

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électrotechnique  
Spécialité Machines électriques

Présenté par

BENSAFI MOHAMED LAMINE

&

BOUFFEROUM SALAH


---

# Evaluation des pertes d'une machine asynchrone double alimentation en défaut de court-circuit par la Méthode des éléments finis

---

Proposé par : Mr. HACHELAF REDOUANE

Année Universitaire 2018-2019



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 grâces 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 **Mr R. Hachelaf** 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 **Mr D. Kouchih** 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.

*Je dédie ce mémoire à nos très chers parents  
Pour leur soutien moral et matériel, pour leurs  
Encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans  
les moments les plus  
Ardus.*

*A toute la famille BENSAFI*

*Et la famille Draï.*

*A mon frère BOUALEM BENSAFI.*

*A nos collègues .*

*Et à tous mes amis e surtout MELLAK  
OUSSAMA Et DJILALI MOHAMED AMINE.*

*A toutes les personnes qui ont participé de près ou de  
loin à la réalisation de ce travail.*

***B.Lamine***

*Je dédie ce mémoire à nos très chers parents  
Pour leur soutien moral et matériel, pour leurs  
Encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans  
les moments les plus  
Ardus.*

*A mes frères*

*AMINE , RIADH, ABDALLAH ET MON PETIT  
FRÈRE NASRELDINNE*

*A toute la famille BOUFERROUM.*

*A mes tantes et mes oncles.*

*A mon amie HOUSSEM BOUKAOULA*

*A mon cousin RADOUAN BOUFERROUM*

*Et à tous mes amis.*

*A toutes les personnes qui ont participé de près ou de  
loin à la réalisation de ce travail.*

***B.Salah***

---

## ملخص:

يركز هذا العمل على إجراء تقييم للخسائر في آلة الكهربية غير المتزامنة ذات تغذية مزدوجة، بسرعات مختلفة، ووضع نماذج لعبوب الدائرة القصيرة بين اللفات في الجزء الثابت بواسطة برنامج Flux-2D ، من أجل دراسة تأثير على الخصائص الكهرومغناطيسية و في هذا الجهاز

**كلمات المفاتيح:** خطأ الدائرة القصيرة; الآلة الكهربية غير المتزامنة ذات تغذية مزدوجة; الخسائر.

---

## Résumé :

Notre travail consiste à faire une évaluation des pertes dans la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en différentes vitesses et faire une modélisation de défaut de court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique par le logiciel Flux-2D ,dans le but d'étudier son impact sur les caractéristiques électromagnétiques et les pertes de cette machine.

**Mots clés :** machine asynchrone à double alimentation ; défaut de court-circuit ; pertes ; éléments finis

---

## Abstract :

Our work consists in making an evaluation of the losses in the double feed induction machine (DFIM) in different speeds and making a modeling of short-circuit defect between turns in the stator winding by the Flux-2D software, in order to study its impact on the electromagnetic characteristics and losses of this machine

**Keywords :** double feed induction machine ; short-circuit fault ; losses ; finite elements

---

## Listes des acronymes et abréviations

$f_s$  : la fréquence d'alimentation

$f_m$  : la fréquence de rotation du rotor

$P$  : le nombre de paire de pôles

$N_s$  : la vitesse de synchronisme

$N$  : la vitesse de rotation de rotor

$g$  : le glissement de la machine asynchrone

$\Omega_m$  : la vitesse mécanique du rotor

$\omega_m$  : les pulsation statorique

$\omega_r$  : la pulsation rotorique

$P_{\text{réseau}}$  : Puissance active fournie par le réseau à la machine

$P_{\text{mec}}$  : Puissance mécanique.

$P_s$  : Puissance active absorbée par le stator

$P_r$  : Puissance active débitée par le rotor

$\eta$  : rendement de la machine asynchrone

$\vec{E}$  : Champ électrique

$\vec{B}$  : Induction magnétique

$\vec{H}$  : Champ magnétique

$\vec{J}$  : Densité de courant de conduction

$\vec{D}$  : Induction électrique

$\rho$  : Densité de charge volumique

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  : Densité de courant de déplacement

$\mu$  : Perméabilité magnétique

$\sigma$  : Conductibilité électrique

$v$  : la réflectivité magnétique

$e$  : Numéro d'élément

$n_e$  : Le nombre totale des éléments du domaine ( $\Omega$ )

$R_s$  : La résistance statorique par phase

$I_s$  : Courant statorique de phase

$m$  : Nombre de phase

$P_{js}$  : Les pertes par effet Joule dans les enroulements du stator

$P_{jr}$  : Les pertes par effet Joule dans les enroulements du rotor

$P_h$  : les pertes Hystérésis

$P_f$  : les pertes par courant de Foucault

$K_h$  : Coefficient de pertes par Hystérésis

$B_m$  : L'induction maximale dans le fer

$f$  : Fréquence de l'induction

$d$  : Epaisseur de la tôle du fer

$K_r$  : Coefficient caractéristique de tôle

$P_{fer\ totale}$  : les pertes fer totales

$P_{mec}$  : Les pertes mécaniques

$P_0$  : la puissance absorbée en fonctionnement à vide

$G$  : un coefficient sans dimension

$S$  : la section de tôle

$V_0$  : le champ constant qui dépend de la différence de champ coercitif entre deux  
Mass

$K_e$  : est le coefficient de pertes supplémentaires

$dP_{moy}$  : la densité volumique de puissance moyenne

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES MACHINES ASYNCHRONES ET LEURS DEFAILLANCES</b>	
<b>1.1 Introduction</b> .....	3
<b>1.2 Constitution de la machine asynchrone</b> .....	3
1.2.1 Définition .....	3
1.2.2 Modes de fonctionnement.....	4
1.2.3 Construction.....	4
1.2.4 Principe de fonctionnement.....	6
1.2.5 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone.....	7
<b>1.3 Machine à double alimentation</b> .....	7
1.3.1 Structure de la MADA.....	8
1.3.2 Classification des machines à double alimentation (MADA).....	9
1.3.3 Le principe de fonctionnement de la MADA.....	10
1.3.4 Mode de fonctionnement de MADA.....	12
1.3.5 Avantages et inconvénients de la MADA.....	16
1.3.6 Etude et Transferts de puissance dans la MADA.....	17
1.3.7 Le rôle de convertisseur statique.....	19
1.3.8 Les pertes et rendement.....	19
<b>1.4 Défaillances dans les machines asynchrones</b> .....	20
1.4.1 Les causes des défauts .....	21
1.4.2 La classification des défauts .....	21
1.4.3 L'étude statistique des défauts.....	22
1.4.4 Principaux défauts liés à la machine asynchrone.....	24
1.4.5 Conséquences des défauts.....	29
<b>1.6 Conclusion</b> .....	29
<b>CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS</b>	
<b>2.1 Introduction</b> .....	30
<b>2.2 Conception assisté par ordinateur C.A.O</b> .....	30
2.2.1 Définition de C.A.O.....	30
2.2.2 Les Approches de C.O.A.....	30
<b>2.3 Les équations de Maxwell</b> .....	31
2.3.1 Introduction.....	31
2.3.2 Les équations.....	31
2.3.3 Mode employé.....	33

<b>2.4 Les méthodes numériques.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 Méthode des différences finis.....	34
2.4.2 Méthode des éléments finis.....	35
2.4.3 Principe de la méthode des éléments finis.....	36
2.4.4 Logiciel de résolution.....	38
<b>2.5 Evaluation des Pertes.....</b>	<b>41</b>
2.5.1. Pertes par effet Joule en cuivre.....	41
2.5.2 Pertes fer.....	41
2.5.3 Pertes mécanique.....	42
2.5.4 Evaluation dans le logiciel de résolution.....	43
<b>2.6 Les caractéristiques de la machine étudiée .....</b>	<b>48</b>
2.6.1 Construction du modèle de la machine asynchrone à double.....	49
<b>2.7 Conclusion.....</b>	<b>57</b>
 <b>CHAPITRE 3 : RESULTATS DU SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</b>	
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2 Evaluation des pertes en fonction de la vitesse (glissement).....</b>	<b>58</b>
3.2.1 La procédure de calcul des pertes dans Flux 2d .....	59
3.2.2 Les résultats d'évaluation .....	61
<b>3.3 Résultats de simulation de la machine état saine.....</b>	<b>62</b>
3.3.1 Fonctionnement à vide .....	62
3.3.2 Fonctionnement en charge .....	65
<b>3.4 Résultats de simulation de la machine avec défaut.....</b>	<b>67</b>
3.4.1 Fonctionnement à vide .....	68
3.4.2 Fonctionnement en charge.....	71
<b>3.5 Résultat d'évaluation des pertes dans la machine en mode transitoire.....</b>	<b>73</b>
3.5.1 La procédure de calcul des pertes dans Flux 2d.....	73
3.5.2 Dans le cas d'une machine saine .....	74
3.5.3 Dans le cas d'une machine avec défaut .....	77
<b>3.6 Conclusion.....</b>	<b>80</b>

# Liste des figures

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> : Coupe d'une machine asynchrone .....	3
<b>Figure 1.2</b> : la transformation d'énergie électrique/mécanique dans la machine asynchrone .....	4
<b>Figure 1.3</b> : photo du stator d'une machine asynchrone.....	4
<b>Figure 1.4</b> : rotor à cage d'écureuil .....	5
<b>Figure 1.5</b> : (a) Le rotor bobiné ; (b) Constitution du rotor bobiné.....	5
<b>Figure 1.6</b> : Schéma de principe de la machine asynchrone.....	6
<b>Figure 1.7</b> : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)..	8
<b>Figure 1.8</b> : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.....	8
<b>Figure 1.9</b> : Structure de la MADA sans balais.....	9
<b>Figure 1.10</b> : Structure en cascade de deux machines asynchrones.....	9
<b>Figure 1.11</b> : Classification des machines asynchrone à double alimentation.....	10
<b>Figure 1.12</b> : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.....	12
<b>Figure 1.13</b> : Mode générateur Hypo-synchronisme.....	13
<b>Figure 1.14</b> : Mode générateur Hyper-synchronisme.....	13
<b>Figure 1.15</b> : Schéma synoptique proposé pour la première configuration.....	13
<b>Figure 1.16</b> : Schéma synoptique proposé pour la deuxième configuration.....	14
<b>Figure 1.17</b> : Mode moteur Hypo-Synchrone.....	14
<b>Figure 1.18</b> : Mode moteur Hyper Synchrone.....	14
<b>Figure 1.19</b> : Schéma synoptique proposé pour la troisième configuration.....	15
<b>Figure 1.20</b> : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs.....	15
<b>Figure 1.21</b> : Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la MADA par deux onduleurs avec deux bus continus indépendants.....	15
<b>Figure 1.22</b> : Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la MADA avec deux onduleurs et un bus continu commun.....	16

<b>Figure 1.23</b> : la MADA en convention moteur hypo-synchrone.....	17
<b>Figure 1.24</b> : Modes et régimes opérationnels de la MADA.....	19
<b>Figure 1.25</b> : Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance.....	23
<b>Figure 1.26</b> : Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de faible puissance.....	23
<b>Figure 1.27</b> : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance par Thorsen.....	23
<b>Figure 1.28</b> : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 1999.....	23
<b>Figure 1.29</b> : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 2008.....	24
<b>Figure 1.30</b> : Représentation des différents défauts statoriques possibles.....	25
<b>Figure 1.31</b> : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.....	27
<b>Figure 1.32</b> : Différentes défaillances des roulements à billes.....	28
<b>Figure 1.33</b> : Représentation des types Excentricité.....	28

