

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 حطاب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Electrotechnique  
Spécialité Machines électriques

présenté par

MELLAK Oussama

&

DJILALI Mohamed Amine

# Discrimination des défauts d'un Moteur Asynchrone Triphasé

Proposé par :  
**Dr. D.KOUCHIH**

Année Universitaire 2018-2019

## Dédicaces

---

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.*

- ❖ *A mon cher frère MOHAMED.*
- ❖ *A mes sœurs.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A toute la famille MELLAÏK et CHARIF de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A tous mes amis de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*  
*Bensafi Mohamed Lamine*  
*Bouferroum Salah*

*MELLAÏK OUSSAMA*

## Dédicaces

---

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chers parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.*

- ❖ *A mon cher frère.*
- ❖ *A ma sœurs KAHADIDJA.  
ET SA FILLE MARIEM*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A toute la famille DJILALI et ACHOUR  
de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A tous mes amis de près ou de loin sans  
exception.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*

**DILALI MOHAMED AMINE**

## Remerciements

*Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la Santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les Sacrifices qu'ils ont endurés. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Dr D. Kouchih pour suivi tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.*

*Nos remerciements vont également*

*M. R. Hachelaf pour son attention et son suivi.*

*Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie électrique.*

*Sans oublier les jeunes étudiants et nos collègues qui, durant ces années, ont entretenu une très bonne ambiance et ont fait preuve de solidarité. Nous souhaitons aux eux du succès dans leurs recherches ainsi que dans leurs vies professionnelles.*

# RESUME

---

## ملخص:

في هذا البحث استخدمنا تقنية العناصر المحدودة لتشخيصاً لا تفصلاً لسنجاي غير المتزامن. هذه التقنية، التي تقدم تحليلاً دقيقاً للإشارات أحادية الأبعاد والإشارات اثنائية الأبعاد من خلال برنامج التردد، مفيد جداً لتحديد عيوب الجهاز المعني. هذا العمل يتكون من نمذجة أخطاء مختلفة من الجهاز غير المتزامن باستخدام النمذجة من العناصر المحددة التي هي طريقة تقريبية من الممارسة

**الكلمات المفتاحية:** أعطاب الآلة اللامتزامنة، التشخيص، طريقة عنصر محدود

---

## Résumé :

Dans ce mémoire nous avons utilisé la technique des éléments finis dans le but du diagnostic des machines asynchrones à cage d'écurie. Cette technique qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels à travers d'un logiciel flux-2d est très utile pour la détermination des défauts de la machine en question. Ce travail consiste à modéliser les différents défauts de la machine asynchrone en utilisant pour ce faire une modélisation par éléments finis qui est une méthode proche de la pratique.

**Mots clés :** défauts de la machine asynchrone, diagnostic, méthode des éléments finis

---

## Abstract :

In this paper we used the finite element technique for the diagnosis of asynchronous squirrel cage machines. This technique gives us very good analysis of unidimensional and two-dimensional signals through a flux-2d software, is very useful for determining the defects of the machine in question. This work consists in modeling the various faults of the asynchronous machine by using a modeling by finite elements which is a method close to the practice.

**Key words:** induction machine faults, Diagnosis, finite element method

---

# SOMMAIRE

---

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1

## CHAPITRE 1 :GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

**1.1Introduction** ..... 2

**1.2Machine asynchrone** ..... 2

1.2.1 Définition ..... 2

1.2.2 Modes de fonctionnement..... 2

**1.3Constitution de la machine asynchrone** ..... 3

1.3.1 Le stator ..... 4

1.3.2Le rotor ..... 4

a)Le rotor à cage d'écureuil ou rotor en court-circuit ..... 4

b)Le rotor bobiné ..... 5

1.3.3Les paliers ..... 5

1.3.4Principe de fonctionnement..... 5

1.3.5Différentes caractéristiques de la machine asynchrone ..... 6

**1.4 Différents types des moteurs asynchrones** ..... 7

1.4.1 Moteur asynchrone à cage ..... 7

1.4.1.1 Constitution et Principe de fonctionnement ..... 7

1.4.1.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage ..... 8

1.4.2 Moteur asynchrone à rotor bobiné ..... 8

1.4.2.1 Constitution et Principe de fonctionnement ..... 8

1.4.2.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné ..... 9

**1.5 Défauts des machines triphasée** ..... 9

1.5.1 Classification des défauts ..... 9

**1.6Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone**..... 11

**1.7Principaux défauts liés à la MAS** ..... 13

1.7.1 Le déséquilibre de tension et de courant..... 13

1.7.2Ruptures des barres rotorique ..... 13

# SOMMAIRE

---

1.7.3 Court-circuit au niveau du stator .....	13
1.7.3.1 Court-circuit entre spires .....	13
1.7.3.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné .....	13
<b>1.8 Effets des défauts électriques sur les courants statoriques .....</b>	<b>15</b>
1.8.1 Le déséquilibre de tension et de courant.....	15
1.8.2 Ruptures des barres.....	16
1.8.3 Court-circuit au niveau du stator .....	16
<b>1.9 Conclusion.....</b>	<b>16</b>

## **CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS**

<b>2.1 Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Formulation des équations de Maxwell .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Equation de Maxwell-Faraday .....	17
2.2.2 Equation de Maxwell-Ampère .....	17
2.2.3 Equation de conservation de flux magnétique .....	17
2.2.4 Equation de Maxwell-Gauss.....	18
2.2.5 Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation.....	19
2.2.6 Les lois de comportement des milieux.....	20
2.2.7 Le cas du vide .....	20
2.2.8 Les milieux conducteurs : la loi d'ohm.....	20
2.2.9 Comportement magnétique des matériaux .....	21
2.2.10 Comportement diélectrique des matériaux.....	21
<b>2.3 Modèle magnétostatique scalaire . .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Modèle magnétostatique vectoriel. ....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Condition aux limites .....</b>	<b>25</b>
2.5.1 Condition de Dirichlet.....	25
a) Dirichlet homogène.....	25
b) Dirichlet non homogène .....	25
2.5.2 Condition de Neumann .....	25
a) Neumann homogène .....	26
b) Neumann non homogène .....	26

# SOMMAIRE

---

<b>2.6 Application des équations de Maxwell à la MAS à cage</b> .....	26
<b>2.7 Méthodes de résolution</b> .....	27
2.7.1 Méthodes analytiques.....	27
2.7.2 Méthode des éléments finis.....	28
2.7.2.1 La méthode des résidus pondérés .....	28
2.7.2.2 La méthode variationnelle .....	29
<b>2.8 Principe de la méthode des éléments finis</b> .....	29
<b>2.9 Types d'éléments finis</b> .....	30
<b>2.10 Discrétisation et approximation</b> .....	30
<b>2.11 Logiciel de résolution</b> .....	31
2.11.1 Logiciel de simulation flux-2d. ....	32
2.11.1.1 Module préprocesseur .....	32
2.11.1.2 Module processeur .....	32
2.11.1.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D) .....	32
<b>2.13 Conclusion</b> .....	34

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

<b>3.1 Introduction</b> .....	35
<b>3.2 Application et simulation de la MAS</b> .....	35
3.2.1 Description de la géométrie .....	35
<b>3.3 Structures des bobinages d'une MAS</b> .....	38
3.3.1 Matériaux conducteurs.....	40
3.3.2 Matériaux magnétiques.....	40
3.3.3 Couplage avec les équations de circuit.....	41
<b>3.4 Résultats de simulation par la magnétodynamique</b> .....	41
3.4.1 Caractéristique de simulation en magnétodynamique .....	41
a) Avantages.....	41
b) Inconvénients.....	41
<b>3.5 Résultats graphiques</b> .....	42
<b>3.6 Simulations des comportements de la MAS</b> .....	43
3.6.1 Fonctionnement sain de la Machine asynchrone.....	43
3.6.1.1 Interprétation.....	45
3.6.2 Fonctionnement en Tension déséquilibré.....	46



# SOMMAIRE

---

3.6.2.1 Interprétation.....	49
3.6.2.2 Résultat de l'analyse spectrale par FFT.....	50
3.6.2.3 Interprétation de l'analyse spectrale.....	51
3.6.3 Fonctionnement en présence de défaut (Court –circuit).....	52
3.6.3.1 Interprétation.....	55
3.6.3.2 Résultats de l'analyse spectrale par FFT .....	55
3.6.3.3Interprétation de l'analyse spectrale.....	56
<b>3.7 Conclusion .....</b>	<b>56</b>

## CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE

<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Campagnes d'Essais et Description .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4 Description de Matériel.....</b>	<b>58</b>
4.4.1 L'alimentation.....	58
4.4.2 Analyseur de qualité d'énergie.....	59
4.4.3 Oscilloscope.....	60
4.4.4 Transformateur.....	60
4.4.5 La résistance variable .....	61
4.4.6 Machine asynchrone à cage .....	61
<b>4.5 Résultat expérimentale de fonctionnement déséquilibre.....</b>	<b>62</b>
4.5.1 Tension équilibre .....	62
4.5.2 Tension déséquilibre .....	63
4.5.3 Interprétation des résultats.....	64
4.5.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT .....	64
4.5.5 Interprétation de l'analyse spectrale .....	65
<b>4.6 Conclusion .....</b>	<b>65</b>

Conclusion generale

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

## Liste des symboles

---

- $\Omega_s$  : La vitesse de synchronisme(rad/sec)
- $\Omega$  : La vitesse mécanique de rotor (rad/sec)
- P : nombre paires des pôles
- $\Omega_g$  : vitesse de glissement
- $n_s$  : La vitesse de synchronisme (tr /min)
- n : La vitesse mécanique de rotor (tr /min)
- $f_s$ : La fréquence d'alimentation
- f : La fréquence de défaut
- $f_{cc}$ : La fréquence de court-circuit
- B : l'induction magnétique
- $\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).
- F : La force radiale
- F<sub>m</sub>: La force magnétomotrice de la phase "A".
- p : Perméance de l'entrefer.
- $V_A, V_B, V_C$  : Les tensions statorique
- $v_a, v_b, v_c$  : Les tensions rotorique
- $J_t$ : Représente l'inertie totale ramenée à l'arbre moteur
- $f_v$ : Le couple de frottement visqueux
- $C_e$ : Le couple électromagnétique
- $C_r$ : Le couple résistant appliqué à la machine.
- $\theta$  : La position du rotor par rapport au stator.
- S : Surface fermée.
- $\Omega$ : Surface enfermée par un contour
- $\mu_0$  : Perméabilité magnétique de l'air.
- H : Champ magnétique.
- B : Induction magnétique.
- $\psi$  : Flux magnétique
- $\omega_s$ : Pulsation statorique.
- $\varphi$  : Ouverture angulaire.
- $\theta_r$  : Position mécanique du rotor.

## Liste des symboles

---

$J$  : Densité de courant.

$i$  : Courant électrique.

$l$  : Longueur active de la machine.

$N$  : Fonction d'enroulement.

$N_s$  : Nombre de spires.

$N_e$  : Nombre d'encoches statoriques.

$N_b$  : Nombre de barres rotoriques.

$n$  : Fonction de distribution..

$\lambda$  : Ouverture de la bobine.

$\beta$  : Ouverture de l'encoche.

$\gamma$  : Inclinaison de l'encoche.

$\alpha_s$  : Pas d'encoches statoriques.

$\alpha_r$  : Pas d'encoches rotoriques

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1 :Composition d'un moteur asynchrone .....	3
Figure 1.2 : Photo du stator d'une machine asynchrone.....	4
Figure 1.3 : stator d'une MAS démente.....	4
Figure 1.4 : Le rotor à cage d'écureuil.....	4
Figure 1.5 : Le rotor bobiné.....	5
Figure 1.6 : Interaction rotor stator .....	6
Figure 1.7 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	10
Figure 1.8 :Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	10
Figure 1.9: Répartition des défauts.....	11
Figure 1.10 :Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone .....	12
Figure 1.11 : Facteurs aggravant le défaut.....	12
Figure 1.12 : Différents courts-circuits entre spires.....	14
Figure 1.13: Différents courts-circuits entre phases.....	15
Figure 2.1:Interface entre deux milieux.....	20
Figure 2.2:Eléments classiques en une et deux dimensions.....	30
Figure 2.3 :Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D. ....	33
Figure 3.1: La géométrie de la machine asynchrone .....	36
Figure 3.2: Dimension des encoches.....	36
Figure 3.3: Affectation des régions surfaciques.....	37
Figure 3.4: discratisation des maillage .....	37
Figure 3.5: Répartition du maillage.....	38
Figure 3.6: Bobinage triphasé représente deux pas polaires .....	39
Figure 3.7: Répartition du bobinage statorique.....	39
Figure 3.8: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN .....	40
Figure 3.9: Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	41
Figure 3.10: Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal	42
Figure 3.11: Induction magnétique pour le fonctionnement nominal .....	43
Figure 3.12: Vitesse de rotation .....	43
Figure 3.13: Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances R-1 ,R-2, R-3 .....	44
Figure 3.14: Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances R-1 ,R-2, R-3 .....	44
Figure 3.15: Zoom des Courants statoriques supprposé au niveau des résistances.....	45
Figure 3.16:Couple électromagnétique .....	45
Figure 3.17: la vitesse de rotation en cas de déséquilibre.....	46
Figure 3.18: zoom de la vitesse de rotation en cas de déséquilibre.....	47

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

---

Figure 3.19:Les Courants statoriques juxtaposé en cas de déséquilibre.....	47
Figure 3.20:Les Courants statoriques superposé en cas de déséquilibre.....	48
Figure 3.21:Zoom des Courants statoriques superposé en cas de déséquilibre.....	48
Figure 3.22: Le Couple electromagnitique en cas de déséquilibre e.....	49
Figure 3.23:Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré.....	50
Figure 3.24:Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré.....	50
Figure 3.25:Circuit équivalent en présence de défaut.....	52
Figure 3.26:la vitesse de rotation en cas de défaut.....	52
Figure 3.27:zoom de la vitesse de rotation en cas de défaut.....	52
Figure 3.28:Les Courants statoriques juxtaposé en cas de défaut.....	53
Figure 3.29:Les Courants statoriques superposé en cas de défaut.....	53
Figure 3.30:Zoom des Courants statoriques superposé en cas de défaut.....	54
Figure 3.31:Le Couple electromagnitique en cas de défaut.....	54
Figure 3.32:Zoom du Couple electromagnitique en cas de défaut.....	54
Figure 3.33:Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré.....	55
Figure 4.1 : Configuration du banc expérimental.....	57
Figure 4.2 : Banc d'Essai.....	58
Figure 4.3 : Représente bloc d'alimentation.....	59
Figure 4.4 : Représente l'analyseur de qualité d'énergie.....	59
Figure 4.5 : Représente oscilloscope numérique.....	60
Figure 4.6 : Représente les enroulements primaire et secondaire de transformateur.....	60
Figure 4.7 : Représente la résistance variable.....	61
Figure 4.8 : Représente les borne d'alimentation de la MAS.....	61
Figure 4.9 : Représentation des tensions statorique équilibré.....	62
Figure 4.10: Représentation des courants statorique équilibré.....	62
Figure 4.11 : Représentation des tensions statorique déséquilibré.....	63
Figure 4.12:Représentation des courants statorique déséquilibré.....	63
Figure 4.13 : Les spectres du courant statorique équilibré.....	64
Figure 4.14: Les spectres du courant statorique déséquilibré.....	65

### LISTE DES TABLEAU

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage.....	8
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de la machine.....	9
Tableau 3.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.....	35
Tableau 3.2 : B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [42assim].....	40

## CONCLUSION GENERALE

---

Notre travail de fin d'étude a porté sur la modélisation et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis. Dans notre travail on a utilisé le logiciel de simulation Flux 2D qui a été vraiment bénéfique pour savoir le comportement de la machine dans les deux cas sain et défectueux(l'apparition de défauts).

Tout d'abord, dans le premier chapitre on a présenté une synthèse sur la machine asynchrone en identifiant sa composition et en décrivant son principe de fonctionnement, ensuite on a cité les défauts qui peuvent apparaître dans la machine et les étapes de diagnostic de ces derniers.

Le chapitre deux a donné les deux principales approches des méthodes de diagnostic à savoir la méthode analytique et la méthode numérique, le diagnostic par la méthode des éléments finis fait partie des méthodes numériques, c'est une méthode puissante qui donne des résultats utiles et l'étude par éléments finis a permis de mettre en évidence les variations de vitesse dues aux fluctuations de couple d'une machine par le défaut de déséquilibre de tension statorique et le court-circuit, et de déterminer les répartitions des lignes d'équiflux dans le circuit magnétique de la machine asynchrone.

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation numérique pour voir l'impact des défauts électriques préconisés sur les autres grandeurs électromécaniques de la machine

Les résultats de notre étude ainsi que leurs interprétations ont été clairement présentés dans le 3ème chapitre ; on a obtenu des résultats significatifs grâce à la simulation par le logiciel Flux 2D qui a une importance de taille dans le domaine de simulation par éléments finis.

Afin de représenter expérimentalement le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sain) et anormal (défaillante), nous avons simulé le moteur asynchrone à cage face à des défauts statoriques. Ensuite, Nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique a été focalisée sur la gamme des très basses fréquences, les composantes traditionnelles ( $f_{dés} = k \cdot f_s$ ) autour du fondamental ont été détectées pour un nombre différent de déséquilibre

## CONCLUSION GENERALE

---

Finalement, on peut dire que les résultats obtenus depuis les deux parties sont presque les mêmes sauf qu'en simulation on peut visualiser les signaux (courant rotorique, couple...) de moteur en plusieurs cas sans le risque de détruire la machine, par contre en expérimental on peut voir le fonctionnement réel de la machine (bruit, vibration...)



## 1.1 Introduction

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, à cause de sa conception, et son coût est relativement moins cher à celui des autres machines, sa grande robustesse au niveau électromagnétique, et sa bonne standardisation entre les différents fabricants. Cependant, la conception simple de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante.

Depuis longtemps, la machine asynchrone a été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance.

## 1.2 Machine asynchrone

### 1.2.1 Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. La machine asynchrone est une machine à induction dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à convention magnétique [1].

### 1.2.2 Modes de fonctionnement

Dans les machines électriques peuvent être trouvées en deux modes de fonctionnement.

- Générateurs : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Moteurs : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur asynchrone (ou moteur d'induction) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

## 1.3 Constitution de la machine asynchrone

La machine d'induction triphasé (souvent appelé machine asynchrone triphasé) comprend deux parties principales : un inducteur fixe nommé stator, et un induit mobile nommé rotor.

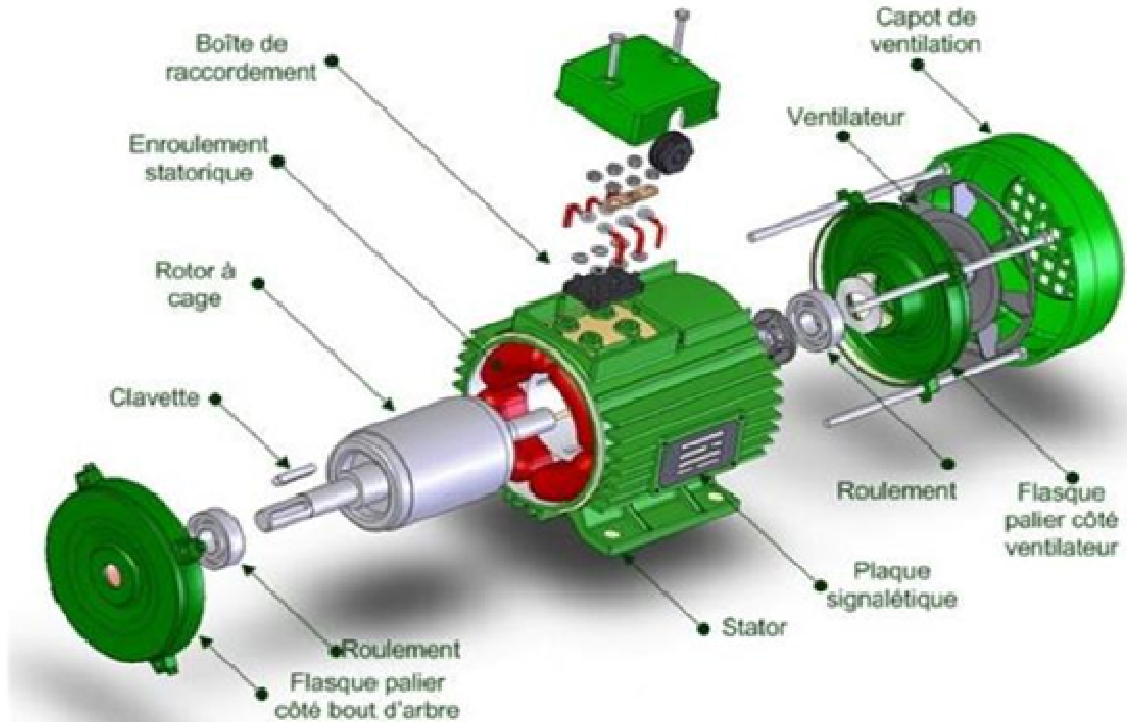


Figure 1.1 : Composition d'un moteur asynchrone

### 1.3.1 Le stator

Le stator c'est la partie fixe du moteur comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide (Figure 1.2); ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.[19]

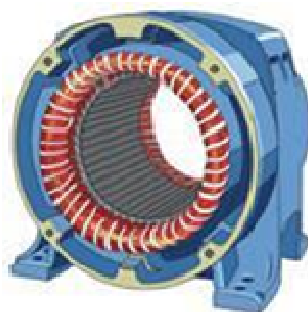


Figure 1.2 : Photo du stator d'une machine asynchrone.

