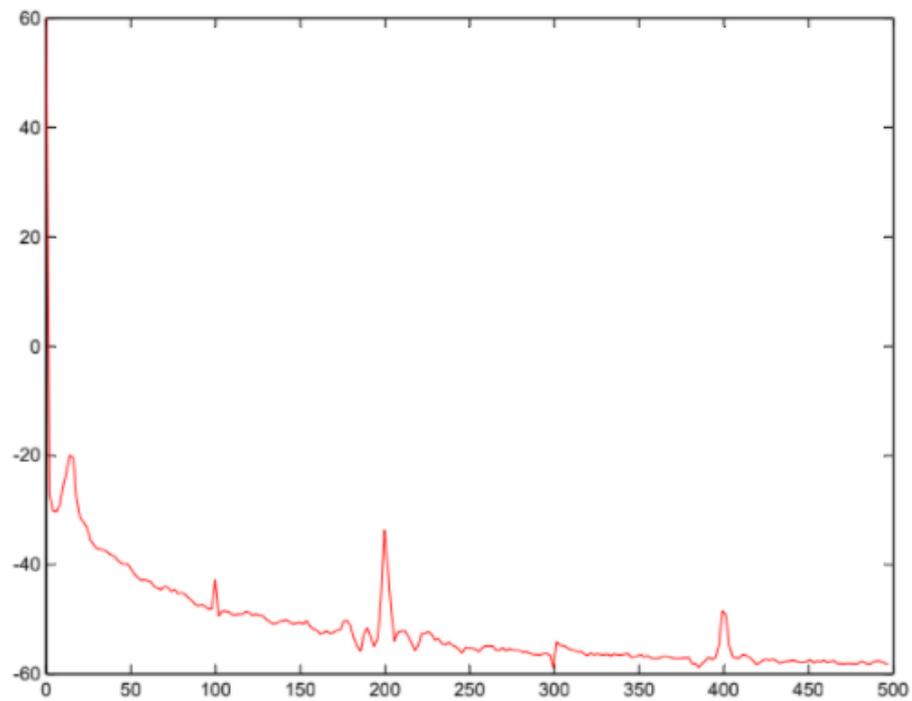


Figure III.5 : Le spectre du moteur sain

## III4.1.3 Signature du couple dans le cas du moteur sain.

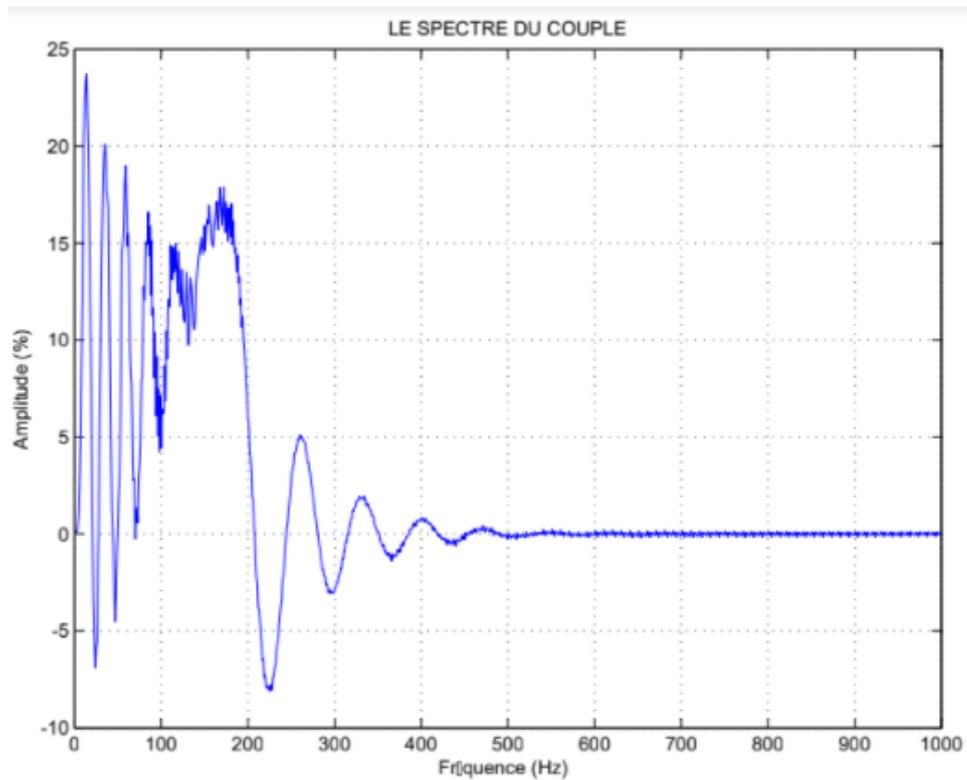


Figure III.6 : Le couple électromagnétique de la machine saine

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