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> : Fonction d'interpolation d'un élément.....	37
<b>Figure 2.2</b> : schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	40
<b>Figure 2.3</b> : la technique de séparation des pertes.....	43
<b>Figure 2.4</b> : Décomposition des pertes fer.....	44
<b>Figure 2.5</b> : modèle de calcul des pertes fer proposé par Flux2D.....	47
<b>Figure 2.6</b> : modèle de calcul des pertes joule proposé par Flux2D.....	48
<b>Figure 2.7</b> : Structure de la géométrie de la MADA.....	50
<b>Figure 2.8</b> : Structure de la géométrie de la MADA après l'affectation des régions surfaciques.....	51
<b>Figure 2.9</b> : la représentation des points de maillage Principale.....	52
<b>Figure 2.10</b> : Répartition du maillage triangulaire dans la géométrie.....	52
<b>Figure 2.11</b> : Bobinage triphasé représente deux pas polaires.....	53

<b>Figure 2.12</b> : Répartition du bobinage statorique et rotorique .....	54
<b>Figure 2.13</b> : La Caractéristique B(H) du matériau magnétique « FER ».....	55
<b>Figure 2.14</b> : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	55

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b> répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de $1e-5$ (1499 tr/min).....	58
<b>Figure 3.2</b> répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de 0.6 (600 tr/min).....	59
<b>Figure 3.3</b> répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de 1 (rotor bloqué).....	59
<b>Figure 3.4</b> création de capteur de pertes par effet joule statorique.....	59
<b>Figure 3.5</b> création des deux paramètres de puissance absorbé et pertes par effet joule rotorique.....	60
<b>Figure 3.6</b> création des pertes fer dans le stator.....	60
<b>Figure 3.7</b> les pertes joule statorique en fonction du glissement.....	61
<b>Figure 3.8</b> les pertes joule rotorique en fonction du glissement.....	61
<b>Figure 3.9</b> les pertes fer en fonction du glissement.....	61
<b>Figure 3.10</b> répartition des lignes équiflux (a) à $t=0.0s$ (b) à $t=0.8s$ .....	62
<b>Figure 3.11</b> la répartition de l'induction magnétique (a) à $t=0.0s$ (b) à $t=0.8s$ .....	62
<b>Figure 3.12</b> Le couple moteur à vide.....	63
<b>Figure 3.13</b> : la vitesse de rotation à vide.....	63
<b>Figure 3.14</b> Les courant statorique à vide.....	63
<b>Figure 3.15</b> zoom courants statoriques à vide.....	64
<b>Figure 3.16</b> les courants rotoriques à vide.....	64
<b>Figure 3.17</b> Zoom courants rotorique à vide.....	64
<b>Figure 3.18</b> : le couple moteur en charge.....	65
<b>Figure 3.19</b> : la vitesse de rotation en charge.....	65
<b>Figure 3.20</b> : les courant statorique en charge.....	65

<b>Figure 3.21</b> Zoom courant statorique en charge.....	66
<b>Figure 3.22</b> : les courants rotoriques en charge.....	66
<b>Figure 3.23</b> Zoom courant rotorique en charge.....	66
<b>Figure 3.24</b> : Circuit équivalent en présence de défaut court-circuit entre spires de 10%.....	68
<b>Figure 3.25</b> répartition des lignes équiflux (a) à $t=0.0s$ (b) à $t=0.8s$ .....	68
<b>Figure 3.26</b> la répartition de l'induction magnétique (a) à $t=0.0s$ (b) à $t=0.8s$ .....	68
<b>Figure 3.27</b> : Le couple moteur à vide.....	69
<b>Figure 3.28</b> la vitesse de rotation à vide.....	69
<b>Figure 3.29</b> les courants statoriques à vide.....	69
<b>Figure 3.30</b> zoom courants statoriques à vide.....	70
<b>Figure 3.31</b> les courants rotoriques à vide.....	70
<b>Figure 3.32</b> zoom courants rotoriques à vide.....	70
<b>Figure 3.33</b> couple moteur en charge.....	71
<b>Figure 3.34</b> la vitesse de rotation en charge.....	71
<b>Figure 3.35</b> les courants statoriques en charge.....	71
<b>Figure 3.36</b> zoom courants statoriques en charge.....	72
<b>Figure 3.37</b> les courants rotoriques en charge.....	72
<b>Figure 3.38</b> zoom courants rotoriques en charge.....	72
<b>Figure 3.39</b> création des capteurs de pertes par effet joule statorique et rotorique .....	74
<b>Figure 3.40</b> création des pertes fer dans le stator.....	74
<b>Figure 3.41</b> le couple électromagnétique en état saine.....	75
<b>Figure 3.42</b> les courant statorique en état saine.....	75
<b>Figure 3.43</b> les courant rotorique en état saine.....	75
<b>Figure 3.44</b> la vitesse de rotation en état saine.....	75
<b>Figure 3.45</b> les pertes joules statorique en état saine.....	76
<b>Figure 3.46</b> les pertes joules rotorique en état saine.....	76

<b>Figure 3.47</b> les pertes fer dans le stator en état saine.....	76
<b>Figure 3.48</b> décomposition des pertes fer dans le stator en état saine.....	76
<b>Figure 3.49</b> le couple électromagnétique en défaut.....	77
<b>Figure 3.50</b> les courants statoriques en défaut.....	77
<b>Figure 3.51</b> les courant rotorique en défaut.....	77
<b>Figure 3.52</b> la vitesse de rotation en défaut.....	78
<b>Figure 3.53</b> les pertes joules statorique en défaut.....	78
<b>Figure 3.54</b> les pertes joules rotorique en défaut.....	78
<b>Figure 3.55</b> les pertes fer dans le stator en défaut.....	78
<b>Figure 3.56</b> la décomposition des pertes fer dans le stator en défaut.....	79

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

**Tableau 1.1** : la puissance du MADA.....18

**Tableau 1.2** : la classification des défauts de la machine électrique.....22

## Chapitre 2

**Tableau 2.1** : Avantages et inconvénients de la méthode des différences finis.....35

**Tableau 2.2** : Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....37

**Tableau 2.3.** Les coefficients de Bertotti .....47

**Tableau 2.4** : Paramètres globales de la machine.....49

**Tableau 2.5** : B(H) du matériau magnétique « FER ».....54

## Chapitre 3

**Tableau 3.1** : vitesse et valeur de glissement.....58

**Tableau 3.2** : Les pertes en différente mode de fonctionnement.....79

## Introduction :

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation (Mada), qui est une machine à base de machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures (le stator et le rotor).

Grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes, la Mada présente une solution idéale pour les entraînements à hautes performances et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse.

L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la machine asynchrone à double alimentation comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes d'entraînement électrique. De plus, la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau.

Malgré les avantages présente dans Mada par rapport aux autres types de machines électriques mais dans certains cas d'utilisations dans le monde industriel comme tous les autres machines électriques elle peut être soumise à un ou plusieurs contraintes de natures différentes (électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques et environnementales). Ces contraintes causent des défauts dans les différentes parties de la machine ou tout le système de production.

Lorsqu'un défaut se produit dans la machine, 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 par conséquent une coupure de production, aussi elle peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable ;ces défauts de fonctionnement doivent être diagnostiqués pour d'obtenir une chaine de production de plus sûr à l'aide d'un système ou des programmes de maintenances préventives et correctives pour assurer leur continuité de fonctionnement, pour ce faire plusieurs méthodes ont vu le jour, dans notre étude on s'intéresse à la méthode des éléments finis

Le présent travail s'oriente principalement vers l'évaluation des pertes et la modélisation des défauts de court-circuit dans la machine asynchrone à double alimentation. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail suivant :

Tout d'abord, dans le premier chapitre aborde une synthèse des connaissances concernant la machine asynchrone en indiquant les principaux éléments constitution la machine asynchrone, son principe de fonctionnement et une étude statique qui présente les différents types de défauts qui sont susceptibles de se produire lors du fonctionnement de la machine en question .

Ainsi nous avons présenté la machine asynchrone à double alimentation, son principe de fonctionnement, classification, régime de fonctionnement et transfert de puissance.

Dans le deuxième chapitre on a présenté la modélisation de la machine asynchrone double alimentation (Mada) pour la résolution des équations des champs électromagnétique ; ensuite, on a cité les modèles mathématiques des équations de maxwell et on définit la méthode de élément finis, qui est basée sur la résolution numérique des équations de maxwell et on a terminé par conception assisté par ordinateur CAO à l'aide de logiciel cedrat Flux 2d/3d ;des exemples de calculs et des cas particuliers sont présentés.

Ensuite, nous avons présenté les méthodes de calcul analytique et par les outils et algorithmes présentés par Flux 2D qui permet de faire l'évaluation des pertes dans cette machine ensuite nous avons cité la méthode de réalisation de ce modèle 2D de la machine à double alimentation et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

Dans le troisième chapitre nous avons l'élaborer les résultats du la simulation de la MADA sous l'environnement du logiciel Flux 2D ; en présence dans défaut , on concernons sur l'impact de variation de vitesse de rotation et court-circuit entre spires crée dans un enroulement statorique sur les pertes magnétique (pertes fer) et pertes par effet joule dans les deux enroulements statorique et rotorique en deux régimes à vide et en charge (saine et en défaut).

A la fin on à présenter une conclusion générale qui englobe tous les résultats obtenus dans notre étude.

## 1.1 Introduction :

La croissance utilisation de la machine asynchrone due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore le transport ferroviaire. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise sans oublier les pertes de production occasionnées.[1]

Dans ce chapitre , on décrit le comportement de la machine asynchrone triphasée. Après avoir cité les éléments de constitution et les différents défauts qui peuvent survenir dans la machine et leurs causes et leurs conséquences sur la machine asynchrone .

## 1.2 Constitution de la machine asynchrone :

### 1.2.1 Définition :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction 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.

- Elle comprend un stator et un rotor, constitués des tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source, le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. [2]

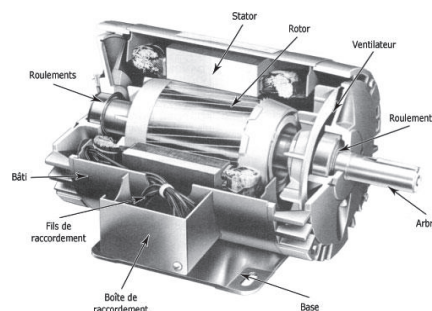


Figure 1.1 : Coupe d'une machine asynchrone

## 1.2.2 Modes de fonctionnement :

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.