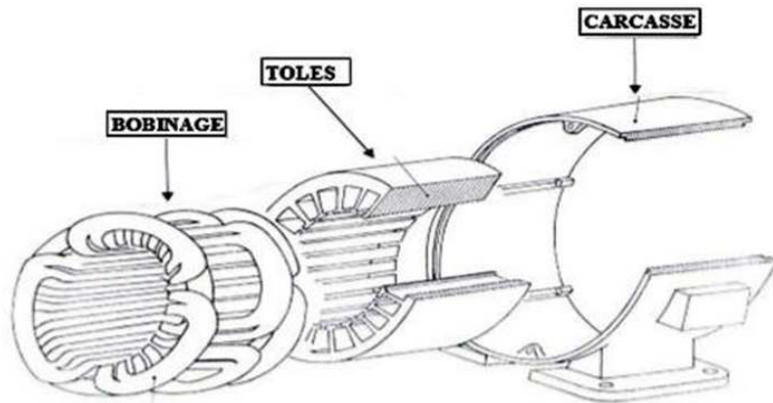


Figure 1.3 : stator d'une MAS démonté

## 1.3.2 Le rotor

Le rotor c'est la partie mobile du moteur asynchrone, monté sur l'arbre moteur se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement.

Il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné.

### a) Le rotor à cage d'écureuil ou rotor en court-circuit

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.

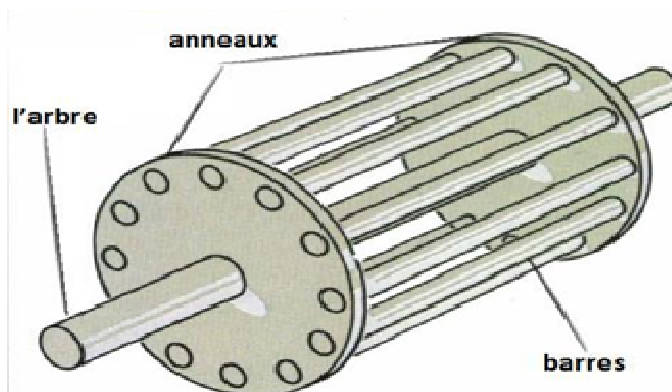


Figure 1.4 : Le rotor à cage d'écureuil

### b) Le rotor bobiné

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités [2].

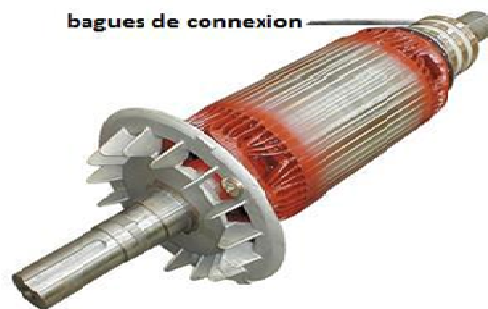


Figure 1.5 : Le rotor bobiné

### 1.3.3 Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. l'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

### 1.3.4 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à l'enroulement primaire et le rotor a l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fournie à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. Lorsque le rotor tourne à une vitesse différente de la vitesse de synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuitée sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [20] :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

Où  $f$  : est la fréquence d'alimentation.

$p$  : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire lorsque  $n \neq n_1$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $n = n_1$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport  $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$  est appelé glissement de la machine asynchrone.

### 1.3.5 Différentes caractéristiques de la machine asynchrone

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique  $B_1$  tournant à la pulsation de synchronisme : [3].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (1.2)$$

$\Omega_s$ : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s.

$\omega_s$  : Pulsation des courants alternatifs en rad/s.

$$\omega_s = 2\pi f \quad (1.4)$$

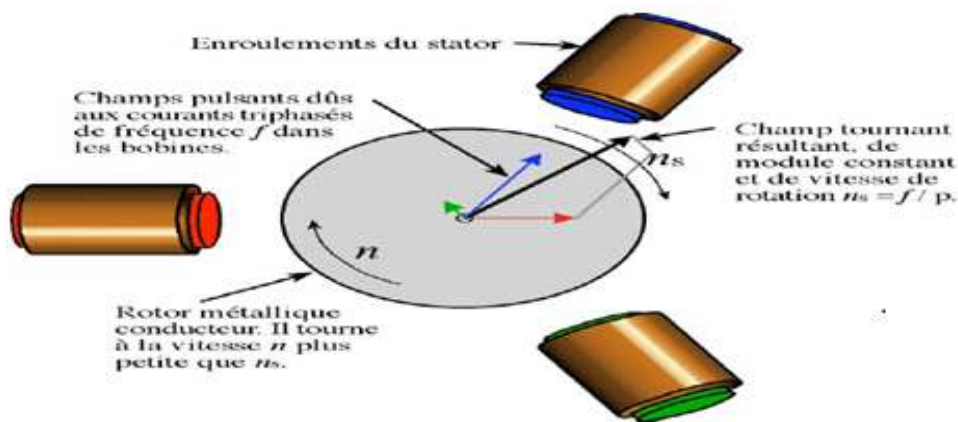


Figure 1.6 : Interaction rotor stator.

- ✓ Le rotor tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ .
- ✓ Des courants induits circulent dans le rotor.
- ✓ L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.
- ✓ Glissement c'est l'écart entre vitesse de rotation et vitesse de synchronisme

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$n_s$  : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s).

$n$  : vitesse de rotation du rotor (tr/s). [1]

$$\Omega_s = 2\pi n_s \quad \text{Et} \quad \Omega = 2\pi n$$

### 1.4 Différents types des moteurs asynchrones

Les différents types de moteurs asynchrones se distinguent généralement par le rotor. Dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même.

#### 1.4.1 Moteur asynchrone à cage

##### 1.4.1.1 Constitution et Principe de fonctionnement

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique,  $N_b \geq 8p$ ), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de

Mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

encoches profondes). [4]

### 1.4.1.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Fiable, robuste, économique	Couplage du flux avec le couple électromagnétique c'est à dire le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.
Simple structure	Complexité fonctionnelle du fait que l'accès direct aux grandeurs rotoriques est impossible
Possède une bonne standardisation	Le réglage du courant rotorique n'est possible qu'à travers le courant statorique.

**Tableau 1.1** : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage.

### 1.4.2 Moteur asynchrone à rotor bobiné

#### 1.4.2.1 Constitution et Principe de fonctionnement

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur les quelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux [1]

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

### 1.4.2.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné

Le moteur asynchrone à rotor bobiné à bagues à l'avantage d'avoir son circuit rotorique bobiné ouvert ce qui permet d'insérer un rhéostat à résistances. Grâce à l'insertion de ces résistances, ce moteur offre les possibilités suivantes :

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Limiter convenablement l'appel de courant au démarrage.	Le collecteur à bagues exclue son emploi dans une atmosphère
Supporter des démarrages de longue durée car la quasi-totalité de l'énergie est perdue dans le rhéostat.	Les risques d'explosion sont présents et rend son entretien un peu délicat.
Adapter le couple moteur au couple résistant de la charge.	

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné.

### 1.5 Défauts des machines triphasées

Nous rappelons brièvement les différents défauts des machines triphasées ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine. [5]

#### 1.5.1 Classification des défauts

Il existe deux types de défauts principaux : **internes** et **externes**. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures (1-7) et (1-8). Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts *internes* de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique...) alors que les défauts *externes* sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique.



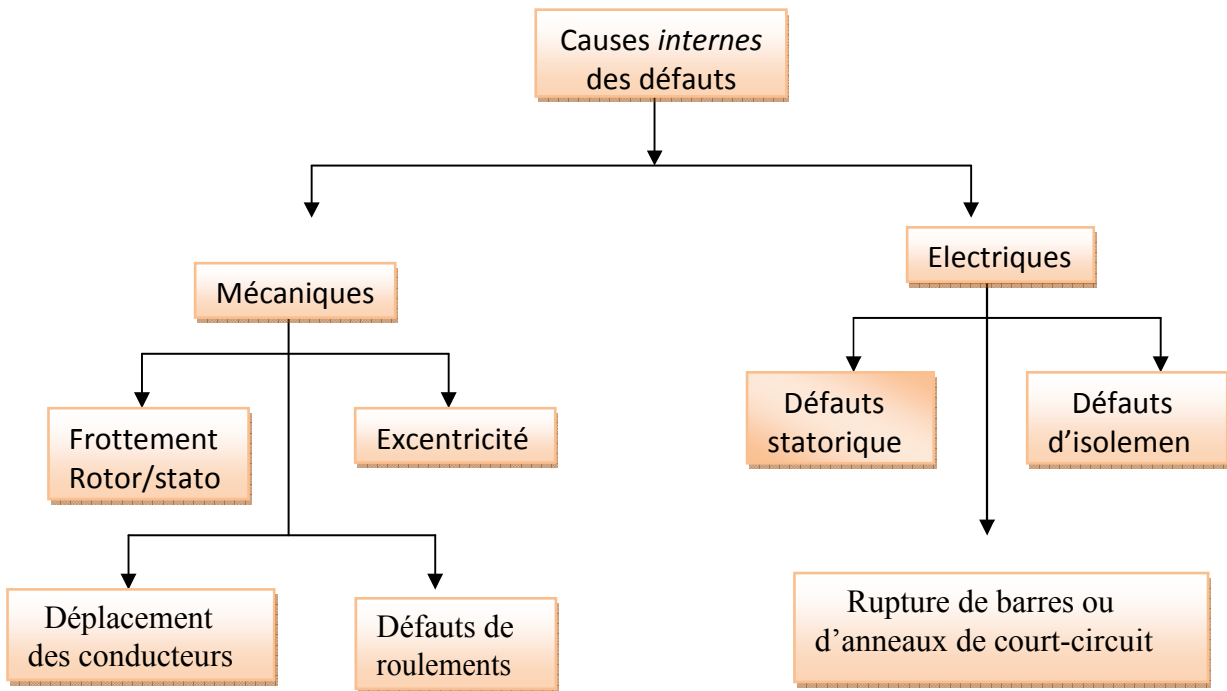


Figure 1.7 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

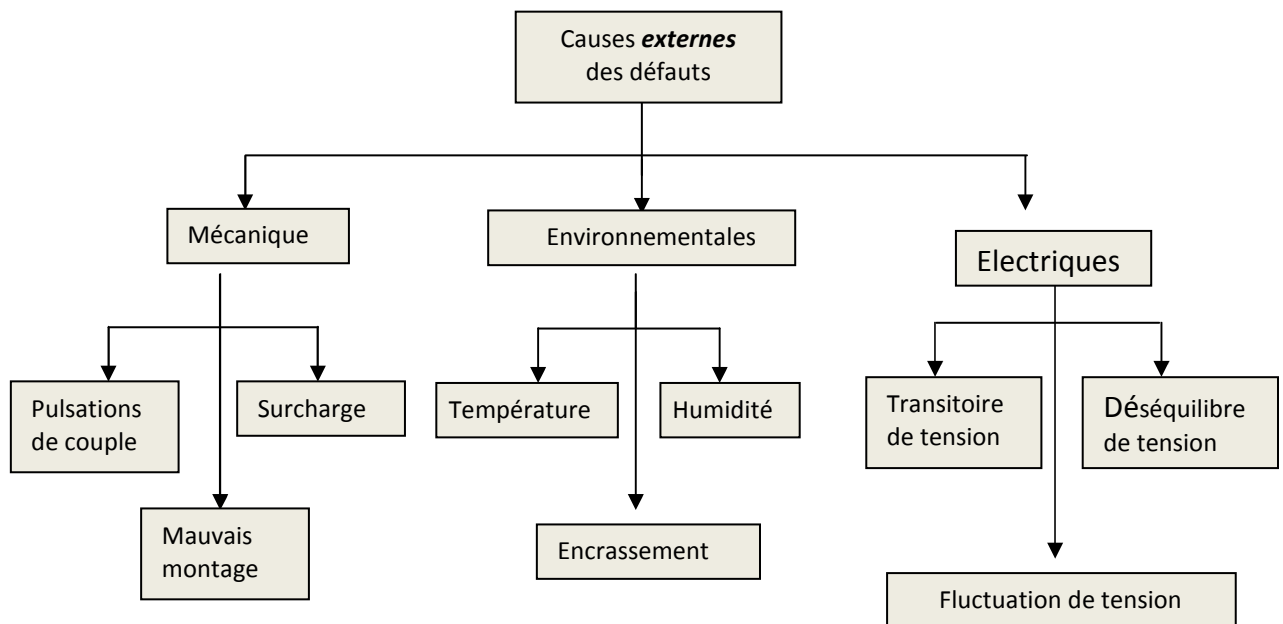


Figure 1.8 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

Au niveau de l'**entrefer**, les défauts se manifestent par une *excentricité* statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation

Du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux.[5]

Les transitoires de tension lié aux perturbations du réseau électrique, les transitoires sont des signaux parasites pouvant atteindre 400 volts (mais généralement plus faible) à des fréquences élevées qui se superposent sur la tension de réseau 50 Hz

### 1.6 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone

L'étude conduite pour établir une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique. [5]

La figure 1.9 présente les phénomènes par deux types de défaut majeur, le défaut statorique et le défaut rotorique.

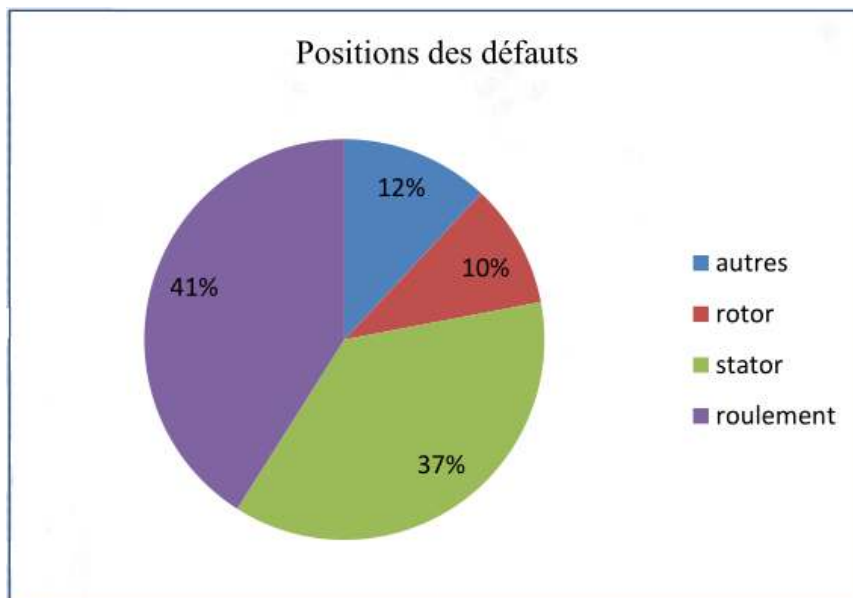
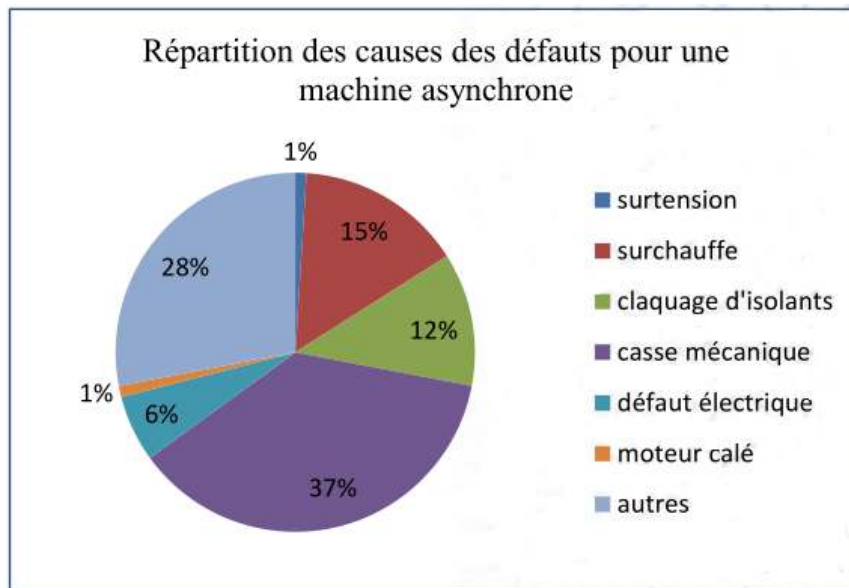


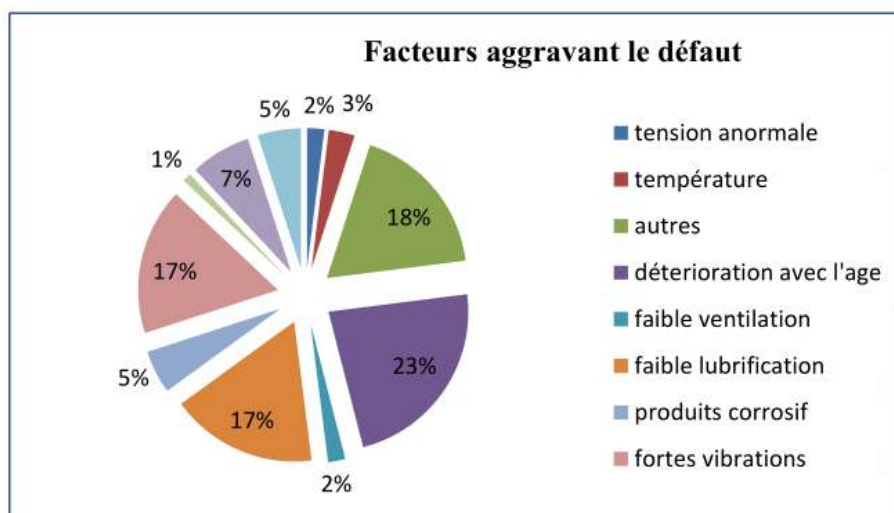
Figure 1.9 : Répartition des défauts.

La figure 1.10 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine : la principale source de défauts provient de la mécanique ; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur ; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.



**Figure 1.10** : Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.

La figure 1.11 précise les conditions qui aggravent le défaut : la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,). En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.



**Figure 1.11** : Facteurs aggravant le défaut.

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branches industrielles ; par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries d'hydrocarbures ou cimentières ou autres.

### 1.7 Principaux défauts liés à la MAS

#### 1.7.1 Le déséquilibre de tension et de courant

Dans un réseau triphasé, on a idéalement des amplitudes égales de la tension et du courant respectivement sur chacune des trois phases et un angle de phase de 120 degrés. Lorsque les tensions ou les courants présentent une différence d'amplitude, il y a déséquilibre et cela peut causer des problèmes pour les équipements triphasés branchés au réseau. 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.

Les déséquilibres de tension surviennent habituellement en présence d'un déséquilibre des charges et de leurs appels de courant. En effet, toute charge triphasée doit appeler un courant identique sur chaque phase. Quant aux charges monophasées branchées à un réseau triphasé, on doit les répartir le plus uniformément possible entre les trois phases. De plus, certains déséquilibres de tension résultent de l'exploitation et de la nature des équipements du réseau électrique. [6]

#### 1.7.2 Ruptures des barres rotoriques

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

#### 1.7.3 Court-circuit au niveau du stator

Pour les défauts court-circuit on peut citer deux types connus [6] :

##### 1.7.3.1 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il a pour origine des défauts liés à l'isolant dans l'enroulement concerné (séparant les spires et la carcasse) ou bien à cause d'une surchauffe de la machine qui endommagera ces mêmes

isolants. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, qui modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotoriques de la MAS.

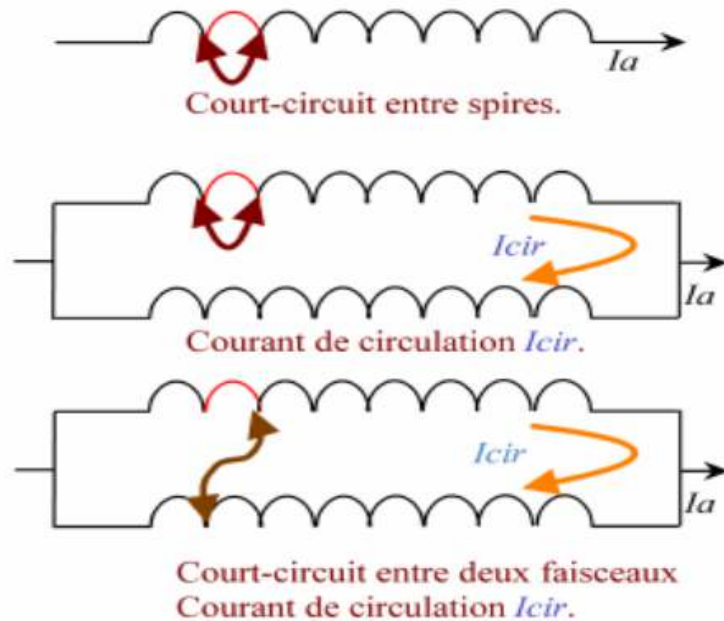


Figure 1.12: Différents courts-circuits entre spires

### 1.7.3.2 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs 11 d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

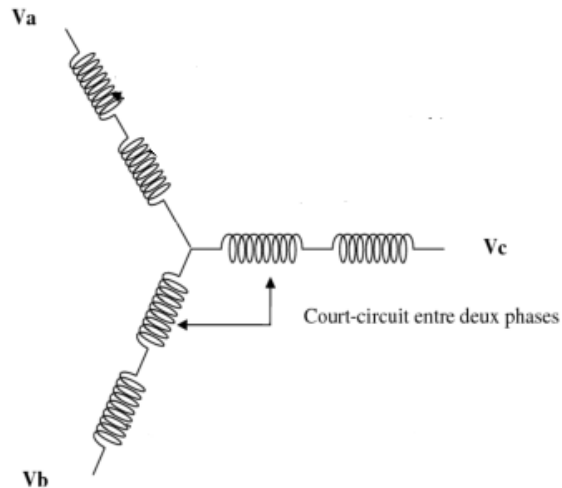


Figure 1.13: Différents courts-circuits entre phases

### 1.8 Effets des défauts électriques sur les courants statoriques

Dans les spectres du courant, il y a la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation et les harmoniques qui peuvent provenir suite au défaut de fabrication de la machine elle-même. Quoique l'on utilise les nouveaux Matériaux actifs et les nouvelles technologies de fabrication on ne peut concevoir la machine idéale. Seulement, dans ce travail de diagnostic le spectre est considéré comme référentiel et toute émergence de nouvel harmonique ou de modifications dans les amplitudes de celles déjà existantes nécessite une interprétation. Ainsi, les anomalies du moteur et des mécanismes qui lui sont accouplés font apparaître aussi des harmoniques correspondants dans le spectre du courant. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques.