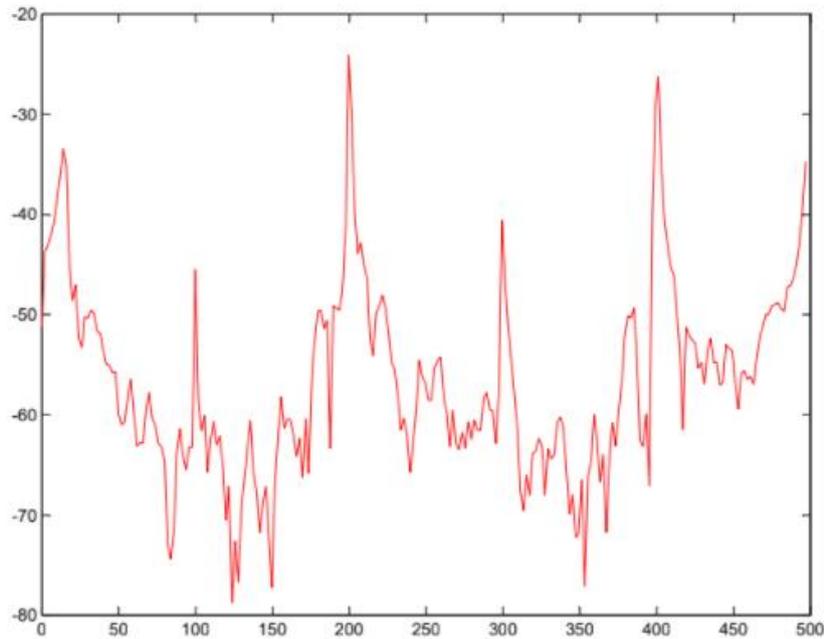


Figure III.7 : Le spectre du moteur sain

### III.4.2 Défaut de déséquilibre de tension 10% :

Pour un bon fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé, il doit être câblé à un système triphasé équilibré avec une tension d'alimentation nominale. Une fois que ces