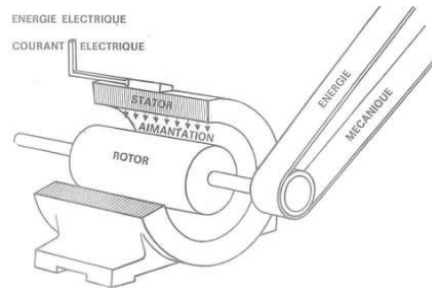


Figure 1.2 : la transformation d'énergie électrique/mécanique dans la machine asynchrone

## 1.2.3 Construction :

La machine asynchrone est constituée de deux principaux éléments :

- **Le stator** : partie fixe
- **Le rotor** : partie tournante

### a. Stator :

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

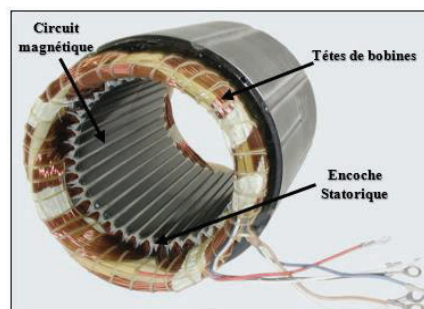


Figure 1.3: photo du stator d'une machine asynchrone

- Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.
- Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer la distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

## b. Rotor :

Il existe deux sortes de rotor dans la machine asynchrone :

- **Rotor à cage (cage d'écureuil) :** Il est aussi appelé rotor en court-circuit.

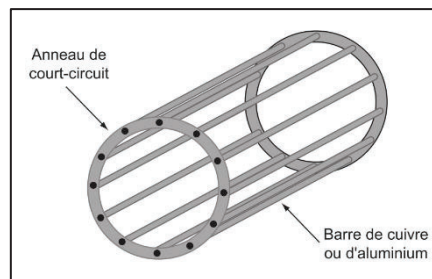


Figure 1.4 : rotor à cage d'écureuil

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 [3].

- **Rotor bobiné :** Il est aussi appelé rotor à bagues.

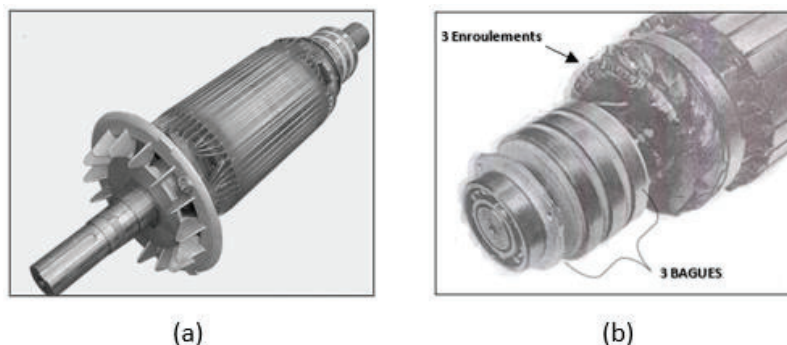


Figure 1.5 : (a) photo de rotor bobiné ; (b) Constitution du rotor bobiné.

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.

### 1.2.4 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 à l'enroulement secondaire en court-circuit . Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par le courant triphasé fourni 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 du synchronisme, l'application de la loi du **FARADAY** à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuit sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier.

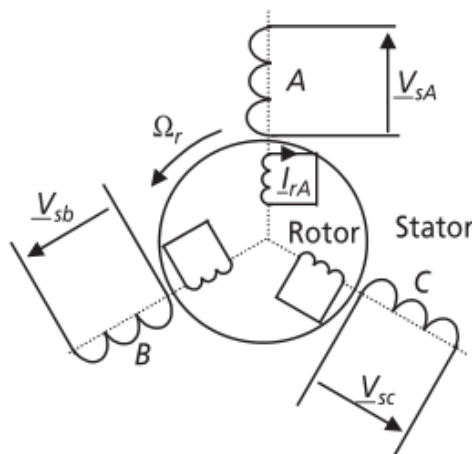


Figure 1.6 : Schéma de principe de la machine asynchrone

L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner une 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 sinusoidal, sa vitesse de rotation est :

$$N_S = \frac{f_s \times 60}{P} \quad (1.1)$$

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

$P$  : le nombre de paire de poles.

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

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

### 1.2.5 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone :

#### a. Avantages :

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone

1. Structure simple .
2. Robuste et facile a construire.
3. Utilisé dans la puissance moyenne et élevée.
4. Relié directement aux réseaux industriels a tension et fréquence.
5. Il tourne a vitesse variable différent de la vitesse synchrone.
6. Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement a vitesse.

#### b. Inconvénients :

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

1. Le couple de démarrage plus élevé que les couples nominales.
2. La vitesse dépend de la charge .
3. Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
4. La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un forte couplage.

### 1.3 Machine à double alimentation :

La machine à double alimentation (MADA) ou doubly-fed induction machine (DFIM) est, comme son nom l'indique, une machine triphasé à courant alternatif avec deux

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES ET LEURS DEFAILLANCES

enroulements triphasés accessible, dans les quels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

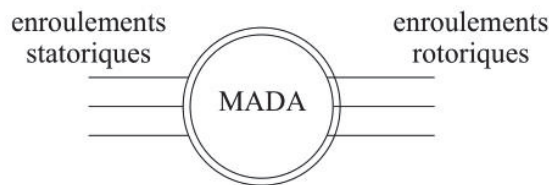


Figure 1.7 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux cotés de la machine et ceci constitue un avantage principale surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et ou le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.

### 1.3.1 Structure de la MADA :

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

#### a. MADA à rotor bobiné (Simple) :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants.

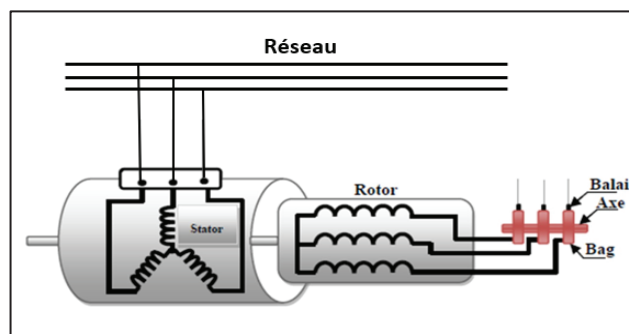


Figure 1.8 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné

## b. MADA sans balais (Brushless) :

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

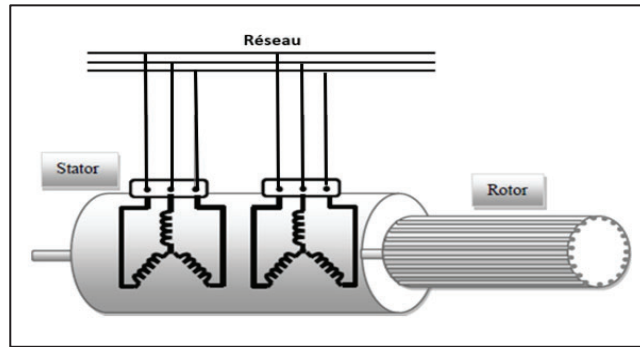


Figure 1.9 : Structure de la MADA sans balais

- Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

## c. MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées.

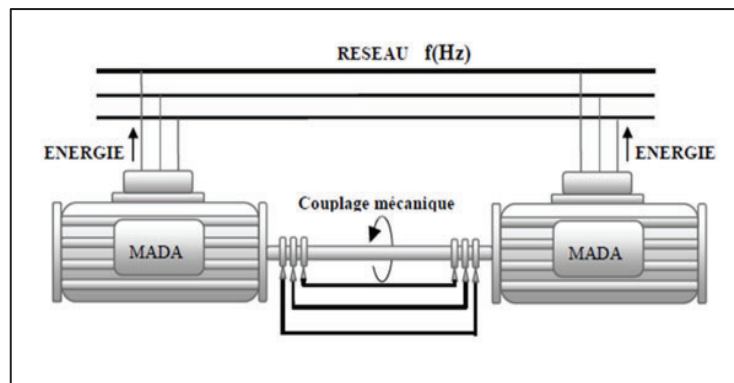


Figure 1.10 : Structure en cascade de deux machines asynchrones

### 1.3.2 Classification des machines à double alimentation (MADA) :

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus

attractives sont développées comme présenté ci-dessous. [4]

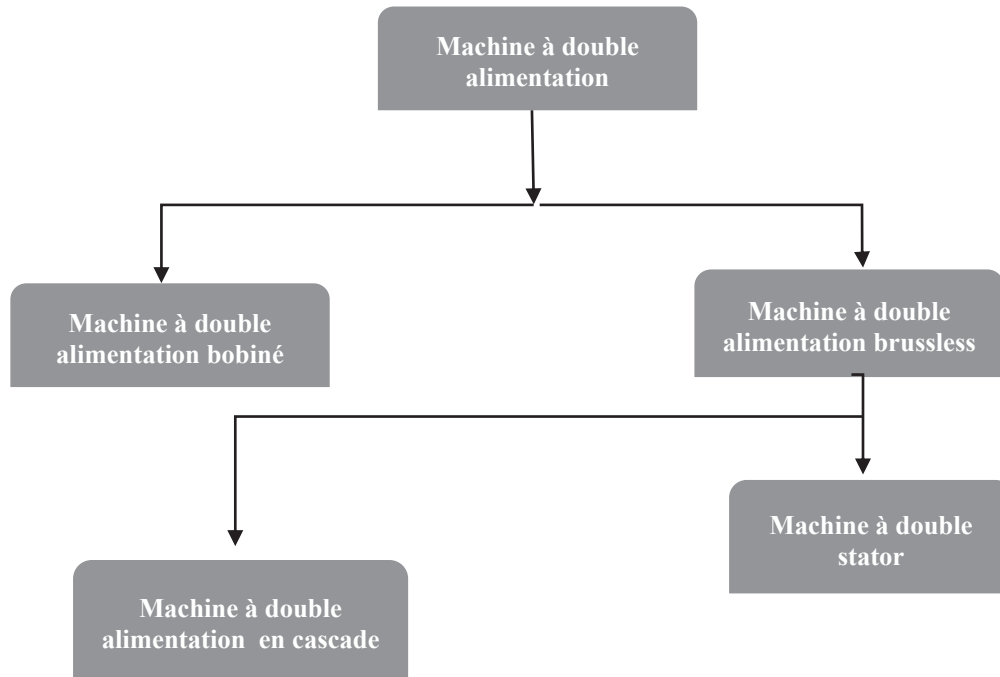


Figure 1.11 : Classification des machines asynchrone à double alimentation

### 1.3.3 Le principe de fonctionnement de la MADA :

En admettant que l'enroulement statorique de la machine à double alimentation est connecté directement au réseau, que l'enroulement rotorique triphasé est relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel à travers un système balais-bagues et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par:

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r = P \times \Omega_m \quad (1.2)$$

avec:

$\Omega_m$ : la vitesse mécanique du rotor.

$P$  : le nombre de paires de pole.

$\omega_m$  et  $\omega_r$  : les pulsation statoriques et rotoriques respectivement.

Le signe positive (+) dans l'équation (1.2) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor ( $\omega_m < \omega_s$ ), (en régime hypo-synchrone). Le signe négative (-) signifie que le champ tournant créés par les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés et que la

machine fonctionne en régime hyper-synchrone.

D' autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par :[5]

$$f_m = f_r + P \cdot f_m \quad (1.3)$$

Avec

$f_m$  : fréquence de rotation du rotor.

Dans ce cas le glissement est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (1.4)$$

D'après cette équation on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA [6]:

- **Stationnaire (g=1)** : le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$  ;Le circuit rotorique est siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence  $f_r$  identique à  $f_s$  .Dans ce cas, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hypo-synchrone (0<g<1)**: En tournant le rotor dans la direction du flux statorique, la fréquence  $f_r$  du rotor va commencer à décroître ; Plus la vitesse du rotor s'approche de celle de synchronisme, plus  $f_r$  tend vers **0**, de même la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme.
- **Synchrone (g=0)** : Lorsque la vitesse du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements rotoriques.
- **Hyper-synchrone (g<0)**: Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (1.3) et (1.4). Cette valeur négative signifie que l'ordre de succession de phase du rotor «  $a_r$  ,  $b_r$  ,  $c_r$  » s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

## 1.3.4 Mode de fonctionnement de MADA :

### a. Fonctionnement en générateur :

En général, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machines réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur.[7]

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA . Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau.