#### 1.8.1 Le déséquilibre de tension et de courant

Les défauts de déséquilibre électrique et de mauvais branchement en générale sont détectés par la lecture des fréquences des harmoniques appropriés de la phase du courant statorique. [7]

$$(1.3) \quad f_{\text{dés}} = k \cdot f_s$$

Avec :  $k \in \mathbb{R}^{*+}$  et impaire.

$f_s$  : fréquence d'alimentation statorique.

### 1.8.2 Ruptures des barres

Les harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale  $f_s$  telle que

$$F_{rb} = f_s (1 \pm 2.k.g)$$

Avec :

$k \in \mathbb{R}^{*+}$  et impaire.  $g$  : glissement.

### 1.8.3 Court-circuit au niveau du stator

Les courts circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est :

$$(1.5) \quad f_{cc} = f_s \left[ \frac{n}{p} (1-g) \pm k \right]$$

Avec :

$k \in \mathbb{R}^{*+}$  et impaire  $n \in \mathbb{R}^{*+P}$  : nombre paire de pôle

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établis une description de la machine asynchrone et son principe de fonctionnement (les différents types de moteur à cage, rotor bobiné).

Ensuite nous sommes intéressés par la constitution de la machine asynchrone, son principe de fonctionnement, On a également fait mention une étude statique qui présente les défauts pouvant se produire sur la MAS.

La machine asynchrone qui fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son coût relativement faible, sa robustesse et sa simplicité de construction. Ceci donne à la machine son caractère de processus multi-variables et non linéaire.

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

### 2.1 Introduction

La modélisation de la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié. Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques [8]. Dans ce chapitre, nous nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone, basée sur la méthode des éléments finis.

### 2.2 Formulation des équations de Maxwell

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [30].

#### 2.2.1 Equation de Maxwell-Faraday

Un champ électrique peut induire un champ magnétique. Ce champ induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité.

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}(2.1)$$

#### 2.2.2 Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques.

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}(2.2)$$

#### 2.2.3 Equation de conservation de flux magnétique

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.3)$$



## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

### 2.2.4 Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée [8].

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

Avec :

- $\vec{E}(V.m^{-1})$  Champ électrique,
- $\vec{B}(T)$  Induction magnétique,
- $\vec{H}(A.m^{-1})$  Champ magnétique,
- $\vec{J}(A.m^{-2})$  Densité de courant,
- $\vec{D}(C.m^{-2})$  Induction électrique,
- $\rho(C.m^{-3})$  Charge volumique,
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}(A.m^{-2})$  Densité de courant de déplacement.

- Ces équations s'appliquent quel que soit le milieu.

- Ce sont des équations locales : elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.

- Les distributions de  $\rho$  et  $J$  sont des distributions réelles et sont supposées connues.

- Les grandeurs  $E$  et  $D$ ,  $H$  et  $B$ ,  $J$  et  $E$  ne sont pas (respectivement) indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives [9].

Ces lois, caractéristiques du milieu considéré, traduisent la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont données par l'expérience et ne sont que des approximations. Des relations supplémentaires doivent venir compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels on les appliquera.

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

De telles relations sont appelées équations constitutives, qui dans le cas général s'écrivent sous la forme suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

Avec :

$\mu (H \cdot m^{-1})$       Perméabilité magnétique absolue.

### 2.2.5 Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation

Sur une limite de séparation de deux milieux différents notés 1 et 2, on peut trouver des conditions de continuité du type :

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique  $\vec{B}$ .

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.6)$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique  $\vec{H}$ , si les courants surfaciques  $\vec{j}_s$  existent.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{j}_s \quad (2.7)$$

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique  $\vec{E}$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (2.8)$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique  $\vec{D}$ , si les charges surfaciques  $\vec{\rho}_s$  existent.

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \vec{\rho}_s (2.9)$$

Ici  $\vec{n}$  est le vecteur normal à l'interface dirigé du milieu 1 vers le milieu 2,  $\vec{j}_s$  est la densité surfacique de courant libre à l'interface et  $\vec{\rho}_s$  est la densité surfacique de charge libre à l'interface.

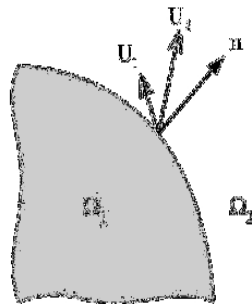


Figure 2.1 : Interface entre deux milieux.

- Ces relations fournissent les lois de réfraction des champs lors du passage d'un milieu à un autre.
- On peut les établir par le calcul en combinant les théorèmes d'analyse vectorielle et les équations de Maxwell aux interfaces.

Il est important de bien garder à l'esprit ces relations, ainsi que les lois globales (théorèmes généraux) énoncées plus haut. On les utilisera pour prédéterminer l'allure des lignes de champ, imposé éventuellement des conditions aux limites, ainsi que pour vérifier les résultats des calculs.

### 2.2.6 Les lois de comportement des milieux

### 2.2.7 Le cas du vide

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (2.10)$$

### 2.2.8 Les milieux conducteurs : la loi d'ohm

On appelle conducteur tout milieu possédant des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique sous l'effet d'un champ électrique [9].

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

Quand un tel milieu est soumis à un champ électrique, les charges électriques (électrons libres dans les métaux) se mettent en mouvement, créant un courant électrique.

Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.11)$$

Qui est l'expression de la loi d'Ohm.

Si le milieu est anisotrope, on aura :

$$\vec{J} = [\sigma] \cdot \vec{E} \quad (2.12)$$

Avec  $[\sigma]$  : tenseur de conductivité électrique.

Un conducteur parfait est un milieu fictif tel que  $\sigma \rightarrow \infty$ . Dans un tel conducteur,  $\vec{E}$  est nul. A l'inverse, un isolant parfait est un milieu dans lequel la conductivité électrique est nulle :  $\sigma = 0$ .

L'expression locale de la loi d'ohm est donnée comme suit :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \overrightarrow{J_{eddy}} \quad (2.13)$$

$$\overrightarrow{J_{eddy}} = \sigma \vec{E} \quad (2.14)$$

$\sigma (S \cdot m^{-1})$  Conductivité électrique.

$\vec{J}_s (A \cdot m^{-1})$  Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation.

$\overrightarrow{J_{eddy}} (A \cdot m^{-1})$  Densité de courant de Foucault.

### 2.2.9 Comportement magnétique des matériaux

Sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante. Quel que soit le milieu, on écrit par définition (dans le système M.S.K.A) :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.15)$$

Où M est la vectrice intensité d'aimantation (A/m).

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

### 2.2.10 Comportement diélectrique des matériaux

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (2.16)$$

Avec :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$\varepsilon_0 (F \cdot m^{-1})$  Permittivité électrique du vide.

$\varepsilon_r$  Permittivité électrique relative du milieu.

$\varepsilon (F \cdot m^{-1})$  Permittivité électrique absolue.

Avec, dans le système d'unités M.S.K.A :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

Et

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1 \quad (2.17)$$

Où  $c$ 'est la vitesse de la lumière dans le vide, soit

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\text{Donc : } \varepsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{F}{m}$$

### 2.3 Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques sont nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps. On s'intéresse aux grandeurs  $\vec{H}$  et  $\vec{B}$ .

On obtient alors les équations de Maxwell qui se réduisent à :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.18)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.19)$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié ou bien par des aimants permanents. Dans ce dernier cas, on dispose de la loi :

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \mu_0\vec{M}(2.20)$$

Dans le cas où la densité de courant surfacique est nulle, la relation (Eq II.18) implique qu'il existe une fonction potentiel scalaire magnétique  $\Phi$  telle que :

$$\vec{H} = -grad\Phi(2.21)$$

On obtient donc l'équation :

$$div(\mu grad \Phi) = div\vec{B}(2.22)$$

### 2.4 Modèle magnétostatique vectoriel

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

Le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  est alors nul et les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$  sont découplés. Par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls.

On obtient alors les équations suivantes :

$$rot\vec{H} = \vec{J}(2.23)$$

$$div\vec{B} = 0(2.24)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \mu_0\vec{M}(2.25)$$

La condition (3.24) permet de définir une fonction potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  telle que :

$$\vec{B} = rot\vec{A}(2.26)$$

Pour que  $\vec{A}$  soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition :

$$div\vec{A} = 0(2.27)$$

Qui est la plus simple à mettre en œuvre. Mais cette condition, appelée jauge de Coulomb, n'est pas toujours la meilleure et peut être adaptée afin d'éviter quelques difficultés numériques auxquelles elle peut conduire.

On obtient donc l'équation vectorielle de Poisson :

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.28)$$

Pour simplifier, nous allons nous restreindre pour cette étude au cas bidimensionnel. Ainsi, les systèmes considérés, possèdent une symétrie par translation suivant la troisième dimension ou une symétrie d'axe de révolution.

Dans les deux cas, la direction de la vectrice densité de courant  $\vec{J}$  doit être perpendiculaire au plan d'étude. Le problème reste donc invariant suivant l'axe oz dans les coordonnées  $(x, y, z)$ , ou suivant la révolution d'axe oz dans les coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ .

Dans le calcul suivant, nous ne considérons que le cas d'un système à symétrie par translation, le champ magnétique, présente alors deux composantes suivant les axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$ , dans un plan perpendiculaire à  $\vec{z}$ , impliquant ainsi qu'une seule composante pour le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  suivant la direction  $(z)$ , qu'on désigne par  $A_z(x, y)$ .

### 2.4.1 Coordonnées cartésiennes

Pour un modèle 2D plan décrit dans le système de coordonnées cartésiennes:  $B_z = 0$ . Ainsi, le potentiel vecteur est défini par :

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

La densité de courant statorique est définie par :

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Sachant que :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

L'induction magnétique  $\vec{B}$  contient une composante dans la direction x et une composante dans la direction y :

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} \quad (2.32)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.33)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.34)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.35)$$

Pour toutes les régions, les équations sont :

$$\vec{H}_x(x, y) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A_z(x, y) \quad (2.36)$$

$$\vec{H}_y(x, y) = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A_z(x, y) \quad (2.37)$$

Nous obtenons l'équation générale de Helmholtz à résoudre dans les différentes régions conductrices de la machine asynchrone à cage d'écureuil :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.38)$$

Avec :  $\mu = \mu_0 \mu_r$

L'équation (3-38) peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle partielle :

$$-\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_z(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z(x, y) \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.39)$$

### 2.5 Condition aux limites

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites :

#### 2.5.1 Condition de Dirichlet

L'inconnue prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types :

##### a) Dirichlet homogène

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro :  $A=0$ .

##### b) Dirichlet non homogène

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite et sa valeur est non nul :  $A \neq 0$ .



## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

### 2.5.2. Condition de Neumann

La valeur du gradient sur les bords du domaine de résolution est connue. On distingue deux types :

#### a) Neumann homogène

Le dérivé par rapport à la normal de l'inconnu est nulle:  $\frac{\delta A}{\delta n} = 0$ .

$\vec{n}$ : Vecteur normale a la limite.

Ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaires à la limite.

#### b) Neumann non homogène

Dans ce cas,  $\frac{\delta A}{\delta n} = cte \neq 0$  ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnue forment un angle  $\alpha$  avec la limite.

## 2.6 Application des équations de Maxwell à la MAS à cage

En tout rigueur, tout système électromagnétique est tridimensionnel (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associé à une approximation dans la direction orthogonal conduit à l'étude d'un system bidimensionnel (2D) dans le cadre de cette formulation magnétostatique en cartésien (2D) et en supposons le system étudié excité à partir d'une densité de courant  $\vec{J}_z$  dirigé selon l'axe (oz) « il en sera de même pour le potentiel magnétique  $A_z$  qui sera un scalaire », les équations de Maxwell conduisent finalement à :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (2.40)$$

Les équations à résoudre dans les MAS à cage sont :

1. Au niveau des barres rotoriques

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\mu_0 \mu_{r_{\text{barresrotoriques}}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_{br} \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.41)$$

2. Au niveau de rotor :

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\mu_0 \mu_{r_{\text{rotor}}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_r \right] = 0 \quad (2.42)$$

3. Au niveau d'entrefer :

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_e \right] = 0 \quad (2.43)$$

4. Au niveau des encoches statoriques :

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_{es} \right] = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (2.44)$$

5. Au niveau du stator :

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\mu_{\text{stator}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_s \right] = 0 \quad (2.45)$$

### 2.7 Méthodes de résolution

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des équations aux dérivées partielles, ces méthodes sont analytiques, numériques ou mixtes (semi analytiques).

#### 2.7.1 Méthodes analytiques

Ce sont les premières méthodes utilisées. Elles sont d'emploi restreint à des géométries simples dans une approche unidimensionnelle, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels. La méthode analytique la plus puissante et la plus couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles est la méthode de séparation des variables. Le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable.

Soit en coordonnées cartésiennes, l'inconnue  $A_z(x, y)$ , qui est écrit comme suit :

$$A_z(x, y) = A_z(x) \cdot A_z(y) \quad (2.46)$$

$A_z(x, y)$  : Solution de l'équation différentielle aux dérivées partielles considérée de sorte que :

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

$A_z(x)$  : est une fonction ne dépend que de la variable  $x$ .

$A_z(y)$  : est une fonction ne dépend que de la variable  $y$ .

### 2.7.2 Méthode des éléments finis

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960.

En 1970, Sylvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'Electrotechnique [10].

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques [11].

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques [12].

#### 2.7.2.1 La méthode des résidus pondérés

Si on prend l'exemple d'une équation différentielle de type Laplacien :

$$L(\Phi) = 0 \quad (2.47)$$

Sachant que :

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

L : Laplacien.

$\Phi^*$  : La solution exacte.

$\Phi$  : La solution approximative

Le résidu est:

$$R = L(\Phi) - L(\Phi^*) \quad (2.48)$$

Cette méthode donc consiste à minimiser le résidu  $R = 0$ .

### 2.7.2.2 La méthode variationnelle

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Pour la mise en œuvre de la méthode, il faut suivre les étapes suivantes :

- Le maillage (discrétisation du domaine).
- Choix de la fonction d'interpolation.
- Choix de la fonctionnelle.
- La minimisation : c'est-à-dire mettre le système sous la forme

$$[k] \cdot [u] = [B] \quad (2.49)$$

- Résolution du système algébrique.
- Exploitation des résultats [13].

## 2.8 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 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques [14].

### 2.9 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.

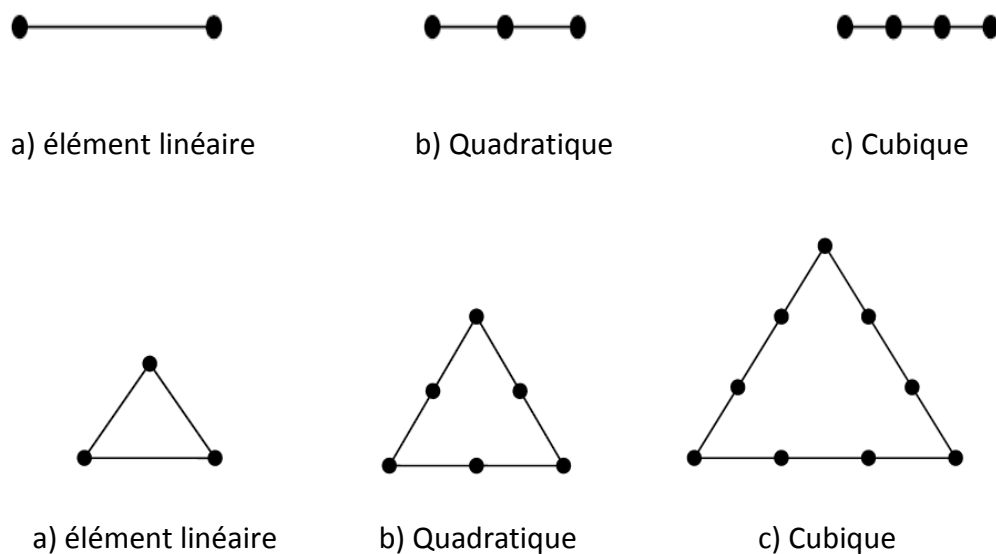


Figure 2.2 : Eléments classiques en une et deux dimensions.

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 [11].

### 2.10 Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage.

Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul [15].

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres [16].

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse par éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines [17].

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

### 2.11 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [12]

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage.
- Résolution.
- Exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées. Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une Méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

---

sources externes. C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux-2D

### 2.11.1 Logiciel de simulation flux-2d

C'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 [8].

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 [18]. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [12], [14]:

#### 2.11.1.1 Module préprocesseur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

#### 2.11.1.2 Module processeur

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER\_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

#### 2.11.1.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro\_2D)

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.

## CHAPITRE 2 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (2.3).

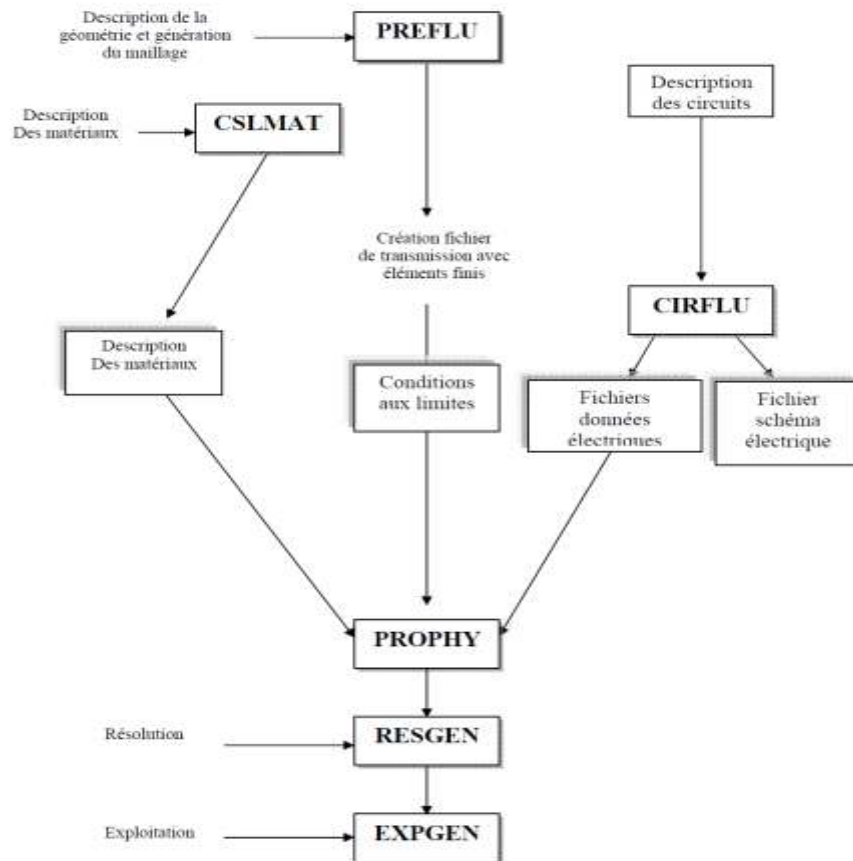


Figure 2.3 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples [12] :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D.



### 2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au modèle magnétostatique qui permet de calculer la distribution du champ magnétique et les performances électromagnétiques en régime permanent d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le choix d'une formulation 2D en termes de potentiel vecteur magnétique est dû au fait, comme cela a été signalé, qu'elle permet de calculer la distribution du champ magnétique en présence des courants électriques. Pour résoudre l'équation de la magnétostatique, nous avons présenté la formulation éléments finis basée sur la méthode de Galerkin qui permet d'aboutir à un système algébrique symétrique, donc plus simple à résoudre.

### 3.1 Introduction

La résolution du système d'équation issu de la discrétisation par les éléments finis, permet de calculer le potentiel vecteur en chaque nœud du maillage. Dans cette partie, nous allons étudier la machine dans les deux cas de fonctionnement : dans le cas d'une machine saine (sans défaut) et avec deux défauts ( déséquilibre de réseau et court-circuit)

### 3.2 Application et simulation de la MAS

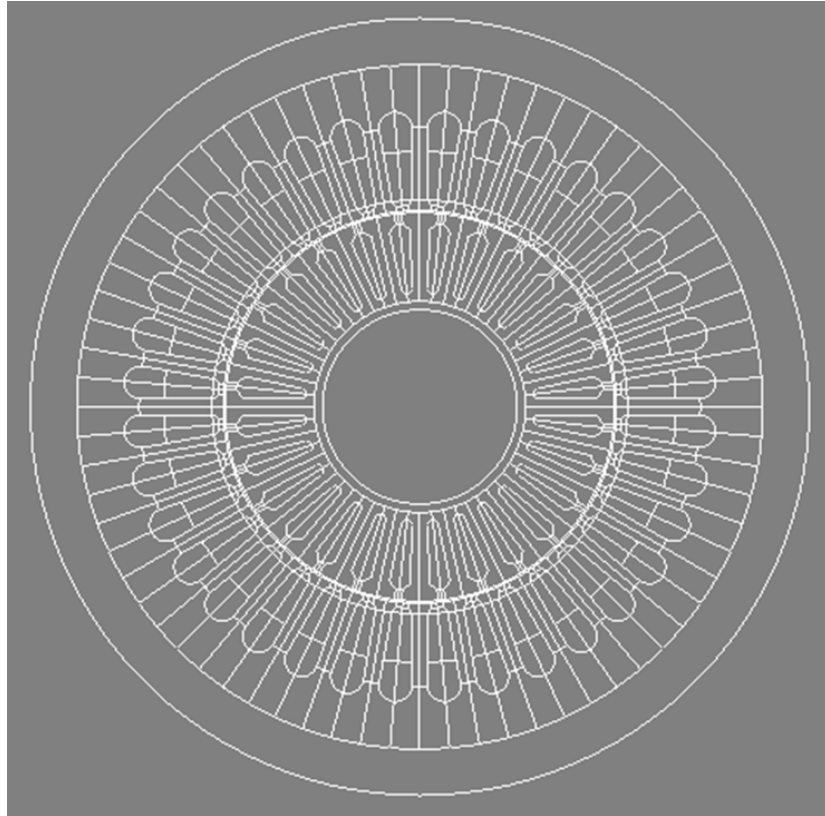
On obtient une machine asynchrone à partir de rembobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

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	28	

Tableau 3.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone

#### 3.2.1 Description de la géométrie

Le domaine de la machine étudiée est réduit par l'utilisation des symétries existantes et la définition d'une limite à l'infini. Ensuite, le système réduit est décrit par des régions surfaciques délimitées par des lignes s'appuyant sur des points définis par l'utilisateur. Une région particulière est la bande de roulement Située dans l'entrefer de la machine, elle permet de modifier la position angulaire du rotor par rapport au stator pendant la résolution en évitant tout remaillage par l'utilisateur; elle seule est remaillée automatiquement à chaque nouvelle position angulaire. Son utilisation permet une diminution significative du coût de calcul des simulations des régimes transitoires, à vitesse de rotation non nulle, décrits par la formulation magnétoévolutive.