#### III.4.2.1 Signature du courant dans le cas du moteur déséquilibrée

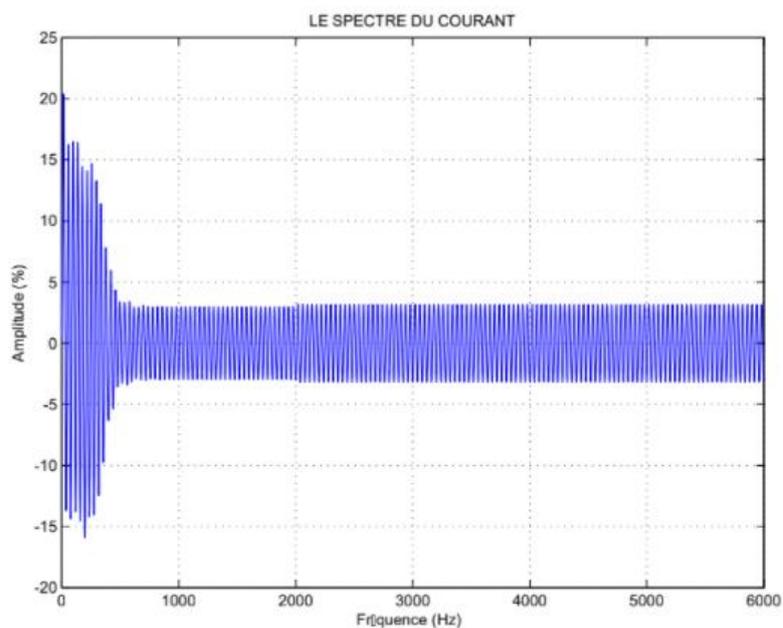
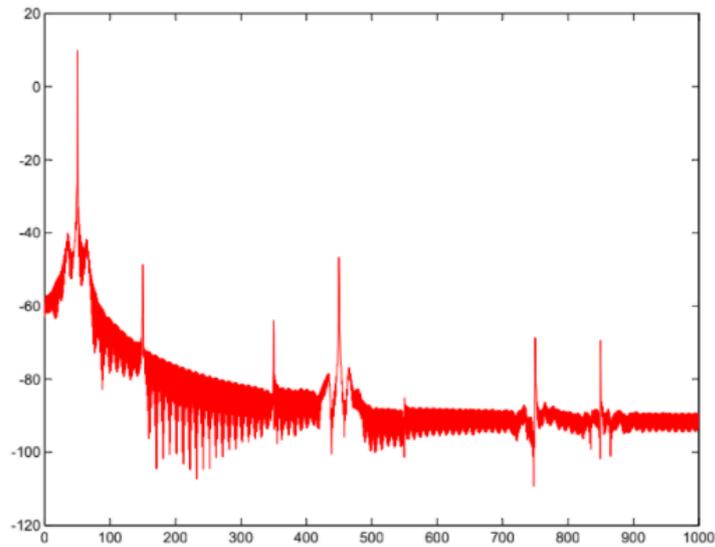


Figure III.8 : Le courant statorique du moteur avec défaut de déséquilibre de tension 10%

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

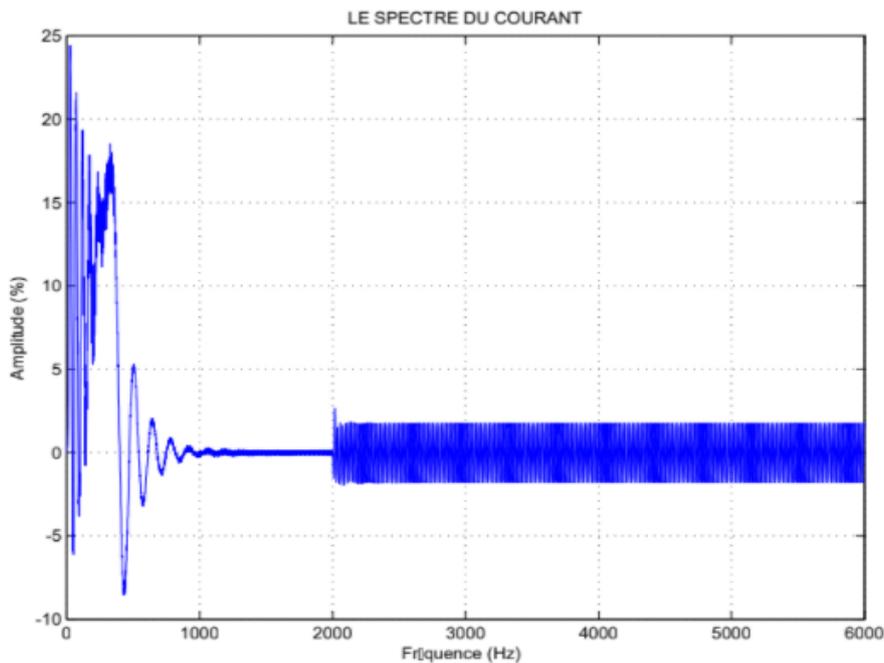


**Figure III.9 :** Le spectre du moteur avec défaut de déséquilibre de tension 10%

### II.4.2.1.1 INTERPRÉTATION :

La (figure III.9) Présente le spectre du courant au moment de l'apparition de ce défaut de déséquilibre de tension. On constate l'émergence croissante des harmoniques  $f_s$ ,  $3f_s$ ,  $9f_s$  et  $15f_s$  qui constituent une signature assez claire pour ce genre d'anomalie électrique