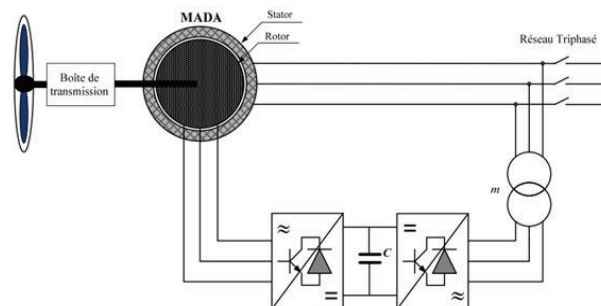
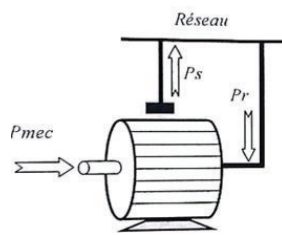


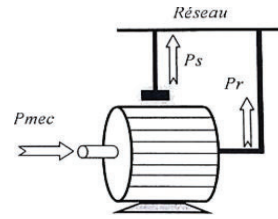
Figure 1.12 : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

Dans la littérature, on retrouve deux modes de fonctionnement générateur :

- **Hypo-synchrone** : La figure (1.13) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.
- **Hyper-synchrone** : La figure (1.14) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [6].



**Figure 1.13 :** Mode générateur Hypo-synchronisme



**Figure 1.14 :** Mode générateur Hyper-synchronisme

**P<sub>mec</sub>** : Puissance mécanique.

**P<sub>r</sub>** : Puissance de rotor.

**P<sub>s</sub>** : Puissance de stator .

## b. Fonctionnement pour application moteur :

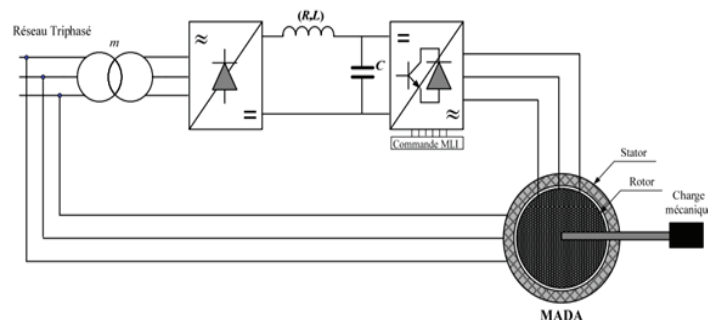
Pour le cas de l'application moteur de la MADA, les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaires et non linéaires avec ou sans capteur de vitesse ou de position [8]. L'objet de nos travaux, concerne le fonctionnement moteur où le rotor de la MADA est alimenté par un convertisseur et le stator est alimenté par le réseau figure(1.19).

Les travaux qui concernent principalement les stratégies de commande présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement.

### b.1 Première configuration :

#### Stator Alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur. La figure (1.15) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA [9].

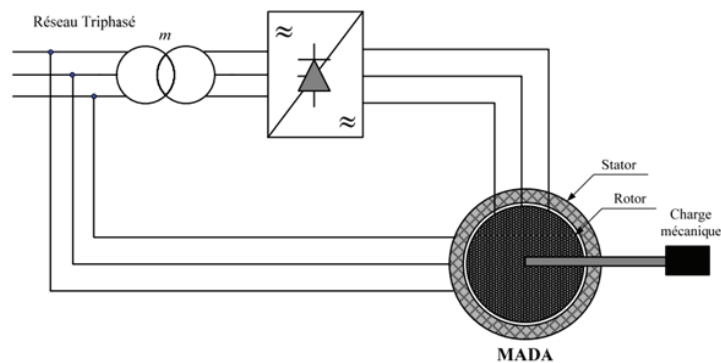


**Figure 1.15 :** Schéma synoptique proposé pour la première configuration.

**b.2. Deuxième configuration :**

**Stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur :**

Dans cette configuration les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cycloconvertisseur. La figure (1.16) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.



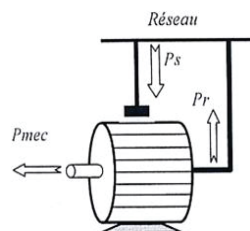
**Figure 1.16 :** Schéma synoptique proposé pour la deuxième configuration.

**b.3 Troisième configuration :**

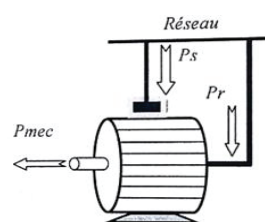
**MADA en cascade hypo-synchrone :**

Ce type de configuration permet de prélever de la puissance au rotor que l'on réinjecte au réseau de distribution. Cela a pour effet d'augmenter le glissement et donc de ralentir la machine, sans dégrader le rendement figure (1.17).

Le montage permet également de réaliser l'opération inverse, c'est-à-dire prélevé de la puissance au réseau pour accélérer le moteur. On n'est donc alors en hyper-synchronisme et non plus en hypo-synchronisme figure (1.18).



**Figure 1.17 :** Mode moteur Hypo-Synchrone



**Figure 1.18 :** Mode moteur Hyper Synchrone

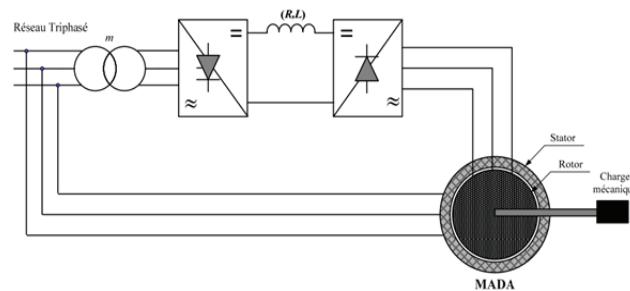


Figure 1.19 : Schéma synoptique proposé pour la troisième configuration.

#### b.4. Quatrième configuration :

##### MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux cycloconvertisseurs comme le montre la figure (1.20).
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure (1.21)
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun comme représenté à la figure (1.22).

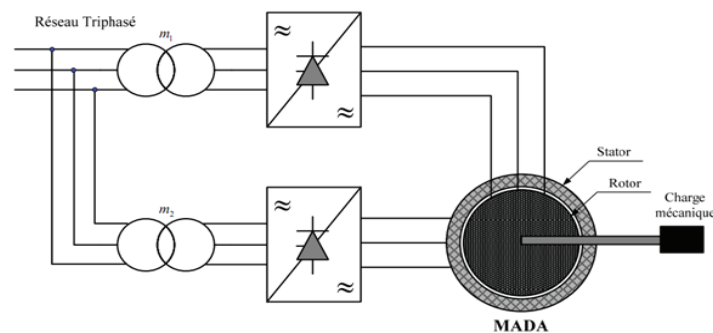


Figure 1.20 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs.

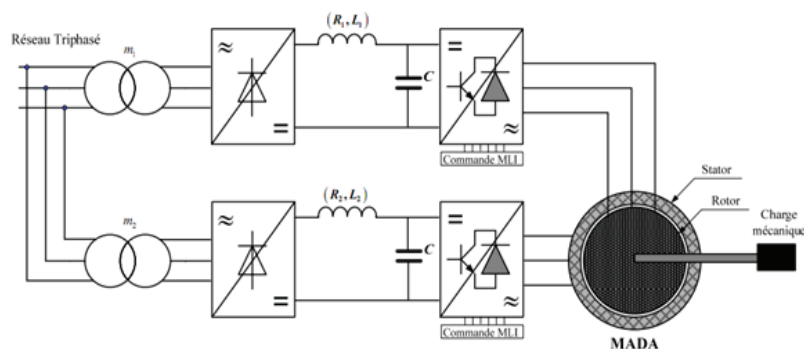


Figure 1.21. Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la MADA par deux onduleurs avec deux bus continus indépendants.

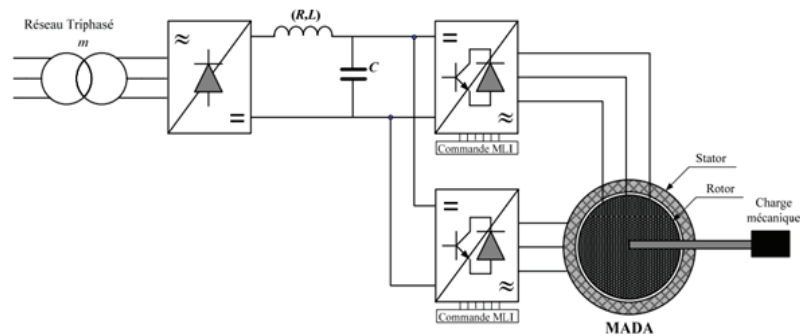


Figure 1.22. Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la MADA avec deux onduleurs et un bus continu commun.

### 1.3.5 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### a. Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages de la machine asynchrone à double alimentation nous citons : [10]

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse. [11]

### b. Inconvénients de la MADA :

Afin d'être objectif, il ne faut pas oublier les inconvénients apportés par cette machine :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour la machine à cage (un redresseur et un onduleur) et par conséquent une augmentation du prix.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance.

### 1.3.6 Etude et Transferts de puissance dans la MADA :

Grâce aux convertisseurs de puissance bidirectionnels, dans le circuit du rotor, la MADA est capable de travailler en tant que génératrice ou moteur de façon hyper-synchrone ou hypo-synchrone. On utilise le schéma de la MADA en convention moteur hypo-synchrone ; figure (1.23) car c'est la convention habituelle.

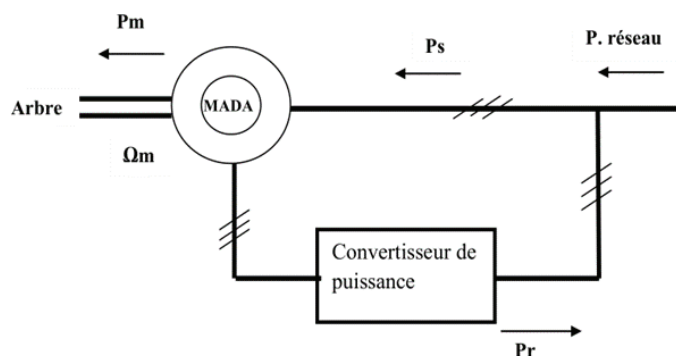


Figure 1.23 : la MADA en convention moteur hypo-synchrone

En supposant que les pertes dans les circuits du stator et du rotor peuvent être

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES ET LEURS DEFAILLANCES

négligées, on peut relier les puissances ainsi :

$$P_m = P_{\text{réseau}}$$

$$P_{\text{réseau}} = P_s - P_r$$

$$P_r = g \cdot P_s$$

$$P_s = \frac{P_{\text{réseau}}}{(1-g)}$$

**Sachant que :**

$P_m$  : Puissance mécanique ( $P_u < 0$  si la machine est entraînée)

$P_s$  : Puissance active absorbée par le stator ( $P_s < 0$  si la MADA est génératrice)

$P_r$  : Puissance active débitée par le rotor (son sens dépend du signe du glissement  $g$ )

$P_{\text{réseau}}$  : Puissance active fournie par le réseau à la machine ( $P_{\text{réseau}} < 0$  si la MADA est génératrice).