**Figure 3.1** : La géométrie de la machine asynchrone

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la (figure3.2)



(a)

(b)

**Figure 3.2** : Dimension des encoches

**a)** l'encoche statorique,

**b)** l'encoche rotorique

La (figure3.3) définir le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine.

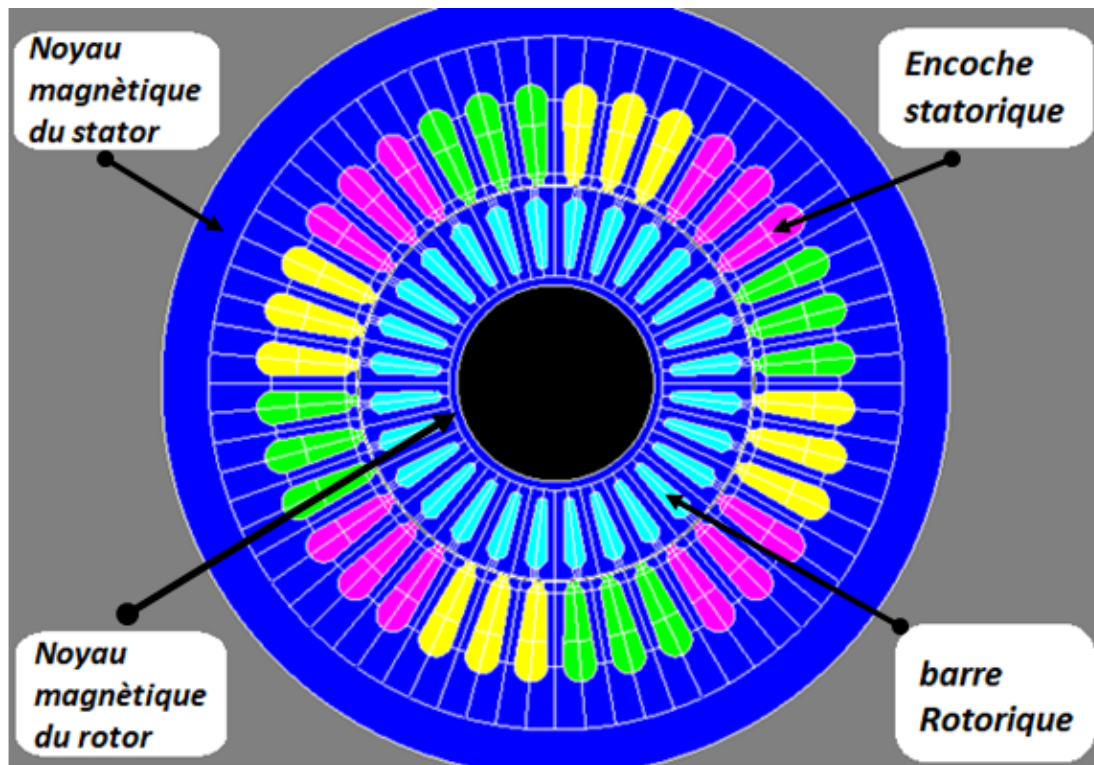


Figure 3.3 : Affectation des régions superficielles

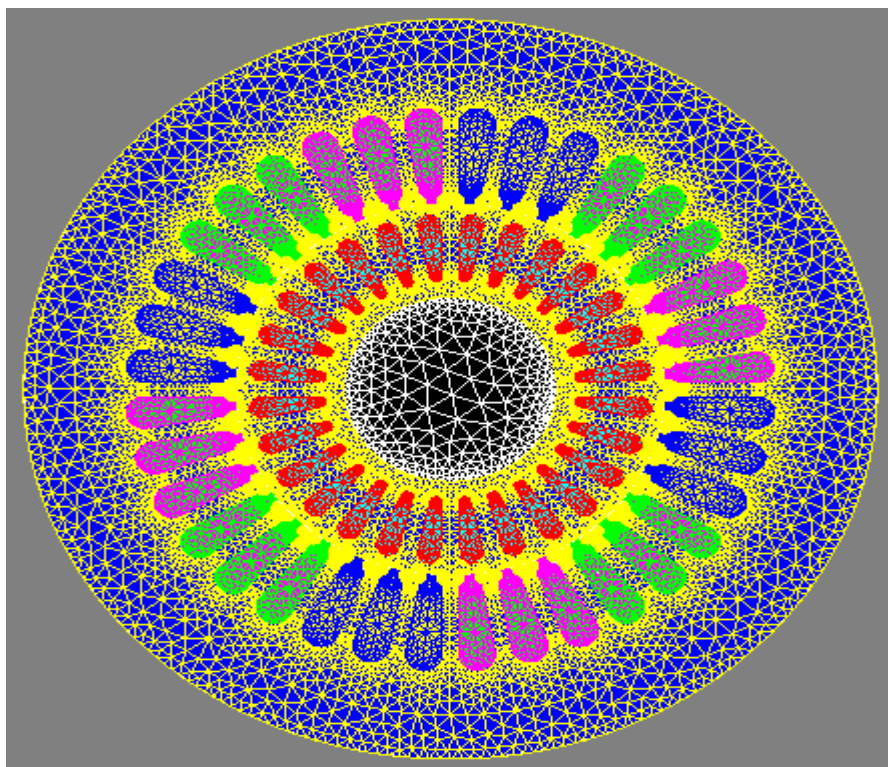
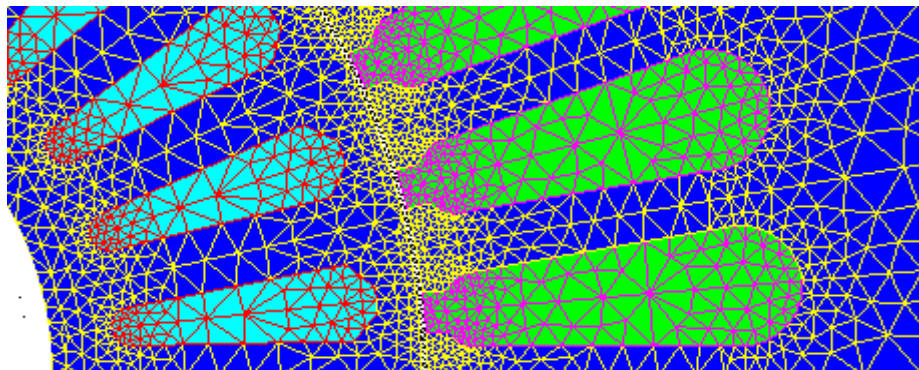


Figure 3.4 : discrétisation des maillage



**Figure 3.5** : 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.

### **3.3 Structures des bobinages d'une MAS**

Pour identifier la méthode de bobinage dans le logiciel Flux généraliste consiste à rassembler les régions géométriques correspondant à une phase et à leur affecter un composant du circuit externe. On indique alors le sens des conducteurs et le nombre de spires traversant la région.

Les bobinages répartis dans les encoches d'une MAS sont habituellement de type imbriqué ou ondulé à double couche, avec un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Le bobinage de type ondulé est employé principalement au rotor, pour diminuer le nombre d'interconnexions entre les groupes de bobines qui sont montées sur une partie tournante. Le pas des bobines (ou pas du bobinage) est dit fractionnaire, ou raccourci par rapport au pas polaire, pour réduire le contenu harmoniques de la FMM produite comme nous le verrons plus loin. Le raccourcissement du pas réduit également la longueur des têtes de bobine et en conséquence la résistance de phase sauf pour le bobinage de type ondulé [85]. Il est possible de concevoir un bobinage à simple couche à pas raccourci, mais cela nécessite des longueurs différentes entre les têtes des bobines de la même phase. Des bobinages à simple couche semblent être utilisés au rotor des MAS par l'industrie. [8]



### CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La Figure 3.6 représente deux pas polaires uniquement, on y voit aussi la manière dont il est logé dans les encoches. Les bobines de la même phase qui se trouvent côte à côte forment un groupe de bobines qui constitue un pôle magnétique de la phase concernée.

Les bobines appartenant à un même groupe sont généralement connectées en série comme dans le cas de la Figure suivante :

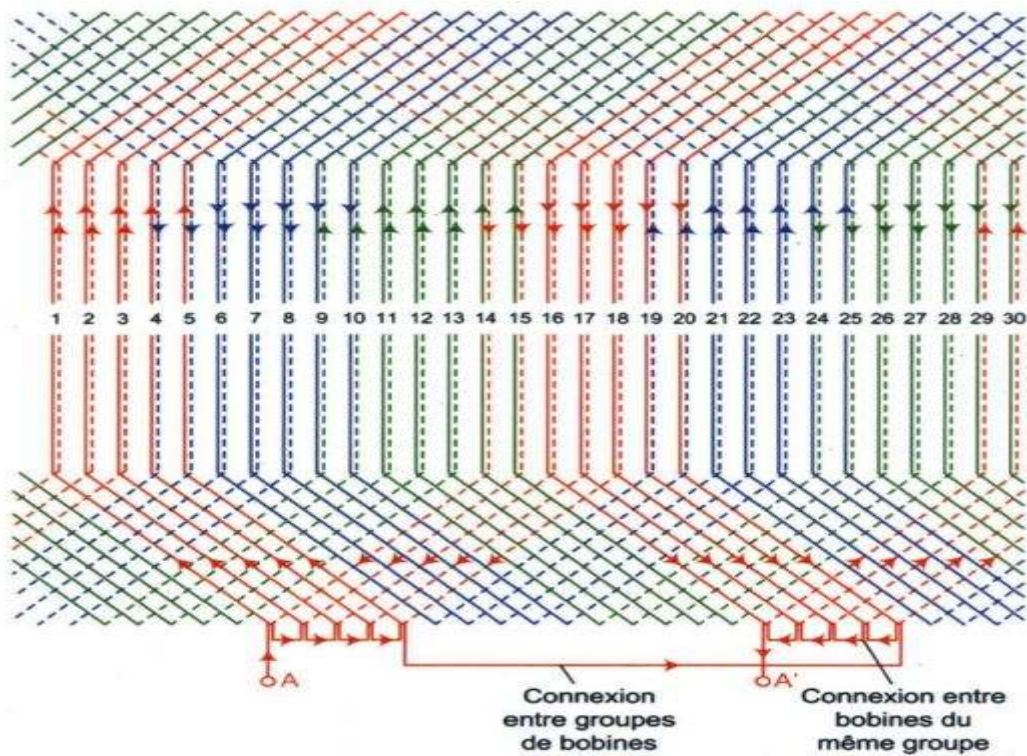


Figure 3.6 : Bobinage triphasé représente deux pas polaires

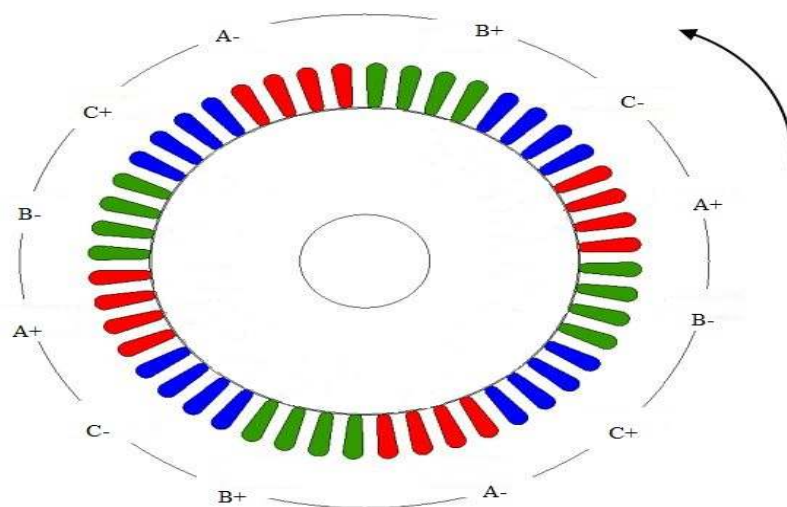


Figure 3.7 : Répartition du bobinage statorique

### 3.3.1 Matériaux conducteurs

Pour les conducteurs statoriques, on supposera qu'ils se repartissent de façon uniforme dans les encoches, on affectera à cette région la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements, le foisonnement et le nombre de spires par encoche. Au niveau de rotor,

nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe [13].

### 3.3.2 Matériaux magnétiques

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau 3.2 )

Point number	H (A/m)	B (Tesla)
1	0.00	0.00
2	129.50	0.50
3	243.25	1.10
4	1850.00	1.60
5	3700.00	1.70
6	9900.00	1.85
7	22100.00	2.00
8	43000.00	2.10

Tableau 3.2 : B(H) du matériau magnétique STEEL\_NLIN [42assim]

La courbe B(H) du circuit magnétique est représentées ci-dessous.

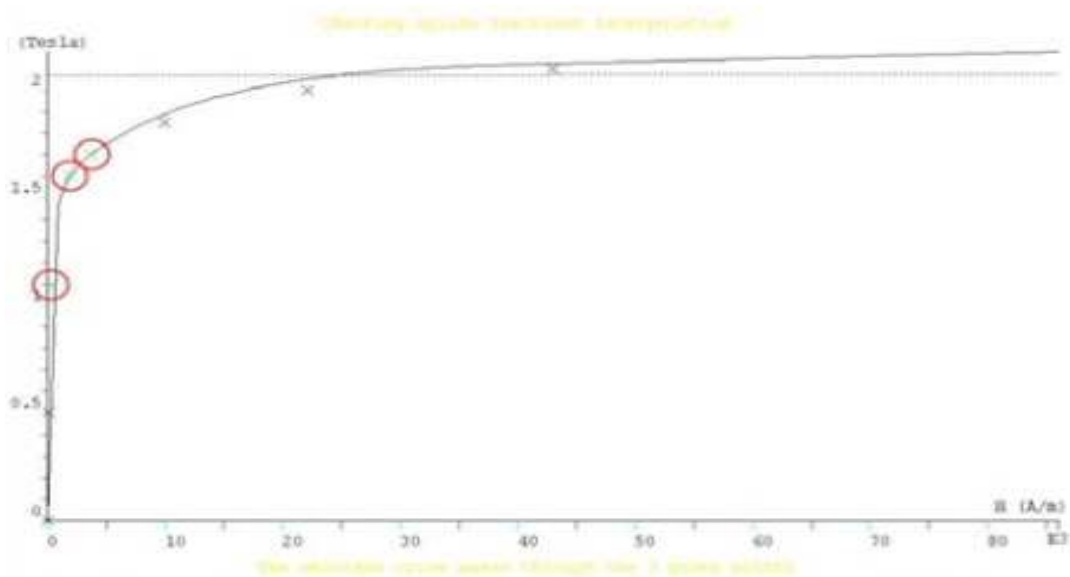


Figure 3.8 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL\_NLIN

### 3.3.3 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 3.9) , 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).

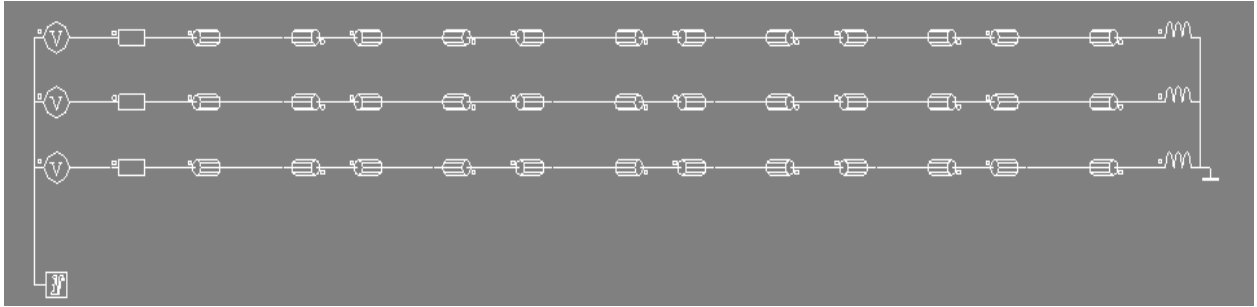


Figure 3.9 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie

**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.

### 3.4 Résultats de simulation par la magnétodynamique

#### 3.4.1 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 [8] :

#### 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.
- 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



## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

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 vitesses 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 est égal à la valeur moyenne. "La position initiale" du rotor représente des données d'entrée pour le processeur de SOLVER\_2D de Flux2D®.

### 3.5 Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure 3.10) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure 3.11)

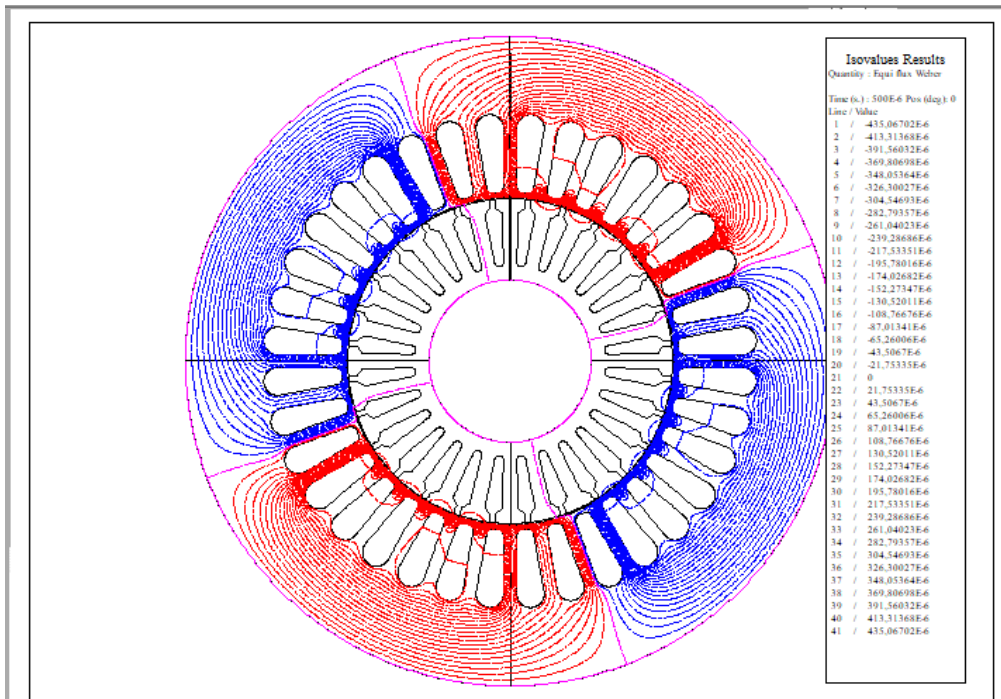


Figure 3.10 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal

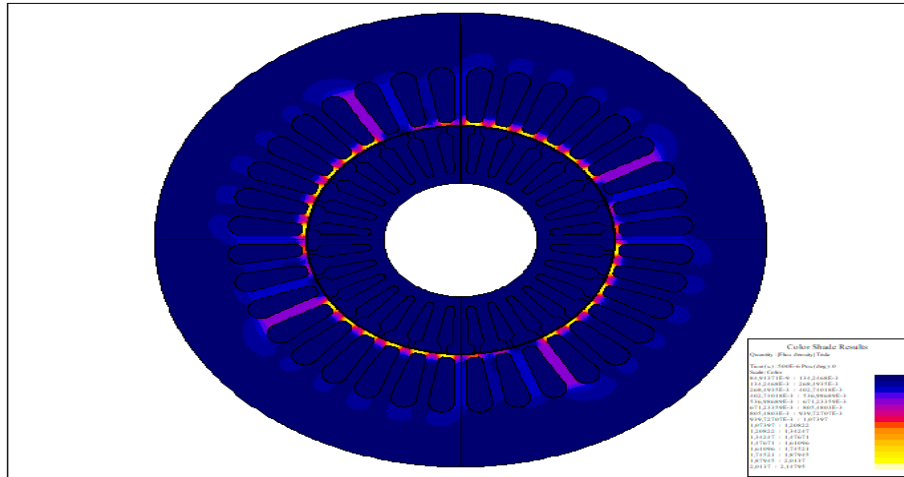


Figure 3.11 : Induction magnétique pour le fonctionnement nominal

Nous remarquons bien la présence deux paire de pôles. La figure 3.10 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 3.10 est, elle aussi, quasi-symétrique.