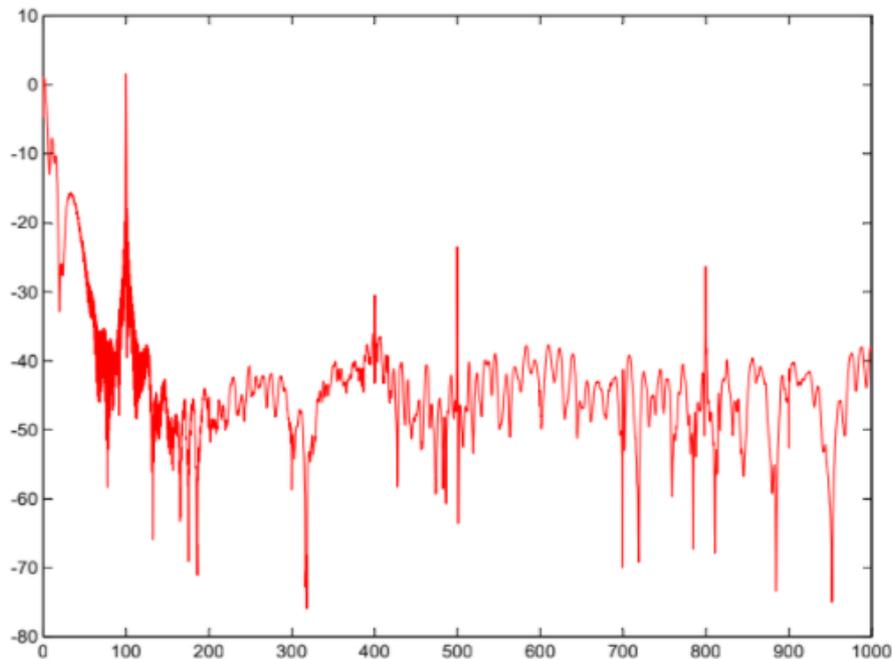
### III.4.2.2 Signature du couple dans le cas du moteur déséquilibrée



**Figure III.10 :** le couple du moteur avec défaut de déséquilibre de tension 10%

## CHAPITRE III : L'ANALYSE DE DÉSÉQUILIBRE

---



**Figure III.11** : Le spectre du moteur avec défaut de déséquilibre de tension 10%

### III.4.2.3.1 INTERPRÉTATION :

(La figure 4.6.) Montre le spectre du courant statorique lorsque le moteur fonctionne avec une phase qui manque. Nous concluons directement qu'il y'a une anomalie importante et d'origine électrique. On remarque l'émergence des harmoniques  $2nf_s$  ( 100, 400, 500, 800)avec un accroissement de leurs amplitudes

### III.5 CONCLUSION :

L'impact le plus courant du déséquilibre est la surchauffe des équipements et, par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie.

Ce chapitre est consacré à l'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est une méthode de diagnostic très utilisée dans la détection des défauts, son application sur le courant statorique de notre machine saine et défectueuse nous a permis de mettre en évidence toutes les bandes latérales relatives au défaut.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Pour aborder notre étude nous avons commencé par une généralité sur la machines asynchrones pour mettre en évidence la structure et les composants d'une MAS, le principe de fonctionnement puis on a passé à citer les différents types des défauts qui peuvent survenir lors du fonctionnement qu'ils soient mécaniques ou électriques, leurs sources et conséquences et surtout le défaut type qui est l'exemple de cette étude (le déséquilibre de tension).

Notre projet de fin d'étude a pour but de modéliser une machine asynchrone qui fonctionne en présence et en absence d'un défaut de déséquilibre de tension et évaluer l'impact de ce défaut sur ses grandeurs physiques. Cette modélisation a été réalisée par logiciel de simulation FLUX-2D qui est basé sur la méthode des éléments finis. L'inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) est de prendre beaucoup de temps de calcul pour effectuer la simulation.