### 3.6 Simulations des comportements de la MAS

#### 3.6.1 Fonctionnement sain de la Machine asynchrone

Nous avons présenté l'évolution des grandeurs locales (les lignes du champ magnétique, l'induction magnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse). Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine saine, a donné les résultats suivants :

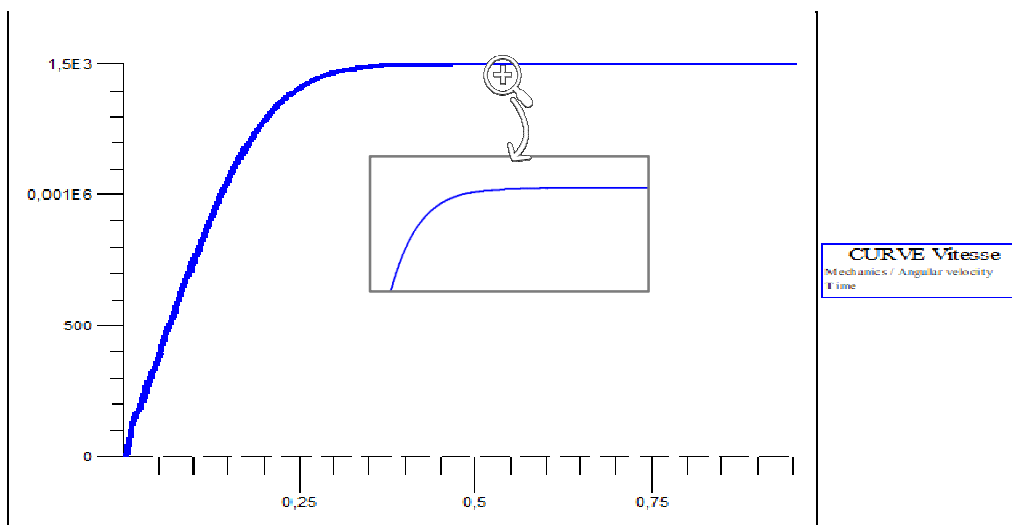
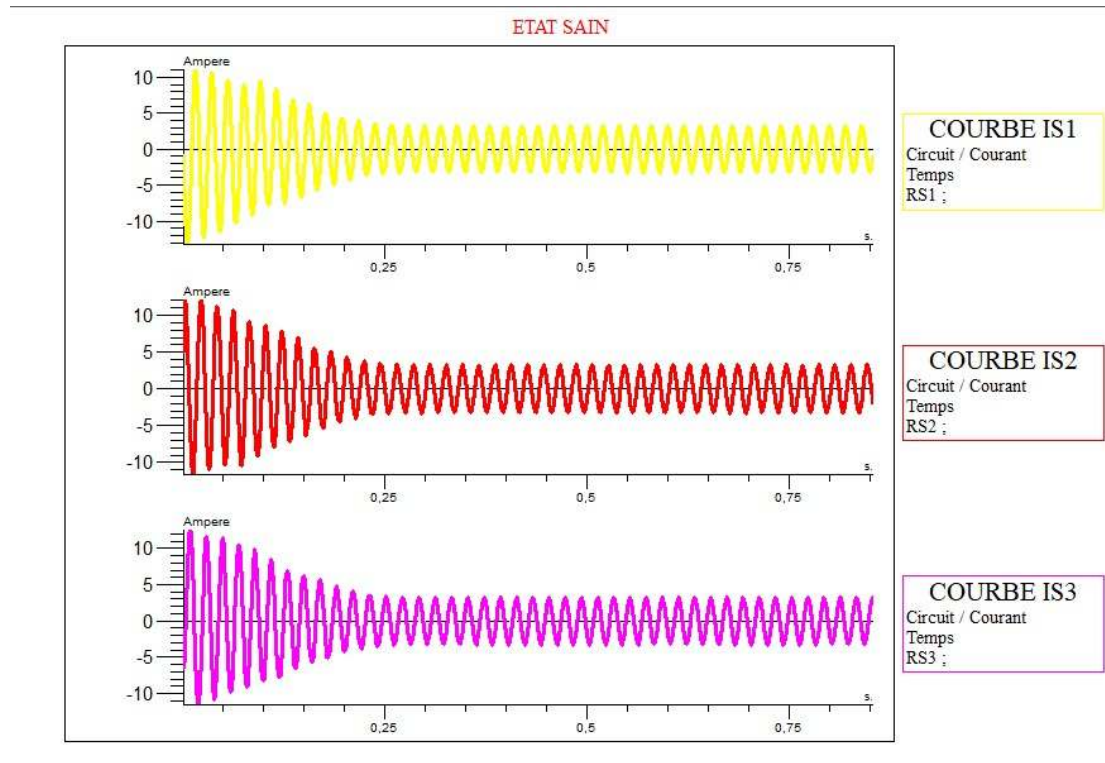
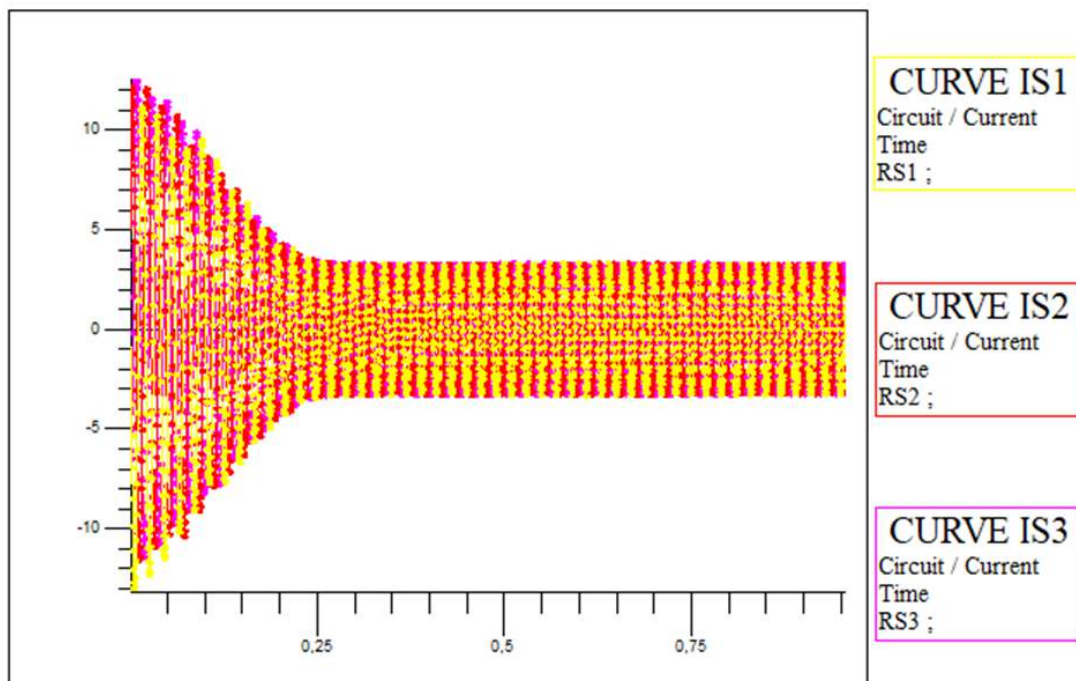


Figure 3.12 : Vitesse de rotation

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE



**Figure 3.13 :** Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3



**Figure 3.14 :** Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

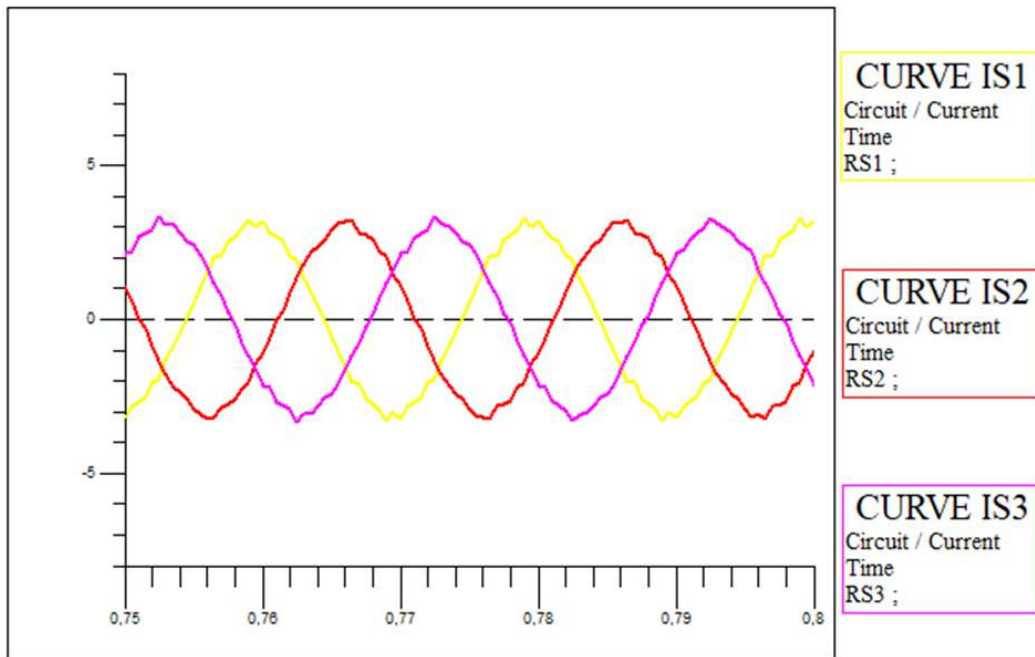


Figure 3.15 : Zoom des Courants statoriques supprimé au niveau des résistances ; R-1 ,R-2, R-3

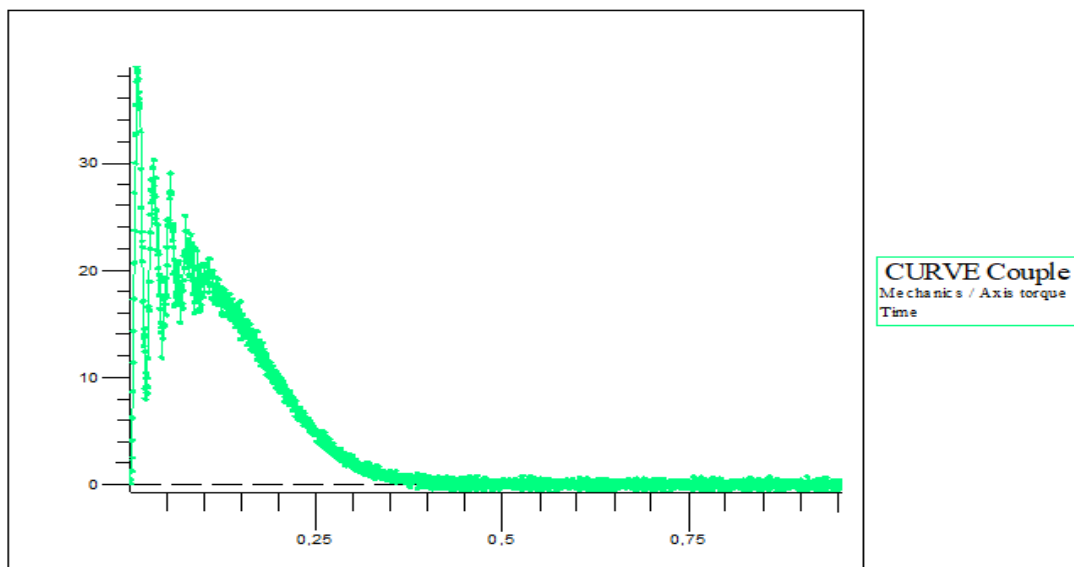


Figure 3.16 : Couple électromagnétique

### 3.6.1.1 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 3.13 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 durera

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

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 nulle en régime permanent

### 3.6.2 Fonctionnement en Tension déséquilibré

Pour d'écrire le comportement de la machine asynchrone à double alimentation avec un défaut de déséquilibre dans la phase (a)

( $V_a=280\text{ v}$  ;  $V_b=380\text{ v}$  ;  $V_c=380\text{v}$ )

on a obtenu les résultats suivants.

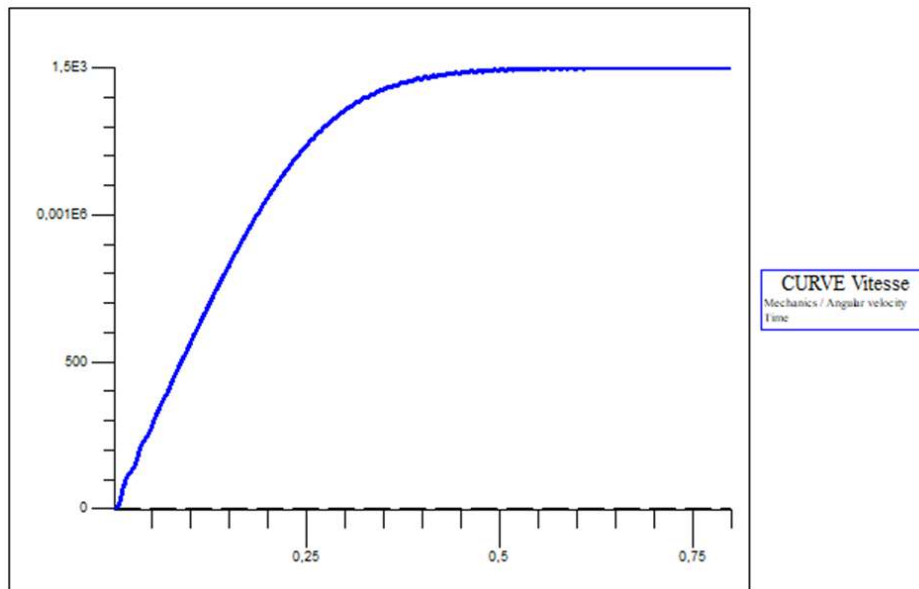


figure 3.17 : la vitesse de rotation en cas de déséquilibre

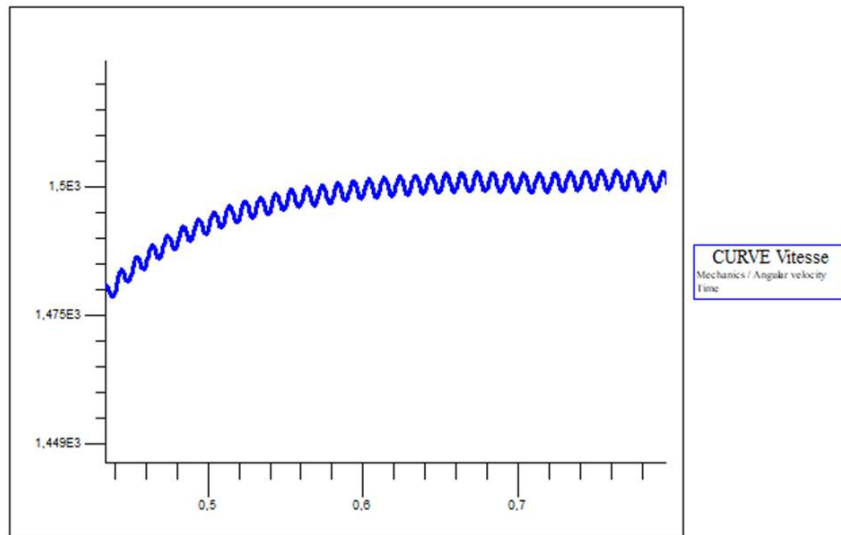


figure 3.18 : zoom de la vitesse de rotation en cas de déséquilibre

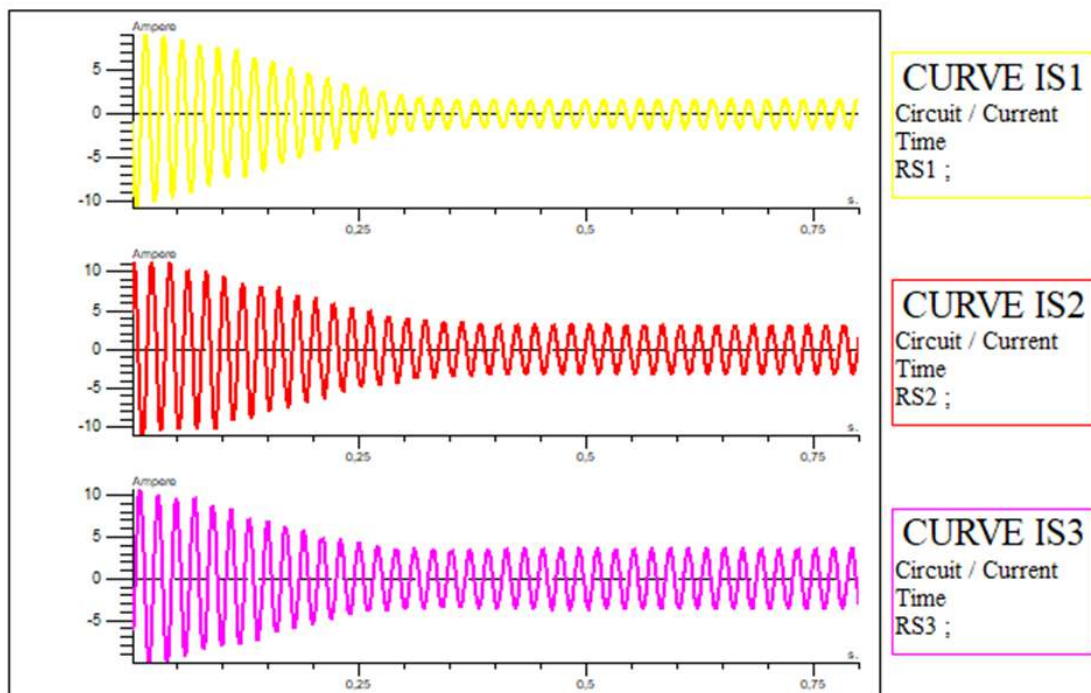


Figure 3.19 : Les Courants statoriques juxtaposé en cas de déséquilibre

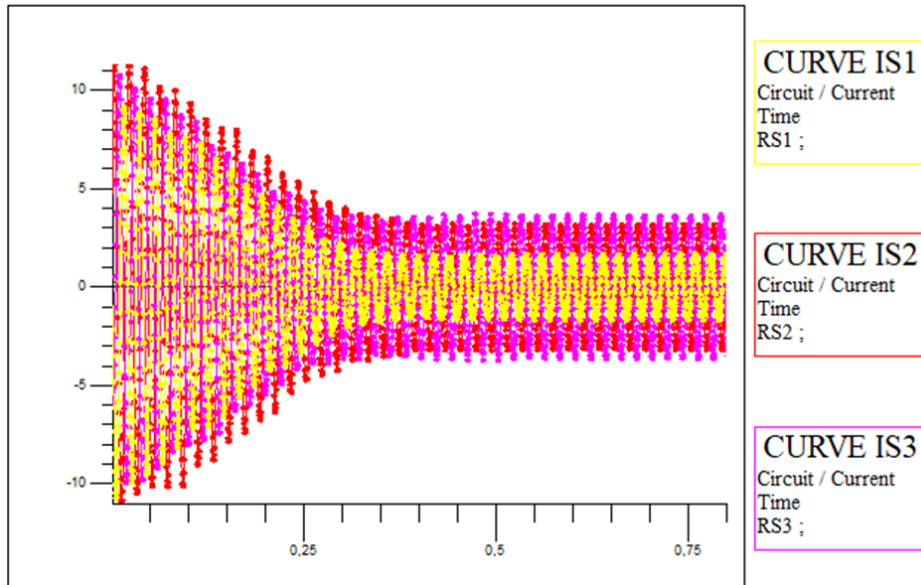


figure 3.20 : Les Courants statoriques superposé en cas de déséquilibre

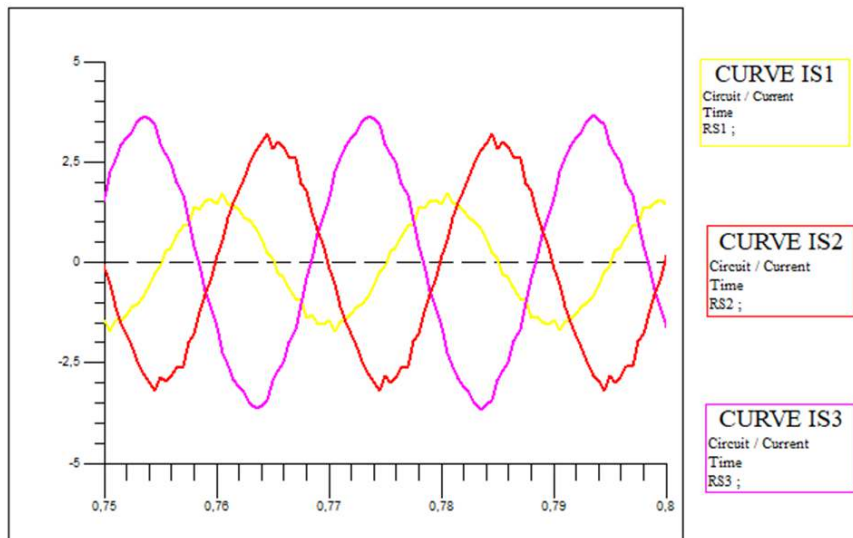


figure 3.21 : Zoomdes Courants statoriques superposéen en cas de déséquilibre



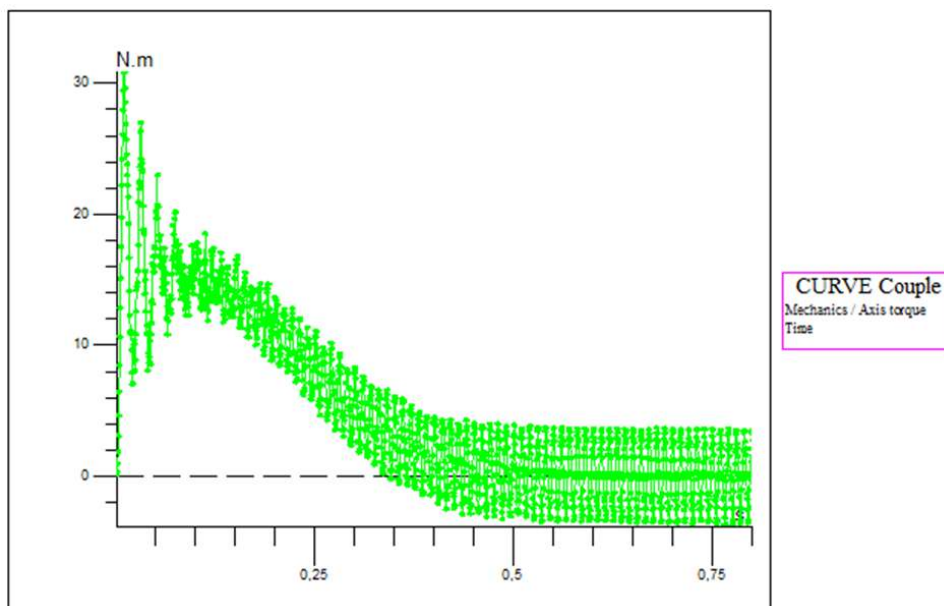


figure 3.22 : Le Couple électromagnétique en cas de déséquilibre

### 3.6.2.1 Interprétation

Dans le cas de démarrage à vide, on constate un fort appel de courant statorique pour créer un couple de démarrage qui s'élève à une valeur maximale de 100 N.m. L'oscillation du couple est l'élément marquant pendant le régime transitoire

(le régime transitoire jusqu'à 0,25 s), à cause de l'échange d'énergie électromagnétique entre le stator et le rotor.

Les oscillations du couple se font ressentir sur l'évolution de la vitesse qui oscille légèrement en régime transitoire avant de stabiliser à environ 1500 tr/min

Lorsque la vitesse de rotation atteint la vitesse de synchronisme, le couple électromagnétique commence à décroître jusqu'à 0 N.m, cette baisse est due à la diminution des courants statorique et rotorique. Au régime déséquilibré on remarque une augmentation des courants statorique au niveau du 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> phase à cause de la diminution de la tension dans la 1<sup>ère</sup> phase, cette perturbation crée des oscillations au niveau du couple électromagnétique et la vitesse de rotation au niveau du régime permanent.

On constate aussi qu'il y a une variation sinusoïdale des courants rotorique, à cause de changement des courants statorique 'induction magnétique'



## 3.6.2.2 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

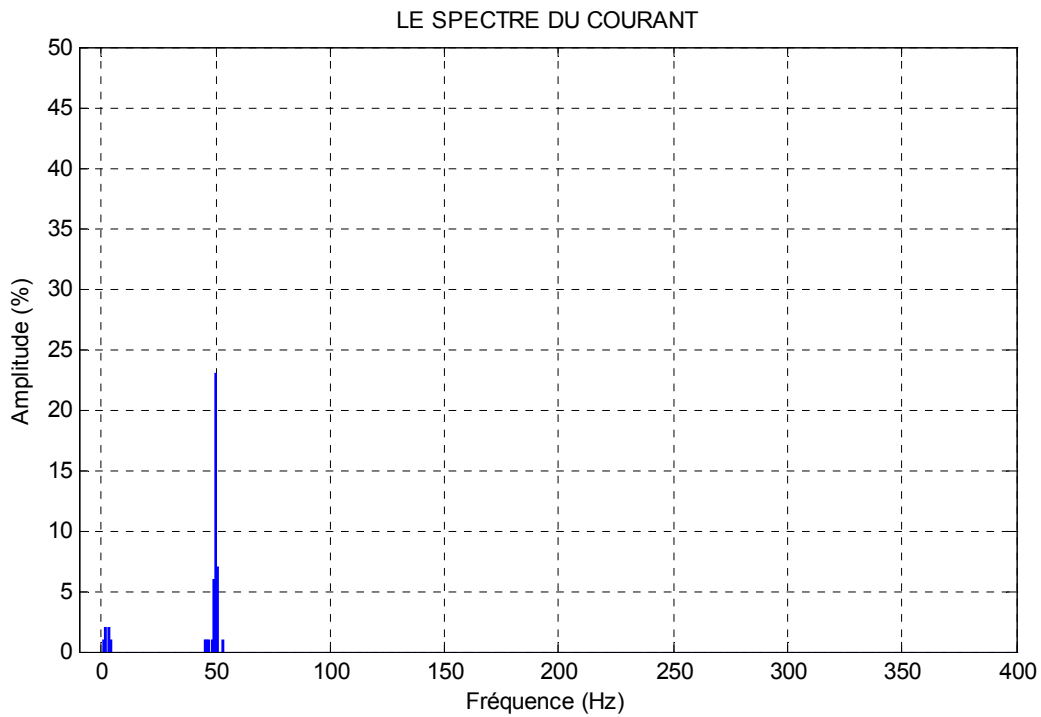


Figure 3.23 : Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré

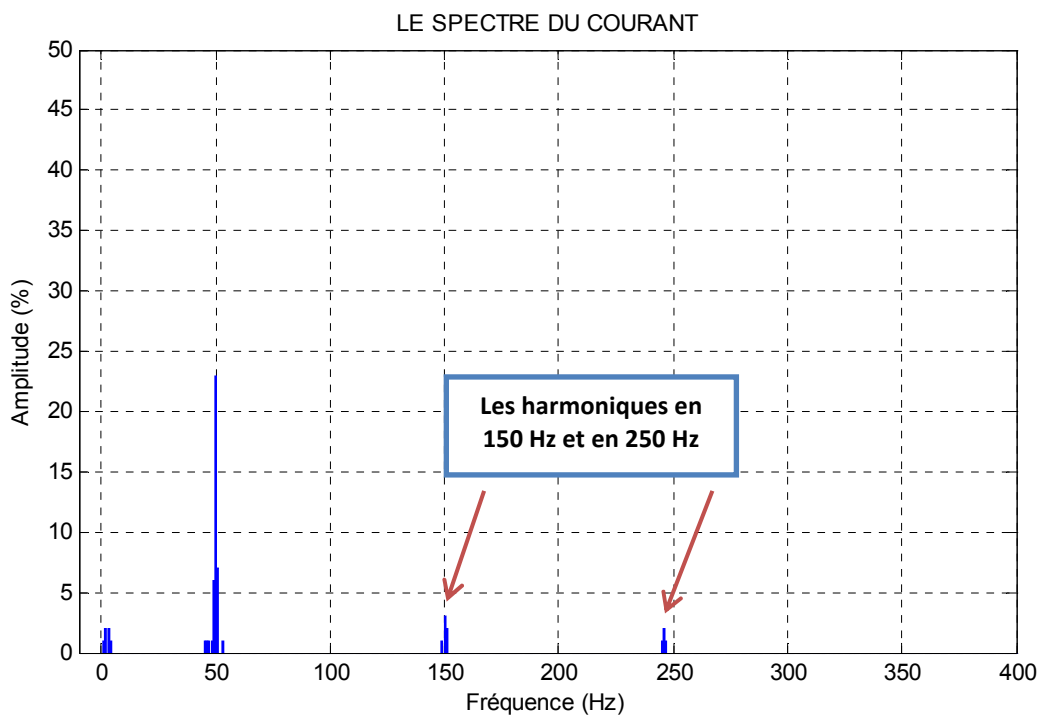


Figure 3.24 : Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré

### 3.6.2.3 Interprétation de l'analyse spectrale

Pendant le fonctionnement de la MAS, des phénomènes divers entrent en jeu affectent particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral.

Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (FFT) dans cette étude nous permet d'analyser le courant statorique de la machine saine et avec défauts.

Présentent respectivement les spectres du courant statorique pour les deux cas; équilibré et déséquilibré. À partir de ces deux spectres on peut dire que la pauvreté en harmoniques observée dans le spectre obtenu du modèle équilibré est absolument incomparable avec la richesse en harmoniques du spectre obtenu du modèle déséquilibré.

On remarque aussi l'émergence des harmoniques  $f_{dés}$  avec un accroissement de leurs amplitudes.  $(f_{dés} = K.fs)$  avec  $k = 1\ 3\ 5$ .

### 3.6.3 Fonctionnement en présence de défaut (Court –circuit)

Dans le cas de la présence de défauts dans la machine asynchrone

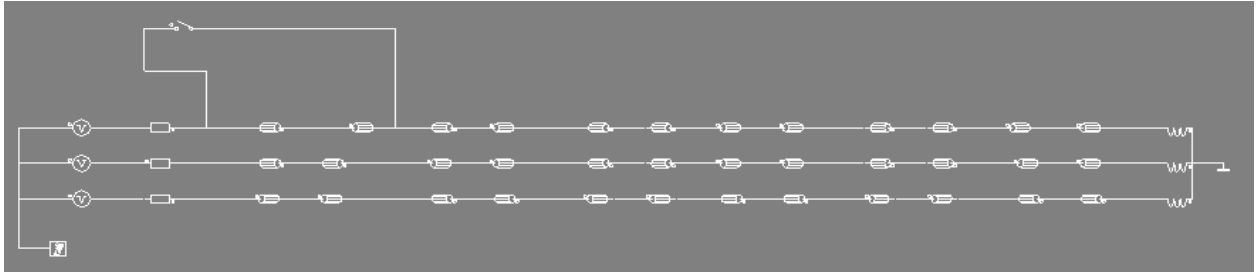


Figure 3.25 : Circuit équivalent en présence de défaut

On a obtenu les résultats suivants.

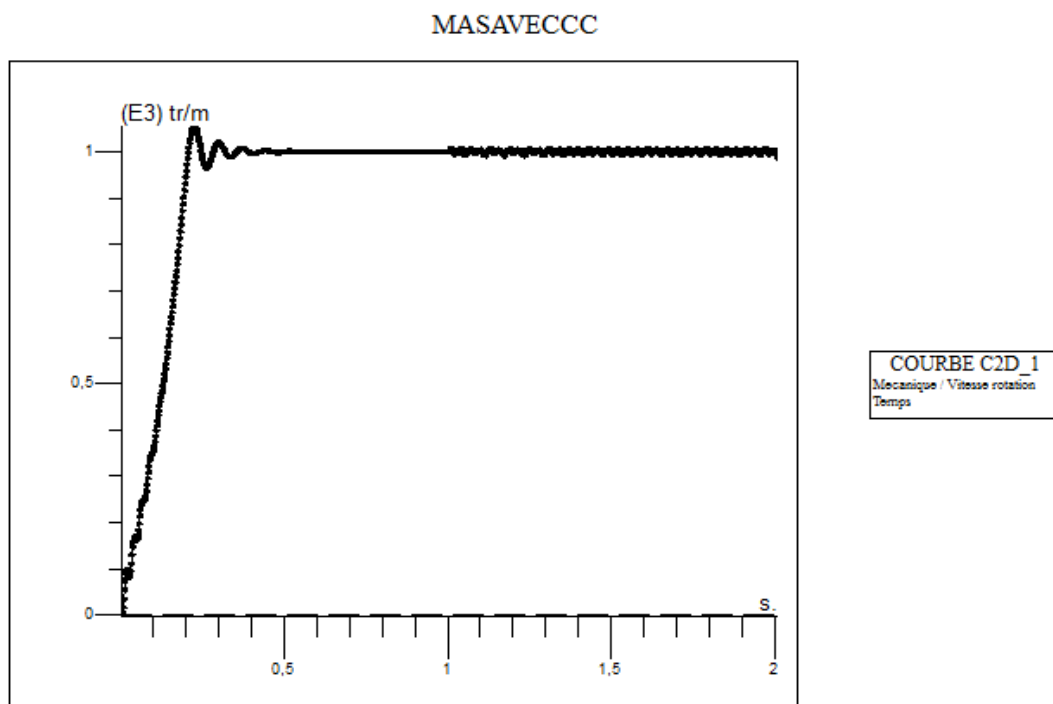


figure 3.26 : la vitesse de rotation en cas de défaut

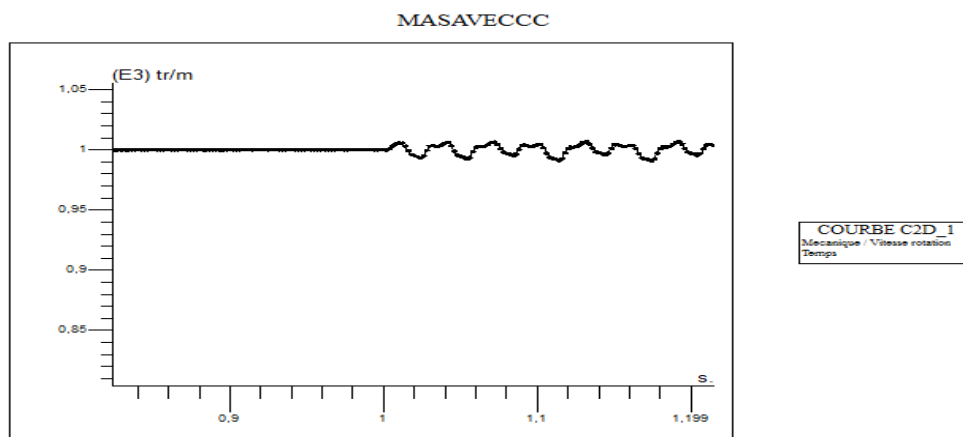


figure 3.27 : zoom de la vitesse de rotation en cas de défaut

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

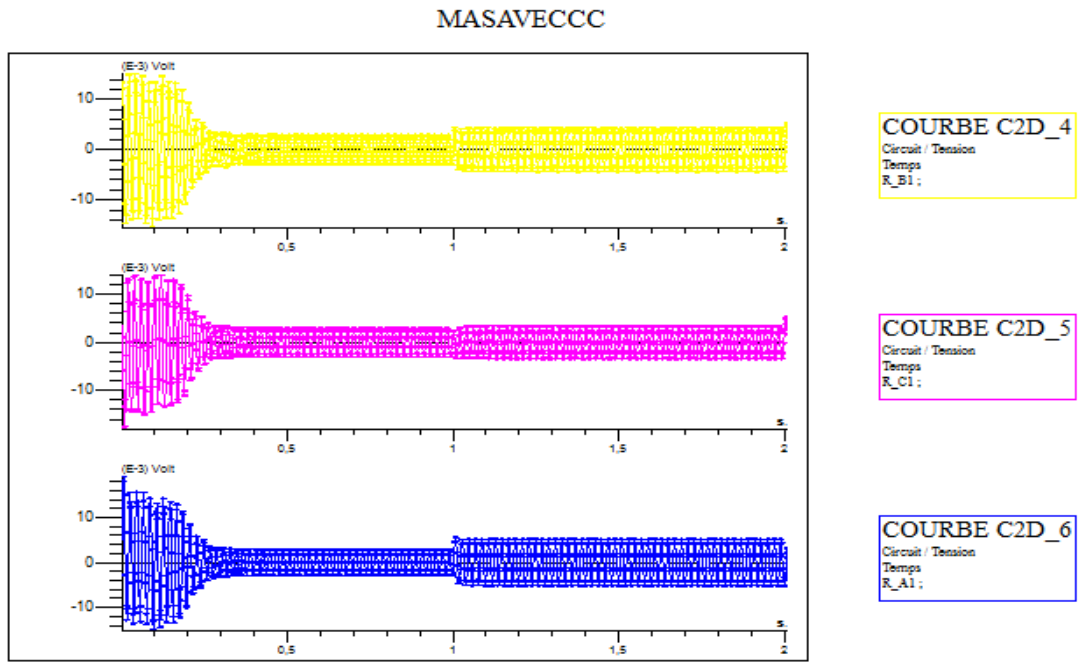


Figure 3.28 : Les Courants statoriques juxtaposé en cas de défaut

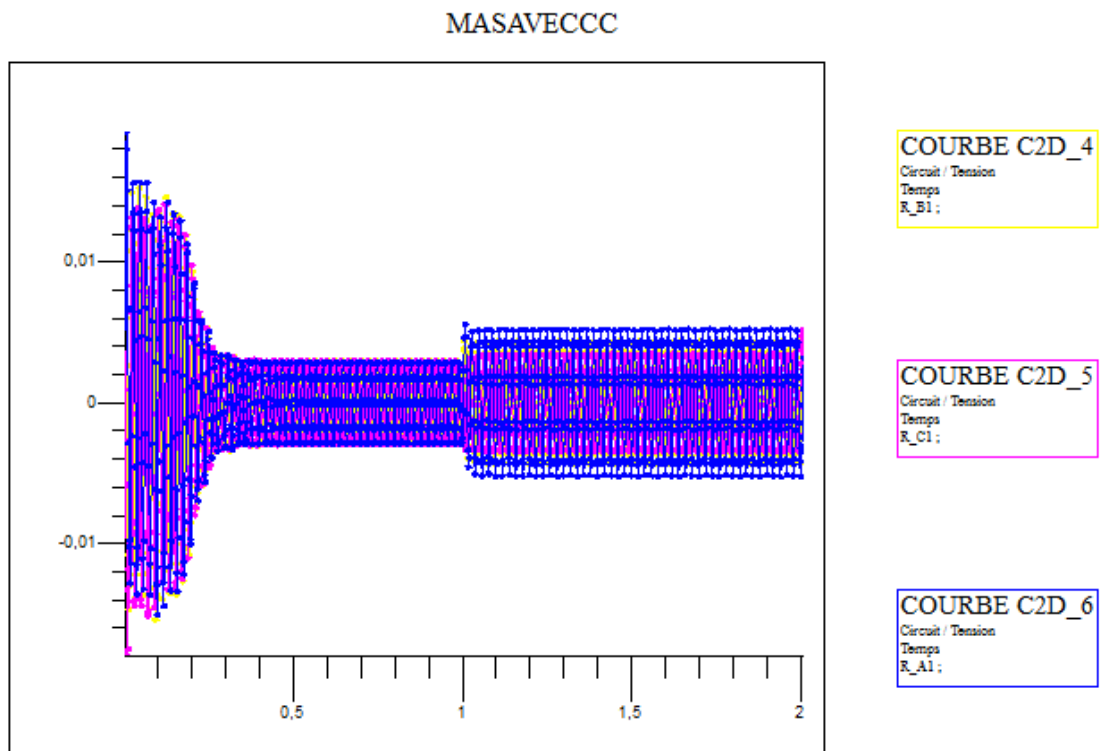


figure 3.29 : Les Courants statoriques superposé en cas de défaut

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

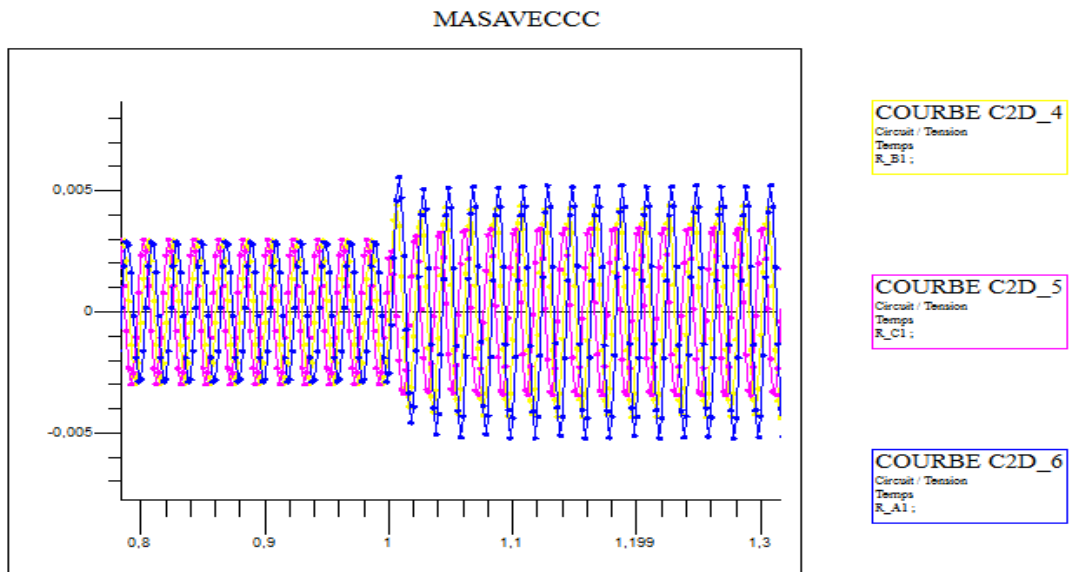


figure 3.30 : Zoom des Courants statoriques superposés en cas de défaut

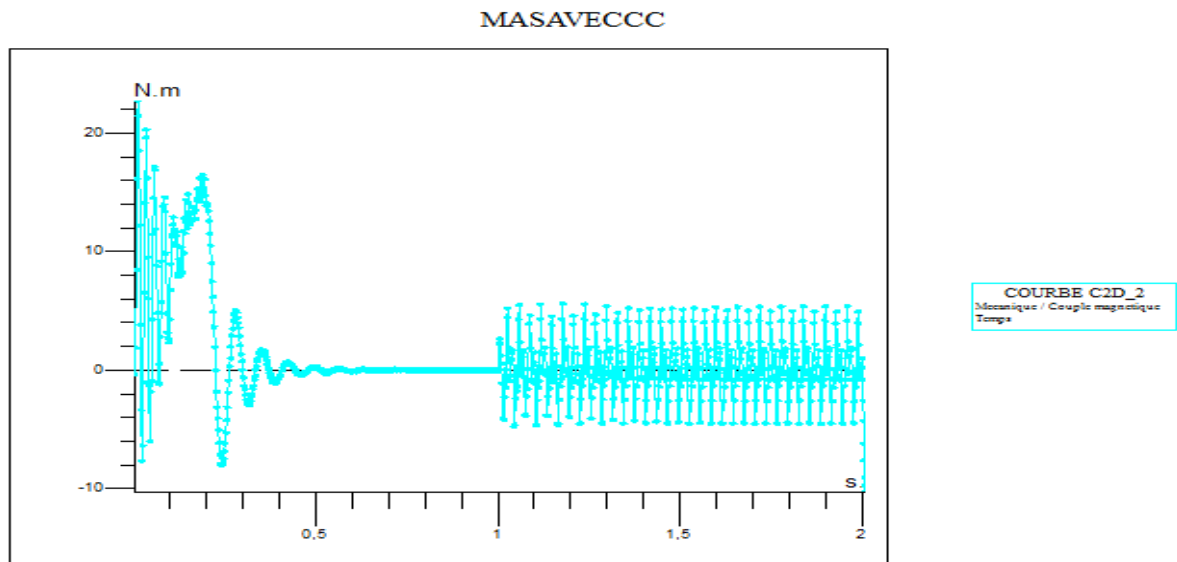


figure 3.31 : Le Couple électromagnétique en cas de défaut

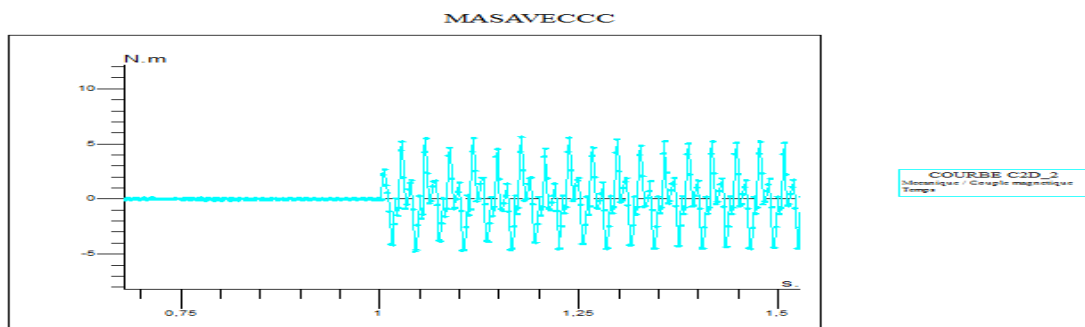


Figure 3.32 : Zoom du Couple électromagnétique en cas de défaut

### 3.6.3.1 Interprétation

On remarque que le régime transitoire est oscillatoire est dure (1s) pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (1015 tr/min). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (20 N.m) au régime transitoire, on note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers de faible valeur due à l'effet réactif de la MAS. Lorsque qu'il y a apparition de défaut (1 s), nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse tandis que le couple électromagnétique augmente et prend une valeur de (5 N.m).

Le couple électromagnétique ainsi que la vitesse de la machine asynchrone en situation de défauts de court-circuit statoriques ont des valeurs sensiblement égales à celles en régime sain. Mais, on remarque que ces signaux sont bruités pendant l'apparition du défaut.

Lorsque des spires sont en court-circuit, l'inductance propre d'une phase statorique infectée change, et par conséquent les autres courants de phases changent à cause du couplage magnétique. Plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus l'augmentation du courant est plus significative.

### 3.6.3.2 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

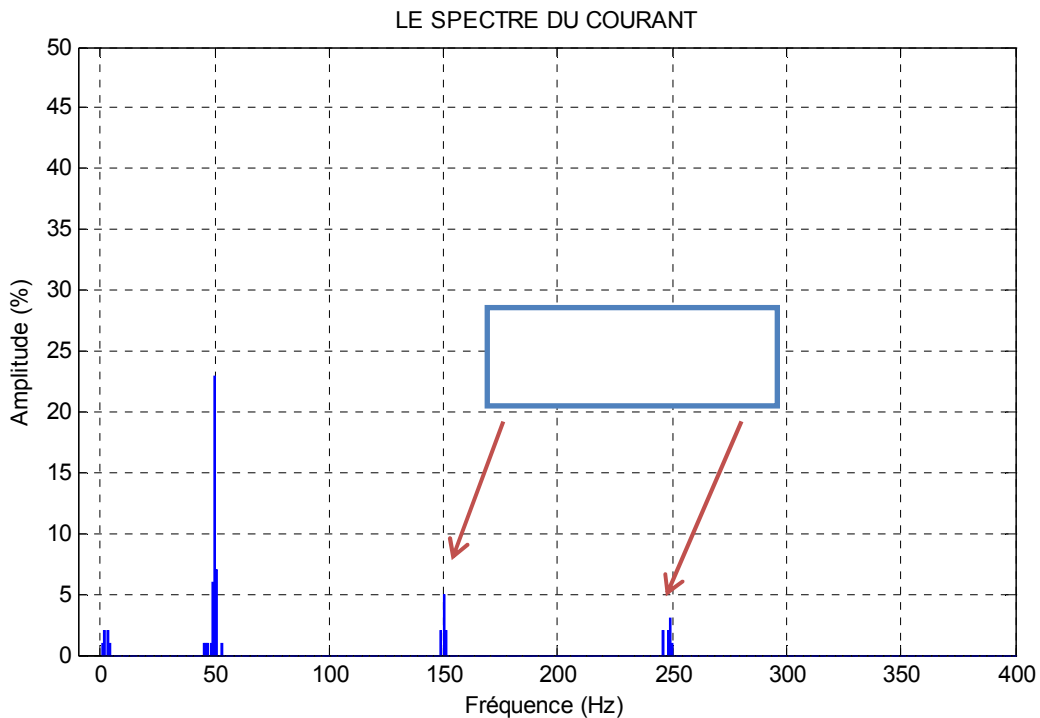


Figure 3.33 : Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré

### 3.6.3.3 Interprétation de l'analyse spectrale

En court-circuit nous avons remarqué que les harmoniques fondamentales restent les mêmes mais on remarque aussi un changement sur l'amplitude de la troisième harmonique de fréquence 150 Hz et la cinquième harmonique de 250 Hz

Et on remarque que entre les deux cas déséquilibre et court-circuit le pourcentage de la dernière est plus élevé que le premier (déséquilibre) au niveau de l'amplitude de l'harmonique trois et l'harmonique cinq augmentent

### 3.7 Conclusion

L'étude des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil dans les deux cas de fonctionnement sain (sans défaut) et dégradé (avec défaut) nous exige plusieurs essais réels sur ces derniers (plusieurs puissances, différents défauts) mais le coût de ces essais est onéreux chose qui nous a contraint à procéder à une conception des modèles consistants et proche du moteur réel et qui nous a permis d'étudier ce dernier.

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons fait des expériences sur la MAS pour étudier les résultats des phénomènes et pour réaliser une étude comparative entre les résultats de l'expérience sur les éléments réels et les résultats de simulation. Actuellement il existe plusieurs outils qui nous ont aidés à étudier le fonctionnement de la MAS avec plusieurs essais pratique pour voir les impacts de régime déséquilibré sur le moteur et les spectres de courants statorique.

### 4.2 Campagnes d'Essais et Description

Notre travail a pour objectif d'établir des éléments de diagnostic de défauts électriques de déséquilibre de tension d'une phase et court-circuit entre spire , de mauvais contact ou des erreurs de branchement. Le choix des techniques et des défauts ciblés a été établi suite à la présence de ces défauts dans les applications industrielles.

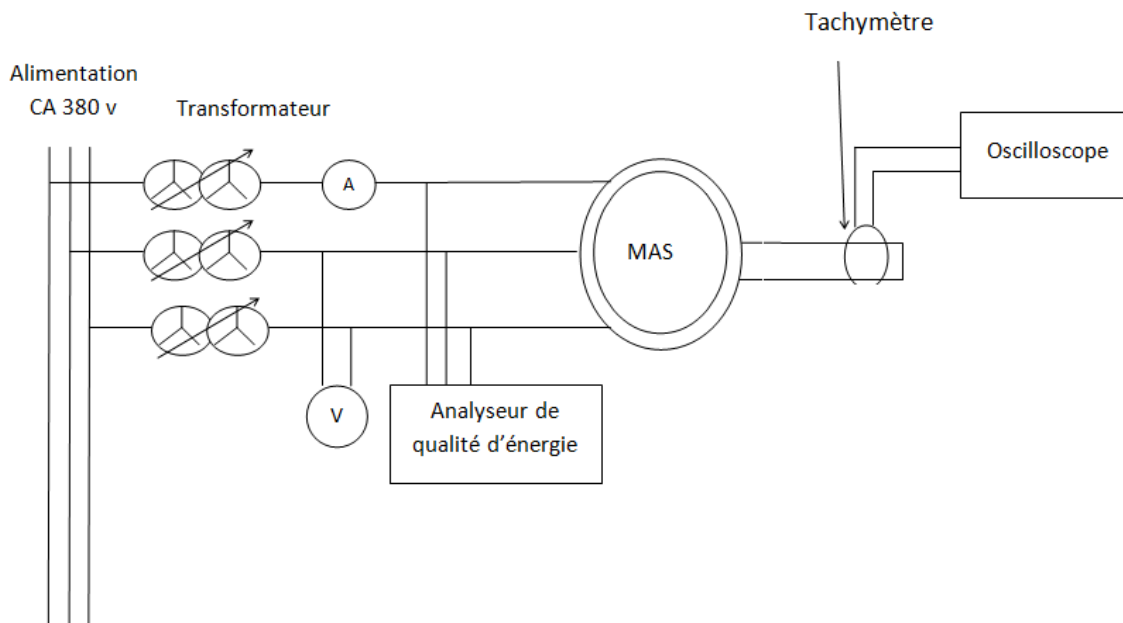


Figure 4.1 : Configuration du banc expérimental

### 4.3 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic



## CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE

- Réalisation d'un montage de démarrage du moteur avec un couplage étoile.
- Utilise 3 transformateurs pour modifier la tension de l'alimentation et crée le déséquilibre dans une phase.
- Faire des essais en régime sain et en déséquilibre (à vide).
- Faire des essais avec court-circuit entre spire
- Prend des signaux depuis l'analyseur de qualité d'énergie.
- Effectuer une comparaison entre les signaux dans les deux cas sain et défaillant et déduire une relation entre ces deniers pour identifier directement le type de défaut par une simple lecture des signatures des courants statoriques.



Figure 4.2 : Banc d'Essai

### 4.4 Description de Matériel

#### 4.4.1 L'alimentation

L'alimentation électrique est l'ensemble des équipements électriques qui assure le transfert du courant électrique d'un réseau électrique pour le fournir, sous les paramètres appropriés (puissance, tension...) , dans notre travail nous utiliser un bloc d'alimentation qui compose de 3 source de tension alternative et un saul continu.



Figure 4.3 : Représente bloc d'alimentation

### 4.4.2 Analyseur de qualité d'énergie

Un analyseur de qualité d'énergie est un instrument de mesure destiné à afficher les différentes fréquences contenues dans un signal ainsi que leurs amplitudes respectives. Les signaux peuvent être de natures diverses : électrique, optique, sonore, radioélectrique.



Figure 4.4 : Représente l'analyseur de qualité d'énergie

### 4.4.3 Oscilloscope

Un oscilloscope est un instrument de mesure destiné à visualiser un signal électrique, le plus souvent variable au cours du temps. Il est utilisé par de nombreux scientifiques afin de visualiser soit des tensions électriques, soit diverses autres grandeurs physiques préalablement transformées en tension au moyen d'un convertisseur adapté ou de capteurs. La courbe de rendu d'un oscilloscope est appelée oscillogramme.

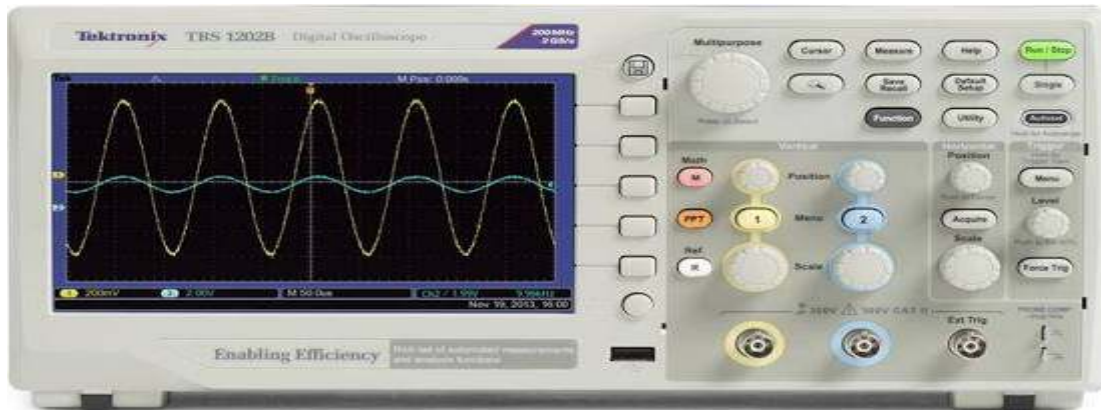


Figure 4.5 : Représente oscilloscope numérique

### 4.4.4 Transformateur

Un transformateur électrique est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

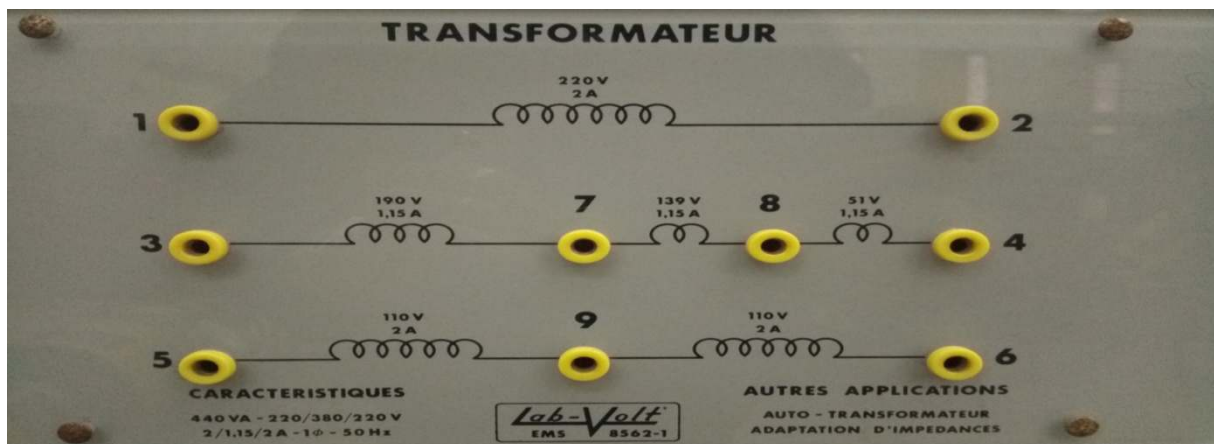


Figure 4.6 : Représente les enroulements primaire et secondaire de transformateur



### 4.4.5 La résistance variable

C'est une résistance qui donne une valeur est variable .En fait, toutes les résistances sont variables, mais seules celles ayant une plage de variation significative sont désignées comme telles. De nombreux facteurs peuvent induire une variation de R en fonction de sa constitution.

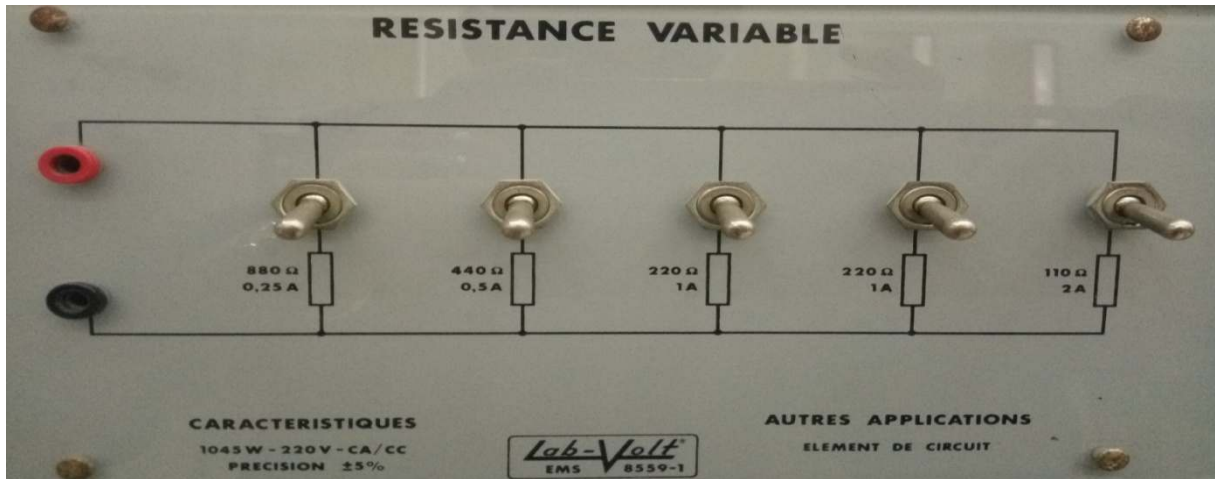


Figure 4.7 : Représente la résistance variable

### 4.4.6 Machine asynchrone à cage

Comme la machine à cage est définie en premier chapitre on l'utilise pour étudier le fonctionnement de la machine asynchrone à cage

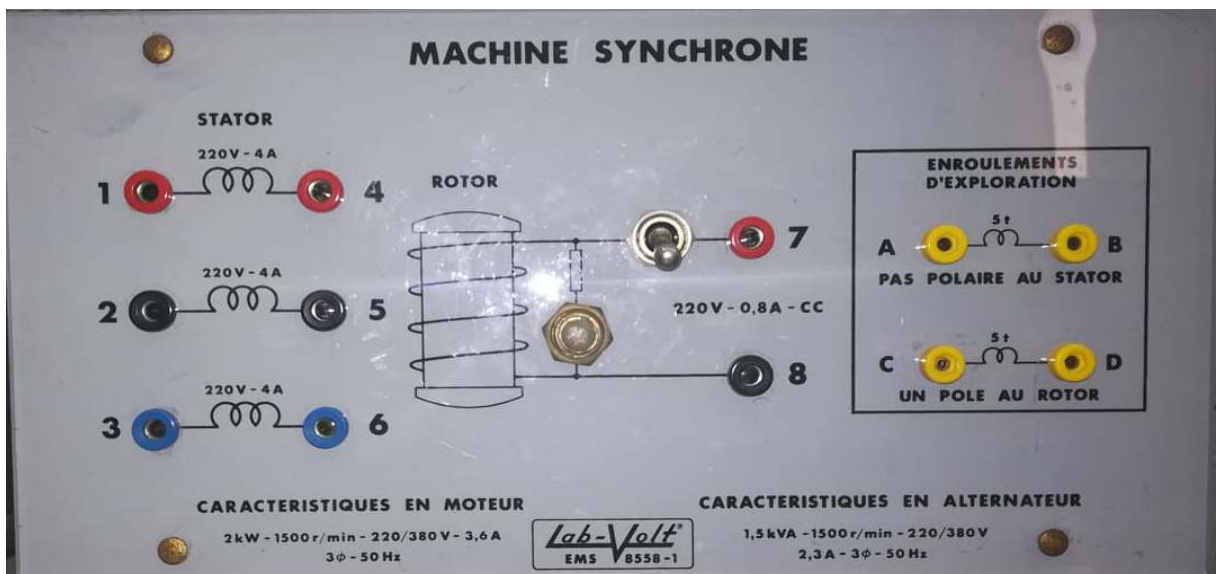


Figure 4.8 : Représente les borne d'alimentation de la MAS

## 4.5 Résultat expérimentale de fonctionnement déséquilibré

Nous avons étudié le fonctionnement de la MAS en régime sain et en défaut de déséquilibre "tension", et en court-circuit entre spire, et on a obtenu les résultats suivant grâce a l'analyseur de qualité d'énergie, nous avons appliqué une tension de 192v.

### 4.5.1 Tension équilibre

On a alimenté notre machine par trois tension (V1= 190,6 v ; V2= 192,4 v ; V3=190,8 v)

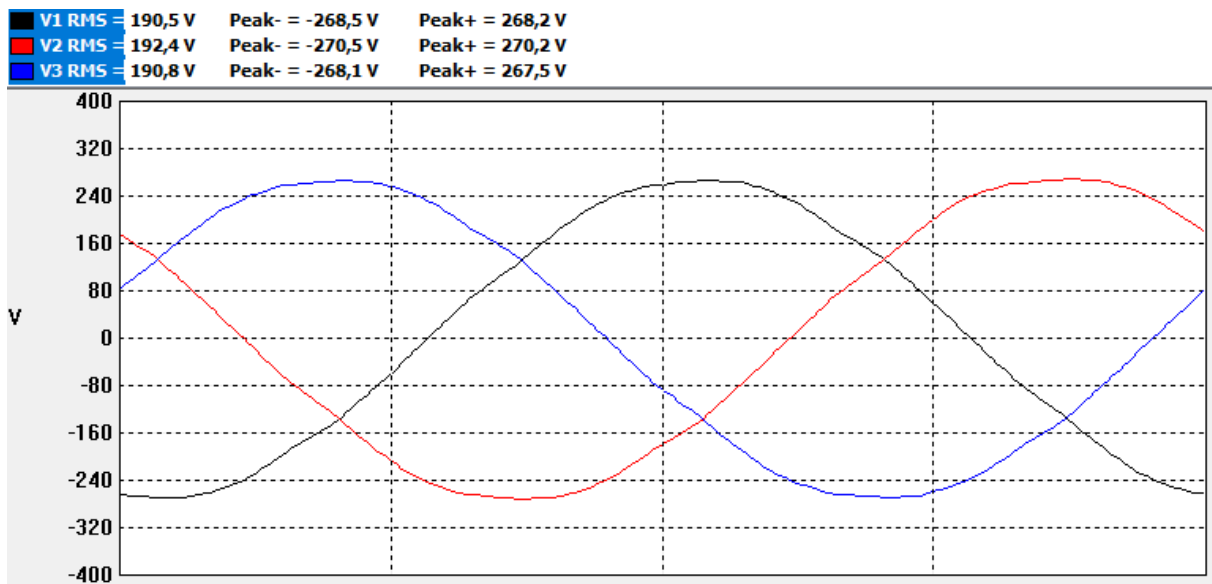


Figure 4.9 : Représentation des tensions statorique équilibré.

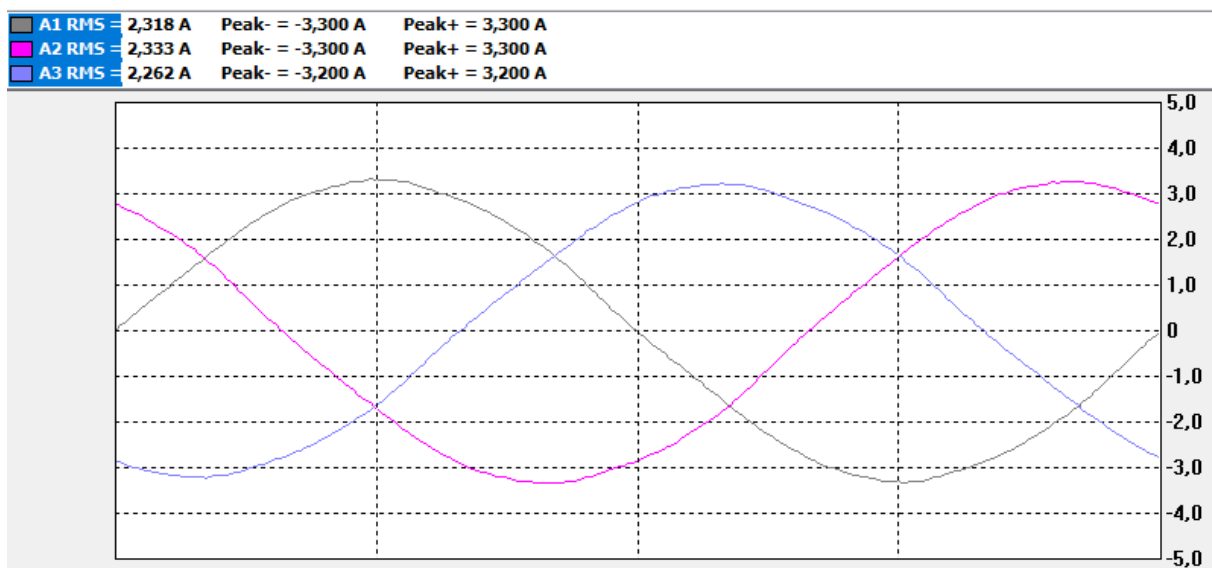


Figure 4.10 : Représentation des courants statorique équilibré.