Nous avons montré que les principales grandeurs de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles.

Et en faisant les analyses spectrales des courants statoriques par FFT. Les interprétations des résultats de simulation montrent qu'un défaut de déséquilibre de tension engendre des harmoniques d'ordre ( $kf$ ) où  $k$  est un nombre pair dans le couple et la vitesse, impair dans les courants statoriques.

Finalement, on peut dire que les résultats obtenus depuis la simulation montrent les différents effets de déséquilibre de tension sur les grandeurs de la MAS (courant, vitesse, couple...etc.) et que ces effets sont plus dangereux que certains autres défauts. Car Un moteur asynchrone triphasé dès qu'il perd son équilibre pendant le fonctionnement, il ne peut pas continuer à fonctionner en équilibre par contre Un moteur asynchrone triphasé dès qu'il perd une de ses phases d'alimentation pendant le fonctionnement, continue à fonctionner essentiellement comme un moteur asynchrone monophasé sous la tension de ligne à travers les deux phases restantes.

## **Bibliographie :**

- [1] Riguet abd elwahab, « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par analyse spectrale des courants (id, iq) de Park », Mémoire de fin d'étude Université Mohamed KhiderBiskra, soutenue 24 juin 2018
- [2] MEDOUED AMMAR, « surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones », thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, Soutenue le : 08 / 03 / 2012.
- [3] Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [4] AZZOUZI KHELED, « Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotoriques par l'approche de la fonction d'enroulement », Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran, soutenue le 11/04/2011
- [5] KERROUM Badr Eddine, « Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction », mémoire de master, université badji mokhtar- annaba, 2017
- [6] Ondel O, « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [7] Mohamed El Kamel Oumaamar . « Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée ». Autre. Université de Lorraine, 2012. Français.
- [8] JULIEN MAITRE, « Reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : application des modèles d'intelligence artificielle », thèse de doctorat, l'université du Québec à Chicoutimi, mai 2017
- [9] BELHAMDI Saad, « Diagnostique des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes technique de commande », thèse de doctorat, université mohammed-khider – biskra, soutenue le 08-05-2014
- [10] KERFALI SAMIR, « Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone » these de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, Soutenue le 30/05/2016

- [11] Nadir Benamira, "Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnosis precisely the stator unbalanced voltage normally", *rev.sci.technology.synthese* 34:134- 150(2017),
- [12] C. PREVE. R. JEANNOT, «Guide de conception des réseaux électriques industriels » Schneider Electric, 1997.
- [13] Bonn, «Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. Vol. 28, n°4, pp. 921-937, 92.
- [14] Haylock, «Operation of fault tolerant machines with winding failures,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. Vol. 14, n°4, pp. 1490-1495, 99.
- [15] Welchko, «IPM Synchronous Machine Drive Response to Symmetrical and Asymmetrical Short Circuit Faults,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. Vol. 18, n°2, pp. 291-298, 03.
- [16] Ondel, *Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone*, Lyon, 06.
- [17] Casimir.O, *Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes*, Ecole centrale de Lyon, 06.
- [18] Austin H.Bonnett, "Safety consideration for the application installation, operation, and maintenance of industrial AC induction motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*; vol25, September /October 1989.
- [19] D.Yang and J.Penman, "Intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring", *Proceeding of COMADEM 2000*, 3-8 December 2000, pages 461-470.
- [20] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A. Bendiabdellah and J.A.Dente, "Induction motor load effect diagnostic by instantaneous power spectrum", *Proceeding of ACEMP 2001*, June 27-29, 2001, Kujadasi, Turkey.
- [21] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah and J.A.Dente, "Squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach", *Proceeding of IEEE*

SDEMPED 01, Sep. 1-3, 2001, Gorizia, Italy.