### 4.5.2 Tension déséquilibrée

Pour étudier le comportement de la MAS avec un défaut de déséquilibre de tension dans la troisième phase, on applique une tension de 110 v.

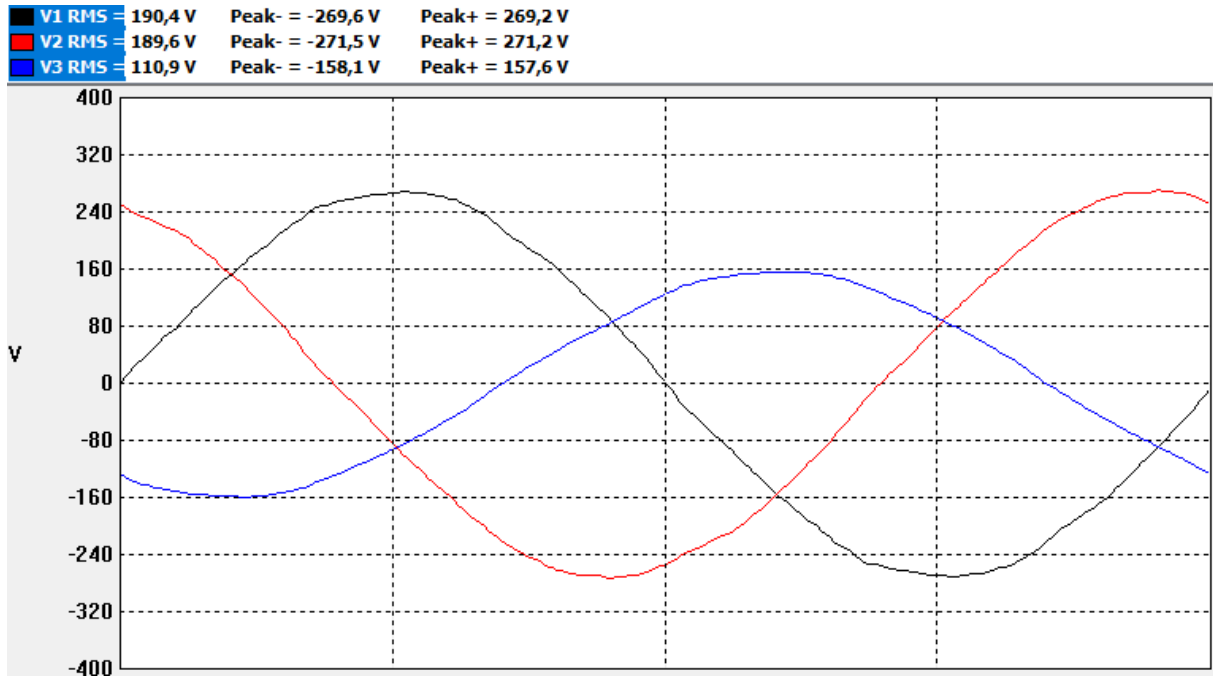


Figure 4.11 : Représentation des tensions statorique déséquilibré.

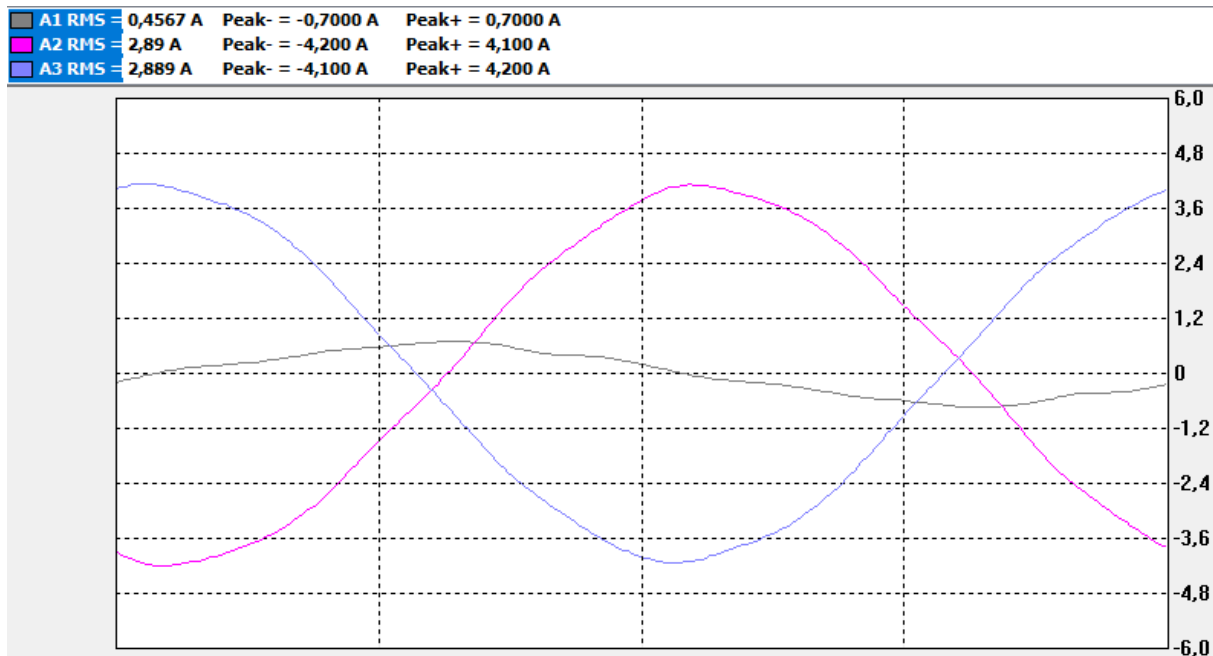


Figure 4.12 : Représentation des courants statorique déséquilibré.

### 4.5.3 Interprétation des résultats

Dans le régime sain les courants statorique sont égaux (2,3 A) et on remarque que ces trois courants ont la même forme et le même déphasagemais et en remarque aussi desperturbations due aux harmoniques d'espace car le réseau n'est pas parfait Et Les trois tensions sont équilibrées et elles ont la même amplitude 190 (v).

Par contre au régime déséquilibré on constate une grande variation entre les valeurs maximales des trois courant statorique où nous remarquons une baisse significative au niveau de l'intensité du courant dans la 1ère phase (0,45 A) qui à le déséquilibre et le contraire pour les deux autres phases (2,9 A) cette augmentation c'est pour compenser l'absence du courant dans la phase 1.

### 4.5.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

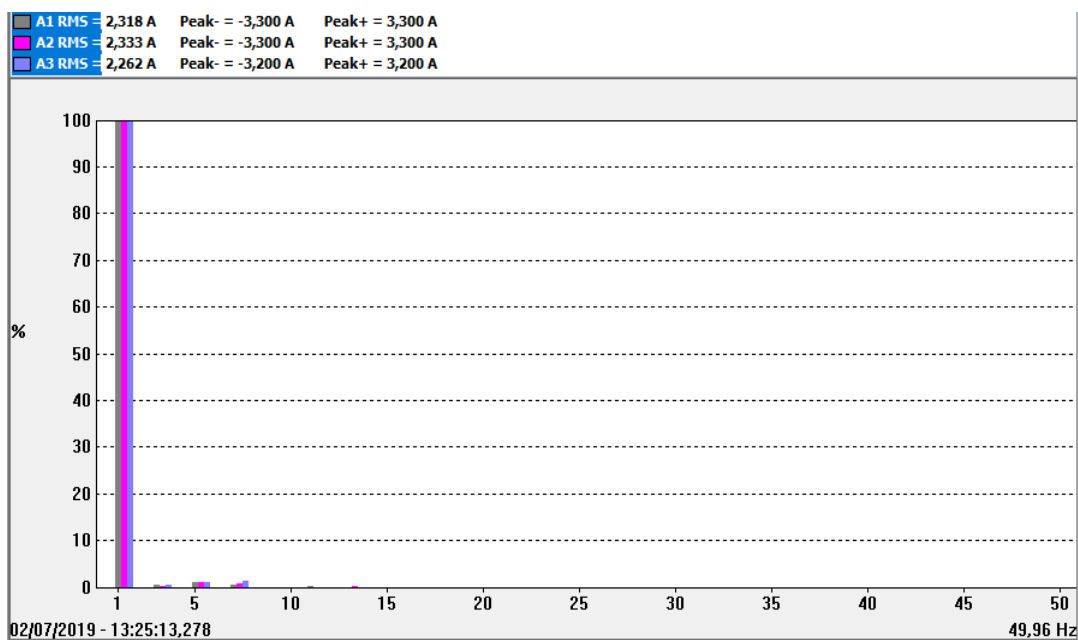
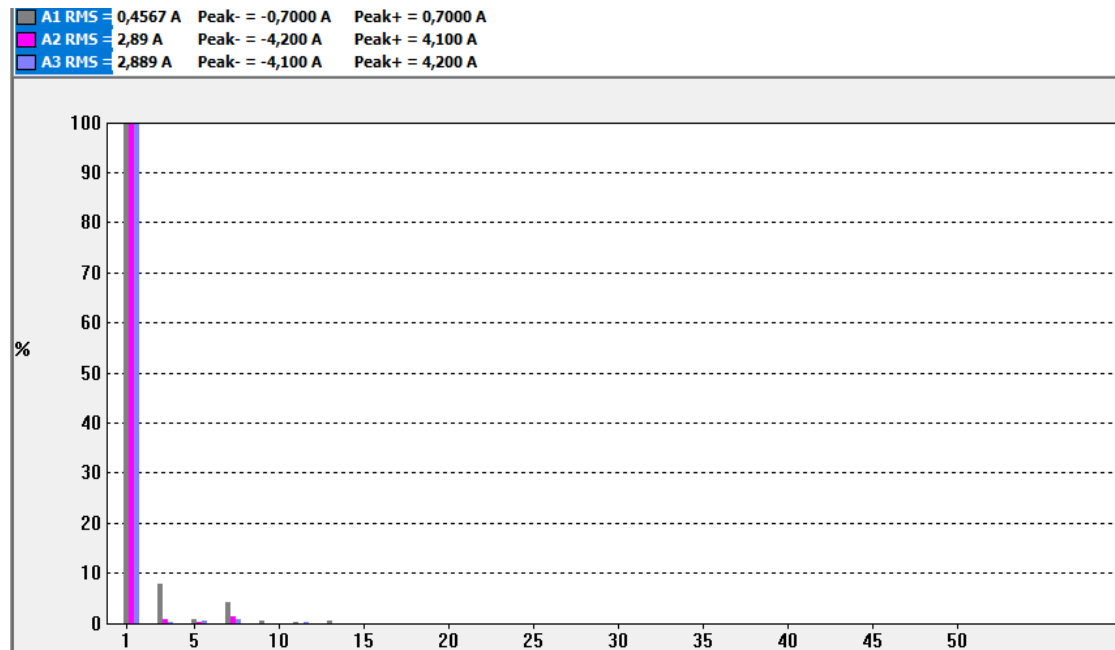


Figure 4.13 : Les spectres du courant statorique équilibré



**Figure 4.14** : Les spectres du courant statorique déséquilibré

### 4.5.5 Interprétation de l'analyse spectrale

La représentation des spectres des courants statorique dans le cas de la machine sain représente une petite augmentation des harmoniques à cause de la perturbation dans l'alimentation (réseau n'est pas parfait).

On déséquilibre on remarque que les spectres du courant statorique représente une augmentation de la (3ème et 7ème) harmonique au niveau de la première phase qui contient le déséquilibre se qui a entraîné un bruit venant du moteur.

### 4.6 Conclusion

Ce chapitre à présenter les résultats expérimentaux et leurs interprétations sont indiquées. Ils illustrent la possibilité et la sensibilité de détection de défauts multiples moyennant le captage du déséquilibre de tension dans le stator, ce modèle d'étude pratique nous a permis d'obtenir le fonctionnement de la machine qui nous a aidera visualiser les courant circulant dans la partie défailante du bobinage.

Cette étude nous a permis d'affirmer l'important de détecter le défaut pour limiter les risques de la destruction de la machine.



# INTRODUCTION GENERALE

---

La machine asynchrone est très utilisée dans l'industrie grâce à ses nombreuses qualités tels que : sa robustesse, son coût de fabrication relativement faible et un système d'entretien minimum. Dans certains cas d'utilisations des moteurs asynchrone, on ne tolère pas les pannes de fonctionnement qui peuvent endommager tout le système, ces pannes peuvent avoir différentes origines, à savoir : mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court-circuit dans les bobinages statoriques, cassures des barres ou de portions d'anneaux de court-circuit, cassure de dents,). D'autres imperfections peuvent aussi être dues également aux éléments de l'entraînement comme les défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les réducteurs mécaniques. Lorsqu'un dysfonctionnement se produit dans la machine asynchrone, il peut ne pas provoquer l'arrêt immédiat de cette dernière, mais ça affecte directement ses performances telles que la vitesse, les courants et le couple électromagnétique. Ces défauts de fonctionnement doivent être diagnostiqués, pour ce faire plusieurs méthodes ont vu le jour, dans notre étude on s'intéresse à la méthode des éléments finis.

Ce mémoire présente les différentes étapes de notre travail, tout d'abord, dans le premier chapitre on donne une synthèse des connaissances actuelles concernant la machine asynchrone en indiquant les différents types de défauts qui sont susceptibles de se produire lors du fonctionnement de la machine en question. Dans le deuxième chapitre, on définit la méthode de diagnostic des défauts de la machine, qui est une méthode par élément finis. Des exemples de calculs et des cas particuliers sont présentés.

Ensuite dans le troisième chapitre regroupe les résultats de notre travail en donnant les interprétations appropriées, aussi, toutes les étapes du diagnostic des défauts de la machine asynchrone qu'on a effectués sont clairement montrés dans ce dernier chapitre. Une conclusion générale qui englobe les fruits de notre étude est présentée à la fin de ce manuscrit. Enfin, Dans le quatrième chapitre nous avons employé les expériences précédentes dans un cas pratique pour voir les résultats d'un phénomène ou bien pour faire une étude comparative avec la réalisation de l'expérience sur l'élément réel et les résultats de simulation. A la fin une conclusion générale ou on a présenté une synthèse des résultats obtenus.

- [1] **Hamadou Adil et Nessissen Abdelkader** «Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil» thèse de master en génie électrique, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015.
- [2] : **BAPIO BAYALA**. Machines Electriques. Formation Continue- Techniciens Supérieures Ingénieur Electrotechniciens. 2010
- [3] **Pierre DZIWNIEL** «Etude des structures électromagnétiques présentant des directions d'invariance géométrique : application a la machine asynchrone a encoches inclinées» Thèse de doctorat en génie Electrique, Université des sciences et technologies de Lille, 1998
- [4] **DjediaDjedid et Hammi Hichem** «Etude et modélisation du moteur asynchrone à double cage» mémoire master, université KasdiMerbah Ouargla. 2016/ 2017
- [5] **LebaroudAbdesselam**«Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables», Thèse de doctorat en Génie Electrique, l'Université de Constantine, 2006
- [6] **B.VASEGHI** « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires Modélisation – Réduction du courant de défaut», thèse de doctorat de l'I.N.P.L, 2009
- [7] **CHERIF Hakima**«Détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et Ondelettes» thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra.2014
- [8]. **C. SabonnadièreL. Coulomb**«Calcul des champs électromagnétiques», Technique de l'ingénieur D 3020
- [9] **P. Mas**« Modélisation en électromagnétisme », étude technique, janvier 1992
- [10] **Y. Boutora**, « Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents avec la méthode des éléments finis », thèse de doctorat, ENP, Alger, 2007
- [11] **Khebbab Mohamed**, « Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », Thèse de magister, université de Constantine, 2007
- [12] **G. Datt et G.Touzot** « Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis », Maloine S.A. Editeur Paris, Deuxième édition, 1984.
- [13] **Nehal Ouassila**, « Etude et modélisation des paliers planaires », thèse de magister, Université de Constantine, 2009

- [14] **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
- [15] **M. Rachek**, « Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse de doctorat, UMMTO, 2007
- [16] **E. Chauveau**, « Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones », thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2001
- [17] **Romain Garnier**. « Contribution à la résolution des équations de Maxwell dans les structures périodiques par la méthode des éléments finis ». Electromagnétisme. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013
- [18] **G. Datt et G. Touzot** « Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis », Maloine S.A. Editeur Paris, Deuxième édition, 1984
- [19] **H. TAIBI et S. BOUTKHATEM** « Modélisation des défauts statoriques et rotorique d'un moteur asynchrone par la méthode des éléments finis » mémoire de projet de fin d'études 2016-2017
- [20] **Sadouki Hocine et Boukhatem Sid Ahmed** « Modélisation des défauts statoriques à cage d'un moteur asynchrone par la méthode des éléments finis » Mémoire de Projet de Fin d'Études 2016-2017

## ANNEXES

### ANNEXE.

Les paramètres et les caractéristiques, en vue de la simulation, du moteur asynchrone :

#### PARAMETRE GEOMETRIQUE DE LA MACHINE

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	28	

#### PARAMETRES ELECTRIQUES

Resistance statorique les tête d'bobinage	R1 R2 R3	0.001 OHM
Resistance statorique de bobinage	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12	1.35796 OHM
Inductance statorique	L 1 L2 L3	0.00956 H

## ANNEXES

### REGION SURFACIQUE

- Stator

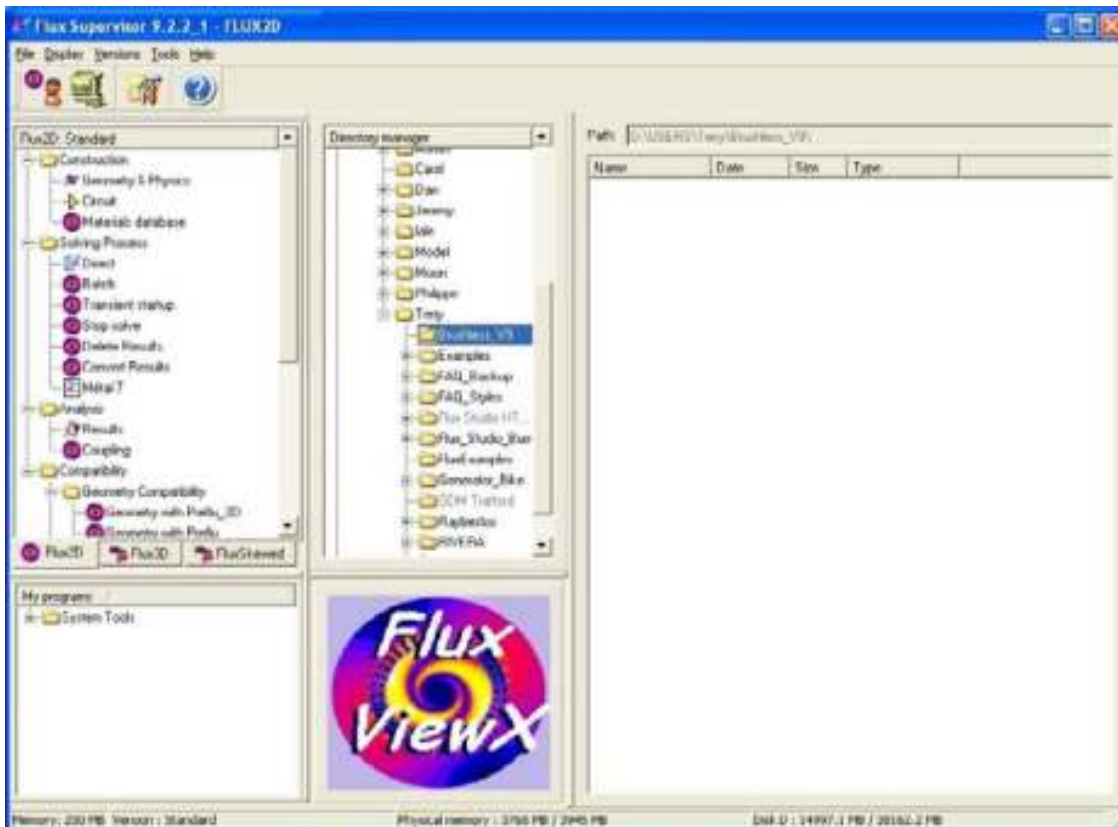
Régine	Type de région	Matériau de région	Composant Électrique de région	Nombre de spire du conducteur	Ensemble mécanique
SSA	Conducteur bobine	Cuivre	B1	28	Stator
SSA1	Conducteur bobine	Cuivre	B2	28	Stator
SSA2	Conducteur bobine	Cuivre	B3	28	Stator
SSA3	Conducteur bobine	Cuivre	B4	28	Stator
SSB	Conducteur bobine	Cuivre	B5	28	Stator
SSB1	Conducteur bobine	Cuivre	B6	28	Stator
SSB2	Conducteur bobine	Cuivre	B7	28	Stator
SSB3	Conducteur bobine	Cuivre	B8	28	Stator
SSC	Conducteur	Cuivre	B9	28	Stator

## ANNEXES

	bobine				
SSC1	Conducteur bobine	Cuivre	B10	28	Stator
SSC2	Conducteur bobine	Cuivre	B11	28	Stator
SSC3	Conducteur bobine	Cuivre	B12	28	Stator

### FLUX-2D

Le superviseur comprend un gestionnaire d'annuaire et un gestionnaire de projet pour tous vos fluxfichiers de projet, avec Mes programmes, raccourcis vers d'autres programmes



## Transformée de Fourier rapide (FFT)

Pour identifier le type de défaut on utilise la méthode d'analyse spectrale des courant statorique (F F T).

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple. Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre.