- [22] Hubert Razik et Gaëtan Didier, “Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone”, Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [23] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, “Monitoring generator and large motors”, IEE Proceeding May 1986.
- [24] SAADI Sakhara, « diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette », thèse du doctorat, Université Badji Mokhtar\_Annaba, 2017.
- [25] BOUSBIA SALAH Mohamed, DJERIBIAI Ayoub, BOUAZIZ Salim, « Identification des machines asynchrones par la méthode SSFR en vue de leurs diagnostic », mémoire Master, Université de M'sila, 2012.
- [26]:A. Assam, « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics », Thèse de magister de l'Université de Sétif, soutenue 2010.
- [27] **Ounnadi Mohammed**, « Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents », Thèse de magister, Université de Tizi-Ouzou, 07 avril 2011
- [28] **Khebbab Mohamed**, « Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault »

- [29] S. S. Refaat, H. Abu-Rub, A. Iqbal, "ANN-Based System for a Discrimination Between Unbalanced Supply Voltage and Phase Loss in Induction Motors", IEEE Conference Publications, 2014 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), PP. 1-6, 2014.
- [30] A. B. Fernandes Neves, A. De Leles Ferreira Filho, M. V. Borges de Mendonca, "Effects of Voltage Unbalance on Torque and Efficiency of a Three-Phase Induction Motor", IEEE Conference Publications, 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), PP. 679-683, 2014.
- [31] M. Seera, C. P. Lim, D. Ishak, H. Singh, "Offline and Online Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors Using a Hybrid Soft Computing Model", Elsevier, Applied Soft Computing Journal, Vol. 13, PP. 4493-4507, 2013.
- [32] S. Sridhar, K. U. Rao, "Detection of Simultaneous Unbalanced Under Voltage and Broken Rotor fault in Induction Motor", IEEE Conference Publications, 2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, PP. 48-53, 2013.
- [33] J. Faiz, H. Ebrahimpour, "Precise Derating of Three-Phase Induction Motors With Unbalanced Voltages", IEEE Conference Publications, Industry Applications, Vol. 1, PP. 485-491, 2005.
- [34] A. K. Singh, G. K. Singh, R. Mitra, "Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance", IEEE Conference Publications, Power Symposium, NAPS '07 39th North American, Vol. 1, PP. 473-479, 2007.
- [35] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors", Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, USA, PP. 26-29, 2004.
- [36] Medouad A., "surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques" thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda 2012
- [37] Benamira N., Rachedi M.F., Bouras S., Kerfali S., Bouras A. "Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnose precisely the stator unbalanced voltage anomaly Rev. Sci. Technol., 2017, no. 34, pp.134-150.

- [38] M'beirick M.Y., M. boukhenaf " Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d'alimentation (déséquilibre de tension)", mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel 2019
- [39] BAZINE Sadok" Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut " thèse de doctorat, Université de Poitiers, Année 2009.
- [40] [https://fr.wikibooks.org/wiki/Méthode\\_des\\_éléments\\_finis/Présentation\\_générale](https://fr.wikibooks.org/wiki/Méthode_des_éléments_finis/Présentation_générale)
- [42] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.
- [43] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
- [44] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 15. 2009.
- [45] M.H.J.Bollen, Y.H.Gu," Signal Processing Of Power Quality Disturbances". John Wiley, 2006.
- [46] M.A.E Allali," Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension". Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg, Septembre 2002.
- [47] D.O.Abdeslam," Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension" Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace, Décembre 2005.
- [48]C. SabonnadièreL. Coulomb«Calcul des champs électromagnétiques», Technique de l'ingénieur D 3020
- [49] A.Ibrahim"Contribution au diagnostic de machines électromécaniques " 16. Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
- [50]M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à

Cage"Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.

G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance"

17. Thèse de doctorat, 2004, Université D'Henri Poincaré, Nancy-I, France.

[51]S. Emmanuel, "Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ",Thèse de doctorat,1999,Ecole central de Nantes France.

[52]M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.

. Mr HARIR Miloud Ingénieur, MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER, Année Universitaire 2008/2009, SPECIALITE : Electrotechnique. OPTION : Commande Electrique d'état en Electrotechnique SUJET DU MEMOIRE : Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée