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de la MADA

→ En mode génératrice hyper-synchrone ( $\Omega_m > \Omega_s$ ,  $g < 0$ ),  $P_r$  est négatif, la puissance est transmise du rotor au réseau.

→ En mode génératrice hypo-synchrone ( $\Omega_m < \Omega_s$ ,  $g > 0$ ),  $P_r$  est positif, la puissance est transmise du réseau au rotor. Dans les deux cas la puissance statorique,  $P_s$  alimente le réseau. [12]

On peut résumer ceci dans le tableau suivant :

Mode de fonctionnement	Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$
Hypo- synchrone  $P_s = - (P_m + P_r)$	$P_s > 0$  $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
hyper synchrone  $P_m = + (P_s + P_r)$	$P_s > 0$  $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$  0

Tableau 1.1 : la puissance du MADA

**1.3.7 Le rôle de convertisseur statique :**

Le convertisseur statique se compose d'un redresseur, un bus continu et un onduleur. Il est réversible en courant puisque la puissance rotorique,  $P_r$  transite par le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypo-synchrone, et dans le sens opposé pour un fonctionnement hyper-synchrone. L'onduleur devient redresseur et le redresseur devient onduleur ; Sachant que :

$$P_r = g \cdot P_s \tag{1.5}$$

Et que généralement, la valeur absolue du glissement  $g$  est très inférieure à 1 ,  $P_r$  est seulement une fraction de la puissance statorique  $P_s$  . Le signe de  $P_r$  change avec le glissement  $g$  .

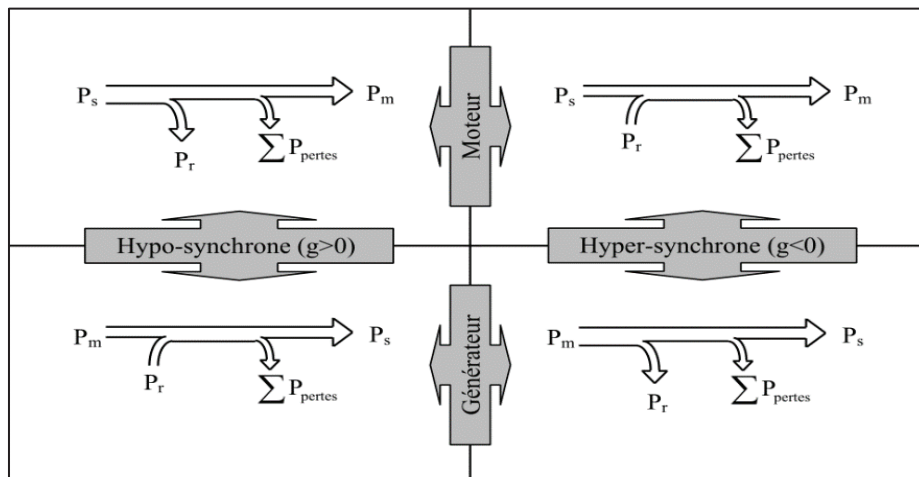
- On a deux types de fonctionnement possibles pour la génératrice selon le signe du glissement  $g$  .

**1.3.8 Les pertes et rendement :**

**a. LES PERTES :**

Les pertes d'une machine tournante peuvent être divisées en trois grands groupes. Par ordre d'importance usuelle décroissante, on peut distinguer la classification qui suit [13].

- Pertes dans les enroulements du stator et du rotor.
- Pertes le circuit magnétique.
- Pertes mécaniques.



**Figure 1.24** Modes et régimes opérationnels de la MADA

## a.1 Pertes dans les circuits électriques

Ce sont les pertes par effet Joule dans les enroulements d'induit d'excitation et plus généralement dans toutes les parties conductrices d'une machine traversées par des courants, y compris les balais.

## a.2 Pertes dans le circuit magnétique

Les pertes dans le circuit magnétique dans un matériau magnétique sont liées aux phénomènes inductifs résultants de la variation d'induction dans la matière (les matériaux utilisés pour ce circuit sont habituellement à base de fer).

Ces pertes regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault. Ces dernières correspondent à un déplacement des électrons libres du matériau sous l'effet d'une variation de flux magnétique, alors que les pertes par hystérésis correspondent à une modification locale du mouvement des électrons liés (au noyau), qui modifie l'orientation des moments magnétiques des atomes associés, sous l'effet de la variation de champ magnétique appliqué.

## a.3 Pertes mécaniques

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie tournante de la machine, que ce soit des frottements entre solides ou entre solide et fluide.

## b. Rendement

Pour un fonctionnement générateur de la MADA, le rendement est défini par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_s + P_r}{P_m} = \frac{P_s + P_r}{P_s + P_r + \sum P_{pertes}} \quad (1.6)$$

Dans l'équation (1.6), on considère que  $P_s$  et  $P_r$  sont positives (délivrées par la MADA), pour un régime de fonctionnement hyper-synchrone. Pour un fonctionnement hypo-synchrone,  $P_r$  devient négative (absorbée par la MADA).  $P_m$  est la puissance mécanique fournie à la MADA[14].

## 1.4 Défaillances dans les machine asynchrone :

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à

un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques...etc .

## 1.4.1 Les causes des défauts :

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

- a. **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations...etc.
- b. **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...etc.
- c. **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...etc. [15]

## 1.4.2 La classification des défauts :

Le moteur asynchrone comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums.

Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut ; Ces défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc...).

Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine ; la classification des défauts qui existent dans la machine selon leurs origines est présentée dans le Tableau suivant :

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES ET LEURS DEFAILLANCES

<b>DEFAILLANCE DES MACHINES ELECTRIQUES</b>	<b>INTERNE</b>	MECANIQUE	Contact entre le staor et rotor
			Défauts de roulement
			Mouvement des enroulements et des toles
			Excentricité
		ELECTRIQUE	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupure de barre ou anneaux
	Défaillance au niveau du circuit magnétique		
	<b>EXTERNE</b>	MECANIQUE	Surcharge de la machine
			Défaut de montage
			Charge oscillante
		ELECTRIQUE	Fluctuation de tension
			Source de tension déséquilibrées
			Réseau bruité
		Environnementale	Humidité
			Température
Propreté			

**Tableau 1.2** : la classification des défauts de la machine électrique

### 1.4.3 L'étude statistique des défauts :

Ces dernières décennies, Une série d'études statistiques a été faite sur les pannes qui peuvent attribuer les machines à induction ; En 1988 une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, a réparti les pannes des machines asynchrone de moyenne puissance (de 50KW à 200KW) comme le suivant [16] :

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES ET LEURS DEFAILLANCES

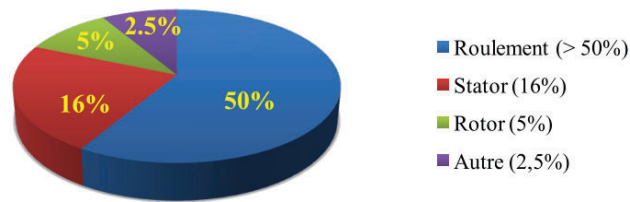


Figure 1.25 : Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance

La même étude montre qu'entre 1973 et 1988 les pannes statoriques ont passées de 78% à 60% et celles du rotor de 12% à 22 %. Cette variation se traduit par l'augmentation de l'utilisation de l'isolation dans cette période. La répartition des différents défauts est comme suit :

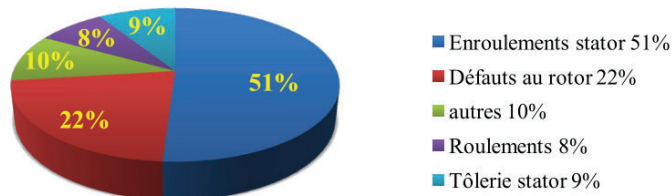


Figure 1.26 : Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de faible puissance.

Il y a plusieurs répartitions. Pour les moteurs à induction de grande puissance (de 100 kW à 1MW) l'étude statistique de Thorsen et Dalva a donné les résultats suivants:

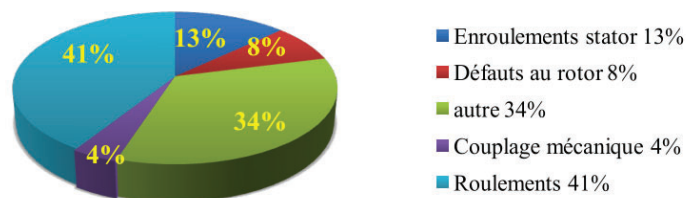


Figure 1.27 : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance par Thorsen

Et pour la même gamme de puissance l'étude de Thomson en 1999 a confirmé les résultats d'études précédentes

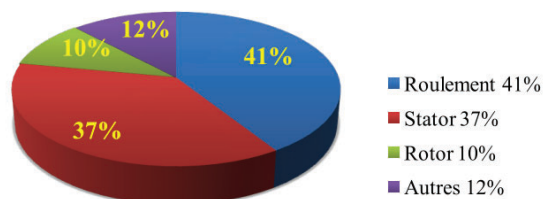


Figure 1.28 : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 1999

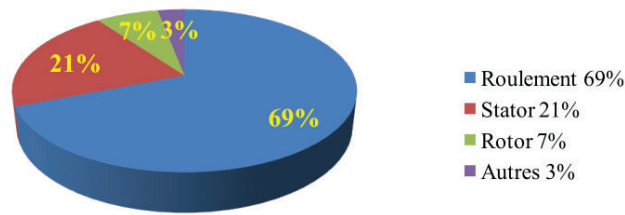


Figure 1.29 : Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 2008

- ❖ On remarque que la répartition des pannes a changé grâce au développement de techniques de fabrication de ces machines.
- ❖ Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [16]. Mais la source des pannes la plus fréquente reste les roulements.
- ❖ On remarque qu'il y a certains défauts plus fréquents que d'autres et cela d'après **THORSEN** et **DALVA** dépend de l'environnement de fonctionnement du moteur qui joue un rôle prépondérant, le taux de panne pour des moteurs utilisés en extérieur, où l'environnement est humide (aux usines terrestres et en mer par exemple), peut-être 2-5 fois plus grandes que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.
- ❖ Ainsi que La gamme de puissance des moteurs à induction, par exemple on trouve que le taux des pannes mécanique dues aux roulements est très élevé dans les machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW), par contre les défauts statoriques et rotoriques sont les plus apparus pour les machines de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW).

Tenons compte de ces statistique nos études vont se dirigés vers les types de défauts les plus courants. Parmi ces défauts, nous trouvons les suivantes :

#### 1.4.4 Principaux défauts liés à la machine asynchrone :

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents défauts pouvant affecter la machine asynchrone ; On distingue trois types de défauts dans la machine asynchrone:

- Défauts due au réseau d'alimentation
- Défauts affectant le stator.
- Défauts affectant le rotor.

##### a. Défaillance due au réseau d'alimentation :

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature

aléatoire, dont les plus fréquents sont:

- Coupure de phase d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature:

- Climatique (pluie, foudre ...).
- D'environnement (branches d'arbres, plombs de chasses,...).
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux. [17]

### b. Défauts affectant le stator :

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit entre une ou plusieurs phases.

Rappelons que les défauts statoriques peuvent être : des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des courts-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, provoquant tous une dissymétrie au niveau du stator. (Figure 1.34).

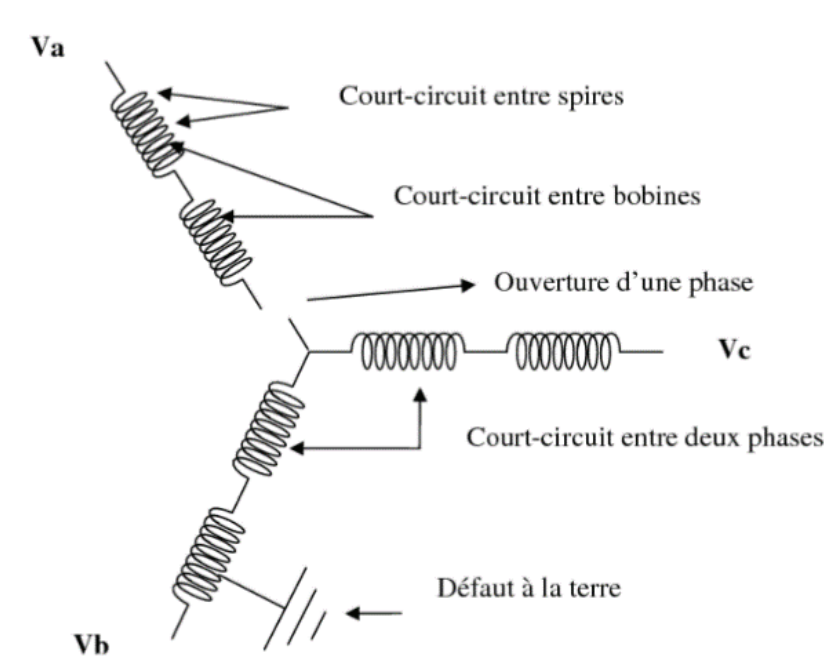


Figure 1.30 : Représentation des différents défauts statoriques possibles

A terme, ces défauts destructifs pour les couches de vernis protecteur des

enroulements, conduisent à une machine déséquilibrée et à une modification de sa classe d'isolation.

Cette détérioration au niveau de l'isolation peut exister pour diverses raisons :

- Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique.
- Déconnexion des attaches des enroulements.
- Contamination due à l'humidité et à la saleté.
- Courts-circuits ou contraintes de démarrage.
- Décharges électriques.

### **b.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur ; ou les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique.

De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

### **b.2 Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statorique dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [16].

### **b.3 Court-circuit entre phases :**

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions de l'incidence de ce défaut sur le système.

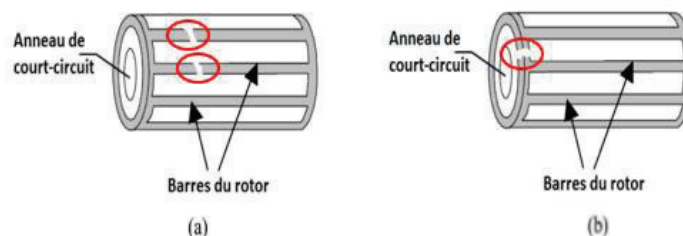
L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statorique sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [18].

### c. Défauts affectant le rotor :

#### c.1 Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique :

La détection de ce type de défaillances est souvent difficile vu le fait que la machine continue de fonctionner en présence de ces défaillances. Ces derniers ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et modifient la valeur du couple électromagnétique, qui va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [20].



#### c.2 Défaut de roulements :

Ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionné dans la littérature des électrotechniciens. les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une autre extérieure, entre lesquelles existe

un ensemble de billes ou de rouleaux tournants. En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations détectables et augmente le niveau du bruit.

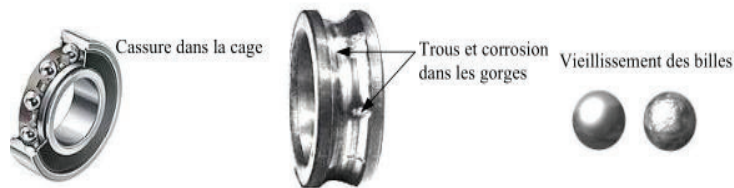


Figure 1.32 : Défaillances des roulements à billes.

### c.3 Défauts d'excentricités :

L'excentricité de la machine est le résultat d'uniformité d'entrefer. Ce défaut peut apparaître suite à une flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un manque de précision lors de la construction de la machine. Il existe trois types d'excentricité (fig 1.33):

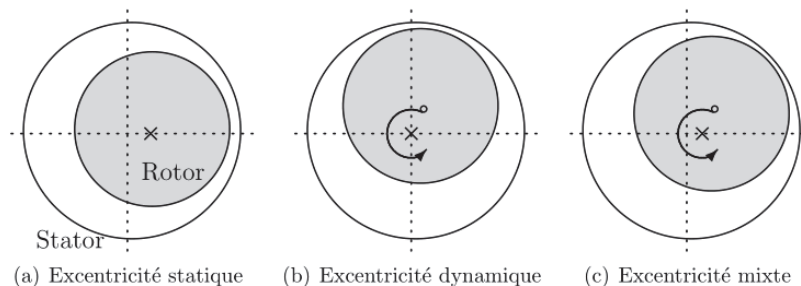


Figure 1.33: Représentation des types Excentricité

- **L'excentricité statique :**

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par la forme ovale de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

- **L'excentricité dynamique :**

Pour ce qui est de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation, et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Les causes de ce type d'excentricité sont, la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique [21].

- **L'excentricité mixte :**

C'est la combinaison des deux excentricités précédemment citées.

### **1.4.5 Conséquences des défauts :**

En général, ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être [22]:

- Un déséquilibre des courants de ligne et des tensions.
- Une augmentation des oscillations du couple.
- Une diminution du couple moyen.
- Une augmentation des pertes et donc une réduction de l'efficacité énergétique.
- Un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.

### **1.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons établi une description de la machine asynchrone , son principe de fonctionnement ; Ensuite nous sommes intéressés par la constitution de la machine asynchrone à double alimentation (son principe de fonctionnement, classification, comparaisant entre la différente variante, régime de fonctionnement et Les pertes et rendement..etc.),ensuite on a également fait mention une étude statique qui présente les défauts pouvant se produire sur la MAS et leur conséquences.

## **2.1. Introduction**

La modélisation et la simulation 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 parâtre plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié [22].

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, que ce soit en mode sain ou en présence de défaut.

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 Conception assisté par ordinateur C.A.O**

### **2.2.1 Définition de C.A.O**

Le terme de « **Conception assistée par ordinateur** » ou bien la C.A.O est aujourd'hui utilisée à tort et à travers, ce qui lui vaut de perdre de sa signification. Pour des personnes, cette appellation couvre l'ensemble des tâches qu'un ordinateur est capable d'assumer lors du développement de produits techniques, les spécialistes utilisent plutôt le vocabulaire de « X » assistée par ordinateur (X.A.O), où « X » peut être remplacé par « dessin », « fabrication », « conception ». D'autre part, il est naïf de croire que l'emploi des moyens de C.A.O n'est justifié que lors du calcul des circuits électroniques intégrés, avant de dissenter sur les différentes possibilités de C.A.O dans le domaine des machines électriques. [23]

### **2.2.2 Les Approches de C.O.A**

- Réduction des temps et délais de conception des nouveaux produits donc réduction des coûts de conception.
- Redéfinir les méthodes conventionnelles de conception.
- Possibilité de simuler et de tester facilement les nouveaux systèmes avant leur construction.

- Possibilité d'étudier et de tester un plus grand nombre de prototypes avec des géométries différentes et complexes.

Alors, comme effets positifs. Ces outils permettront aux concepteurs des systèmes de faire preuve de plus d'innovation et de créativité par la proposition de topologies nouvelles plus performantes que seuls des calculs tridimensionnels peuvent dimensionner entièrement et correctement.

## 2.3. Les équations de Maxwell

### 2.3.1 Introduction

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.

### 2.3.2 Les équations

#### *a. Equation de Maxwell-Faraday*

Le champ électrique 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 [26]

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

#### *b. 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. [24]

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

#### *c. Equation de conservation de flux magnétique*

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

#### *d. 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.

[25]

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

Avec :

$\vec{E}(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$  Champ électrique

$\vec{B}(\text{T})$  Induction magnétique

$\vec{H}(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$  Champ magnétique

$\vec{J}(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$  Densité de courant de conduction

$\vec{D}(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$  Induction électrique

$\rho(\text{C} \cdot \text{m}^{-3})$  Densité de charge volumique

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$  Densité de courant de déplacement

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leurs joindre des relations qui traduisent le comportement des milieux à étudier :

Alors :  $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$

$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}$

**La relation de la loi d'Ohm**

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

Tels que :

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique de vide ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )

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

$\sigma$  Conductibilité électrique ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )

**Remarques :**

- 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  $\vec{J}$  sont des distributions réelles et sont supposées connues.

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

### **2.3.3 Mode employé :**

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, deux modes de résolutions peuvent être employé [24] :

#### **a. Mode magnétostatique :**

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

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

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\overline{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.6)$$

$$\overline{\text{div}} \vec{B} = \vec{0} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}r \quad (2.8)$$

La condition (Eq2.7) permet de définir une fonction en vecteur potentiel  $\vec{A}$  telle que :

$$\vec{B} = \overline{\text{rot}} \vec{A} \quad (2.9)$$

Pour que  $\vec{A}$  soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition  $\text{div}(A) = 0$  appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement L'unicité de la solution.

Par la substitution de (2.9) et (2.8) dans (2.6) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\nu \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}}(\nu \cdot \overrightarrow{Br}) \quad (2.10)$$

Où  $\nu = \frac{1}{\mu}$  : est la réflectivité magnétique.

**b. Mode magnétique transitoire :**

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\nu \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{Br} + \sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}} V = 0 \quad (2.12)$$

## 2.4 Les méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent de résoudre les équations décrivant le comportement électromagnétique des systèmes à deux ou à trois dimensions avec un minimum d'hypothèses. Parmi ces méthodes de résolution numériques les plus utilisées sont la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. Chacune de ces deux méthodes présente des avantages et des inconvénients et est plus ou moins adaptée suivant le type de problème posé.

### 2.4.1 Méthode des différences finis

La méthode des différences finies dans le domaine temporel est une méthode numérique basée sur la discrétisation en temps et en espace des équations de Maxwell. Elle est très utilisée pour traiter des problèmes de rayonnement électromagnétique (Compatibilité électromagnétique, détection de mines, antennes), pour l'analyse de l'interaction des ondes avec des tissus humains, pour le développement de composants micro-ondes, et aussi en optique.[13]

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

Avantages	Inconvénients
Formulation relativement simple	Limitée en termes de précision
Les calculs s'effectuant directement dans le domaine temporel et La robustesse de l'algorithme qu'elle utilise et dans la possibilité des études sur une large bande de fréquence	Le maillage repose sur des éléments carrés ou carrés curvilignes.

Tableau 2.1. Avantages et inconvénients de la méthode des différences finis.

### 2.4.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) dite méthode "universelle" est un outil le plus utilisée et la plus puissante des méthodes numériques. Elle est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell [26]

La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce l'utilisation de la méthode des éléments finis. En effet, beaucoup de laboratoires et chercheurs se sont penchés sur différents aspects pour aboutir actuellement à des outils de calculs permettant de tenir compte de plusieurs phénomènes physiques jusque-là négligés ou approchés par des modèles externes.

Elle permet de décrire fidèlement des géométries complexes et de tenir compte des non linéarités des propriétés physiques dans les matériaux magnétiques.

La méthode d'éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace et donne beaucoup d'informations précises sur le comportement des machines électriques mais elle requiert un temps de calcul important. Aujourd'hui, on peut effectuer les analyses en régimes transitoires pas à pas dans le temps de la machine électrique grâce à la disponibilité des ordinateurs puissants.

Cette méthode a permis un apport significatif en termes d'identification des paramètres des modèles circuit alliant ainsi la rapidité des modèles circuits et la précision des modèles champ.

L'utilisation de cette méthode pour la modélisation des défauts dans les machines électriques est une étape importante qu'ont franchie un certain nombre de chercheurs

Lorsqu'un défaut se produit dans la machine électrique, la répartition des courants dans les encoches et la distribution du champ sont plus ou moins modifiées en fonction de la gravité du défaut.

La méthode d'éléments finis peut être utilisée pour le calcul de champs et l'identification précise des paramètres de la machine en présence de défaut.

L'avantage qu'apporte une méthode basée sur le calcul de champ réside dans le fait qu'elle décrit les phénomènes localement, en particulier un défaut, elle en donne ensuite une représentation globale vu du circuit électrique équivalent. Actuellement, On peut disposer d'un outil complet permettant la simulation d'une machine électrique en présence d'un défaut de court-circuit et connectée à son alimentation. [27]

### 2.4.3 Principe de la méthode des éléments finis :

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales.

Pour élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (3.14) \quad (2.13)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

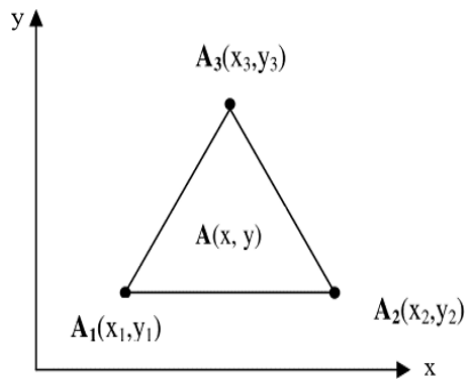
$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (2.14)$$

Les constantes **a**, **b**, **c** et **d** sont à déterminer en utilisant les potentiels aux nœuds correspondants. Le potentiel **A<sub>e</sub>** est défini sur l'élément et nul ailleurs. La valeur approximée du potentiel dans tous les éléments du domaine de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} Ae(x, y) \quad (2.15)$$

$e$  : Nombre d'élément et  $ne$  : Le nombre totale des éléments du domaine ( $\Omega$ ).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Fig. 2.1).



**Figure 2.1** : Fonction d'interpolation d'un élément.

**a. Implémentation de la méthode des éléments finis**

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par la méthode des éléments finis, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type.

**a. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Adaptation aux géométries complexes.	Mise en œuvre relativement difficile.
Prise en compte des non linéarités.	Inapplicable sur les domaines infinis.
Temps de calcul relativement avantageux.	Présence des singularités dans le domaine d'étude.

**Tableau 2.2.** Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.

### 2.4.4 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution: [28]

- 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 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.

#### a. Structure du Flux 2D :

##### a.1 Introduction

Ce logiciel a été conçu et réalisé en 1981 par le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Il est depuis cette date commercialisé par la société CEDRAT et est aujourd'hui utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnéto-statiques, il comprend aujourd'hui 20

modules qui permettent d'aborder l'ensemble des problèmes qui se posent lors de la conception d'un appareil électromagnétique.

### a.2 Définition

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 [29].

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.

### a.3 La résolution d'un problème

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [30] :

- **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**).

- **Module processeur**

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

- **Module post-processeur**

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.

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

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. De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (2.5).

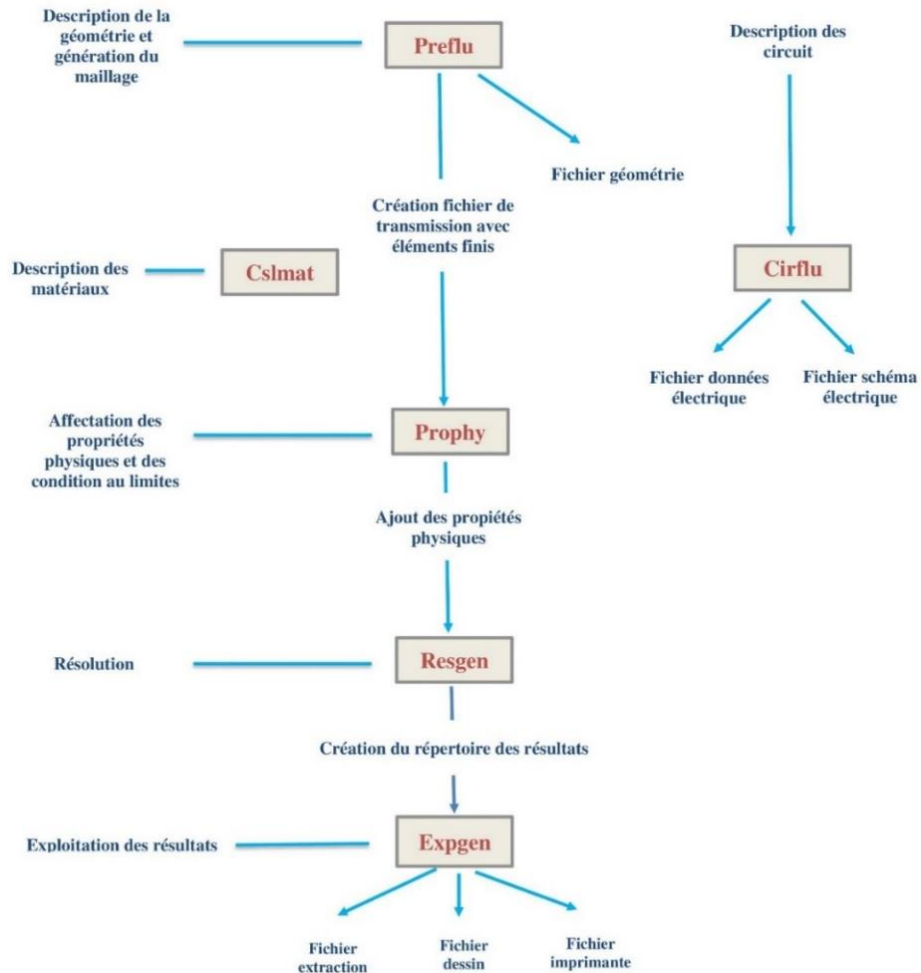


Figure 2. 2. schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

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 [29] :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas la bute principale 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.

## 2.5 Evaluation des Pertes dans les machines asynchrones :

### 2.5.1. Pertes par effet Joule en cuivre

#### a. Dans le stator

Les pertes par effet Joule dans les enroulements du stator sont :

$$P_{js} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_s^2 \quad (2.16)$$

$R_s$  : La résistance statorique totale d'une phase ;

$I_s$  : Le Courant de phase ;

$m_1$  : Le Nombre de phase.

La résistance statorique par phase calculer par :

$$R_1 = \rho_1 \frac{L_{1tot}}{S_1} \quad (2.17)$$

$\rho$ : La résistivité de fil ( $\Omega \cdot m$ )

$L_{tot}$  : La longueur de fil ( $m$ )

$S$  : La section droite d'aire de fil ( $m^2$ )

#### b. Dans le rotor

Pour le secondaire, les pertes dans le cuivre sont :

$$P_{jr} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (2.18)$$

$R_2$  : La résistance rotorique totale d'une phase.

$I_2$  : Courant de la phase d'enroulement rotorique.

La résistance rotorique par phase calculer par :

$$R_2 = \rho_2 \frac{L_{2tot}}{S_2} \quad (2.19)$$

Ou

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (2.20)$$

Avec  $g$  : est le glissement de la machine asynchrone et  $P_{tr}$  : est la puissance transmis de stator au rotor.

### 2.5.2 Pertes fer :

Les pertes dans le fer se composent principalement de pertes Hystérésis  $P_h$  et pertes par courant de Foucault  $P_f$ .

#### a. Pertes d'Hystérésis

Les pertes d'Hystérésis représentent l'énergie nécessaire à l'aimantation cyclique alternative du fer, [22].

Le calcul de ces pertes est réalisé par l'équation suivante :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (2.21)$$

$K_h$  : Coefficient de pertes par Hystérésis.

$B_m$  : L'induction maximale dans le fer.

$f$  : Fréquence de l'induction (Hz).

### **b. Pertes par courant de Foucault**

L'aimantation cyclique alternative engendre des courants induits dans le fer, ces courants sont

appelés courants de Foucault, [22].

$$P_f = K_r (d \cdot f \cdot B_m)^2 \quad (2.22)$$

Avec :

$P_f$  : Pertes par effet de Foucault

$d$  : Epaisseur de la tôle du fer

$f$  : Fréquence de l'induction (Hz)

$K_r$  : Coefficient caractéristique de tôle

Par conséquent les pertes fer totale égale à la somme des pertes par courant de faucault et les pertes d'Hystérésis.

$$P_{fer\ totale} = P_h + P_f \quad (2.23)$$

### **2.5.3 Pertes mécanique :**

Pour déterminer les pertes mécanique  $P_{mec}$  on utilise la technique de séparation des pertes, Cette technique consiste à alimenter le moteur à vide sous tension variable et on mesure :

- Le courant statorique  $I_0$
- La puissance active  $P_0$
- La tension entre phase  $U_0$
- La vitesse de rotation pour vérifier que la valeur glissement est faible.

En fonctionnement à vide la puissance utile est null ( $P_u=0$ ) donc on peut écrire

$$P_0 = P_{joule} + P_{fer} + P_{mec} \quad (2.24)$$

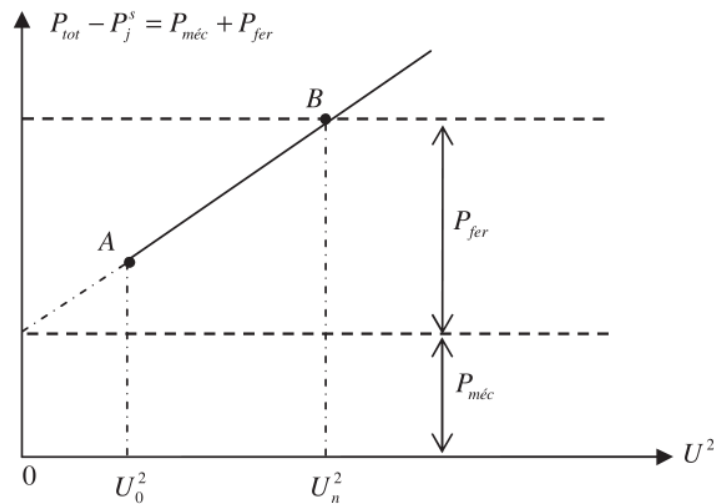
Les pertes par effet de joule sont donné par :

$$P_{joule} = 3R_s I_s^2 \quad (2.25)$$

De se fait La relation devient :

$$P_0 - P_{joule} = P_{fer} + P_{mec}$$

Ensuite on trace la courbe  $P_0 - P_{js} = f(U_s^2)$  la différence entre ces deux pertes est que les pertes fer  $P_{fer}$  varient proportionnellement au carré de la tension d'alimentation et les pertes mécanique  $P_{méc}$  égale a un constant .



**Figure 2.3** la technique de séparation des pertes

### 2.5.4 Evaluation dans le logiciel de résolution :

Le logiciel **Flux 2d** propose aux utilisateur des outils et algorithmes intégrés qui permet le calcul des pertes et faire des evaluation [31].

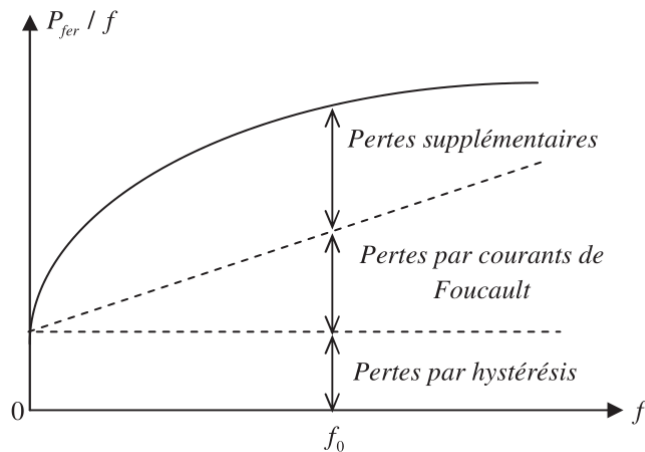
#### a. Les pertes fer :

Le calcule des pertes fer se fait à travert la commande de calcule par formules de Bertotti qui va donné une estimation de ces pertes.

#### a.1 Expression générale des pertes fer dans le modèle Bertotti :

les pertes magnétiques totale (pertes fer totale) peuvent décomposer en trois catégories :

- Les pertes par hystérésis ( $P_h$ ) proportionnelles à la fréquence  $f$ , qui sont significatives uniquement à base fréquence
- Les pertes classiques par courant de Foucault ( $P_f$ ), qui sont proportionnelles à  $f^2$
- Les pertes supplémentaire ( $P_{sp}$ ), qui sont proportionnelles à  $f^{\frac{3}{2}}$



**Figure 2.4** Décomposition des pertes fer

La séparation des deux derniers types de pertes est artificielle, elles peuvent être regroupées en un seul terme et correspondent alors aux courants induits réels se développant dans la tôle.

La théorie de Bertotti nous donne l'expression des pertes en fonction de la fréquence et de l'induction maximale atteinte (induction crête)

La densité de puissance s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$dP = \underbrace{c_1 B_m^2 f}_{P_h} + \underbrace{c_2 (B_m f)^2}_{P_f} + \underbrace{c_3 (B_m f)^3}_{P_{sp}} \quad (2.25)$$

Où

$B_m$  est l'induction maximale atteinte

$f$  est la fréquence

$c_1$  est le coefficient de pertes par hystérésis

$c_2$  est le coefficient de pertes classique par courant Foucault

$c_3$  est le coefficient de pertes supplémentaires

Les coefficients  $c_2$  et  $c_3$  s'expriment à l'aide des relations suivantes :

$$c_2 = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} \text{ où}$$

$\sigma$  : est la conductivité du matériau

$d$  : est l'épaisseur de tôle

$$c_3 = \sqrt{\sigma \cdot G \cdot V_0 \cdot S} \text{ où}$$

$G$  : est un coefficient sans dimension

$S$  :est la section de tôle

$V_0$  : est le champ constant qui dépend de la différence de champ coercitif entre deux Mass (objets magnétique d'après la théorie de berttoti).

**a.2 calcul de pertes en magnéto-statique :**

Dans une application magnéto-statique ;on s'intéresse au régime permanent ;Les variable inconnues (potentiels) et les grandeurs physiques (champ magnétique et induction magnétique).

La représentation complexe est donc utilisée,et la solution peut être obtenue en une seule résolution [31].

$$dP_{\text{moy}} = \underbrace{K_h B_m^2 f}_{\text{Pertes par Hystérésis}} + \underbrace{\frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2}_{\text{Pertes Classiques}} + \underbrace{K_e (B_m f)^{\frac{3}{2}} \cdot 8,67}_{\text{Pertes supplémentaires}} \quad (2.26)$$

Où

$K_h$  : est le coefficient de pertes par hystérésis

$K_e$ : est le coefficient de pertes supplémentaires

$\sigma$  est la conductivité du matériau

$d$  est l'épaisseur de tôle

Qui devient dans le cadre du calcul FLUX 2D :

$$dP_{\text{moy}} = \left[ K_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^{\frac{3}{2}} \cdot 8,67 \right] \cdot kf \quad (2.27)$$

où

$kf$  est le coefficient de foisonnement (Proche de 1) (nécessaire pour calculer le volume totale occupé par les tôles)

La puissance moyenne dissipée dans une région volumique s'écrit :

$$P_{\text{moy}} = \iiint_{\text{reg}} dP_{\text{moy}} dV \quad (2.28)$$

Le logiciel utilise la valeur de l'induction en chaque point ; Par conséquent,il convient d'être très prudent avec les résultats concernant les problèmes représentant des machine tournantes avec l'application magnéto-statique.

En effet pour ce type de modélisation ,le rotor est fixé et le mouvement est introduit en modifiant la résistivité des conducteurs au rotor :Ainsi,l'induction calculée est effectivement maximale en un point pour cette position donnée du rotor par

rapport au stator à cause des harmoniques d'espace, il s'ensuit que, l'induction calculée ne correspond pas à l'induction maximale que l'on obtiendrait sur une période si le rotor tournait ; En conséquence, le calcul des pertes doit être dans ce cas avec beaucoup de précaution.

De plus, dans le cas d'une approximation non linéaire pour la loi de comportement  $B(H)$ , la saturation introduite à l'aide d'un modèle équivalent peut altérer les valeurs locales de l'induction.

**a.3 Calcul des pertes en magnétique transitoire :**

dans une application magnétique transitoire, on s'intéresse au régime variable (régime transitoire) ; Le calcul réalisé est un calcul en pas à pas dans le temps.

La densité volumique de puissance  $dP_{moy}$  s'écrit :

$$dP_{moy} = \underbrace{K_h B_m^2 f}_{\text{Pertes par Hystérésis}} + \underbrace{\frac{\sigma d^2}{12} (B_m f)^2}_{\text{Pertes Classiques}} + \underbrace{K_e (B_m f)^{\frac{3}{2}}}_{\text{Pertes supplémentaires}}$$

Qui devient, dans le cadre de calcul FLUX 2D :

$$dP(t) = \left[ K_h B_m^2 f + \frac{\sigma d^2}{12} \left( \frac{dB}{dt}(t) \right)^2 + K_e \left( \frac{dB}{dt}(t) \right)^{\frac{3}{2}} \right] K_f \tag{2.29}$$

la densité volumique de puissance moyenne (sur une période)  $dP_{moy}$  d'écrit :

$$dP_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T dP(t) dt$$

que se met sous la forme :

$$dP(t) = K_h B_m^2 f K_f + \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{\sigma d^2}{12} \left( \frac{dB}{dt}(t) \right)^2 + K_e \left( \frac{dB}{dt}(t) \right)^{\frac{3}{2}} \right] K_f dt \tag{2.30}$$

la puissance moyenne dissipée dans une région volumique, s'écrit alors :

$$P_{moy} = \iiint_{reg} dP_{moy} dV$$

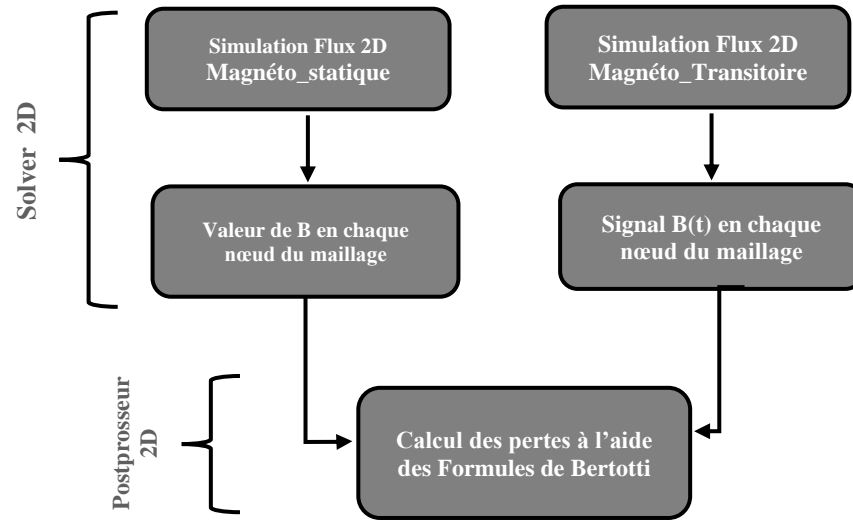


Figure 2.5 modèle de calcul des pertes fer proposé par Flux2D

**a.4 Estimation des coefficient de Bertotti :**

pour calculer les pertes fer par la formule de bertotti,il faut définir pour les régions concernées les coefficients présentés dans le tableau ci-dessous.

Coefficient	Unité
$K_h$ le coefficient de pertes par hystérésis	$WsT^{-2}m^{-3}$
$\sigma$ la conductivité du matériau (coefficient des pertes classique)	$Sm^{-1}$
$K_e$ coefficient des pertes supplémentaires (excés)	$W(Ts^{-2})^{3/2}m^3$
$d$ épaisseur de tôle	$m$
$K_f$ le coefficient de foisonnement ( $0 < K_f < 1$ )	-
$f$ Fréquence (sauf en magnéto-statique)	$Hz$

Tableau 2.3. Les coefficients de Bertotti

Pour déterminer les coefficient  $K_h$  et  $K_c$  , il faut se référer aux informations fournies par les fabricants de tôles,

En générale les fabriquants fournissent la valeur des pertes fer pour différentes valeurs d'induction et de fréquence ;deux valeurs de pertes,pour deux valeurs d'induction magnétique et/ou de fréquence suffisent pour déterminer ces coefficients avec l'équation (Eq 2.25) fournie ci-dessus.

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

Pour la tôle que nous avons utilisé on a les caractéristiques suivantes :

- coefficient des pertes classique  $\sigma = 4500000 \Omega^{-1} m^{-1}$
- L'épaisseur de tôle  $d = 0.5 \text{ mm}$
- coefficient de foisonnement  $k_f = 0.98$

Les valeurs de pertes à 50 Hz, Pour  $B_m=1.0 \text{ T}$  et  $B_m=1.5 \text{ T}$  permettent de définir les coefficients  $K_h$  et  $K_e$

- coefficient de pertes par hystérésis  $k_h = 306.5 \text{ Ws/T}^2 m^3$
- coefficient des pertes supplémentaires  $k_e = 0.61 \text{ Ws}^{1.5} / m^3 / T^{1.5}$

### b. Les pertes par effet joule :

Le calcul des pertes par effet joule se fait à travers la création d'un capteur de pertes joule en choisissant les composants appropriés dans notre cas les conducteurs bobinés Statoriques (Pour les pertes par effet joule statorique  $P_{js}$ ) et les conducteurs bobinés rotoriques (Pour les pertes par effet joule rotorique  $P_{jr}$ ), ensuite on fait une évaluation de ces capteurs à la fin de résolution dans postprocesseur pour exploiter les résultats.

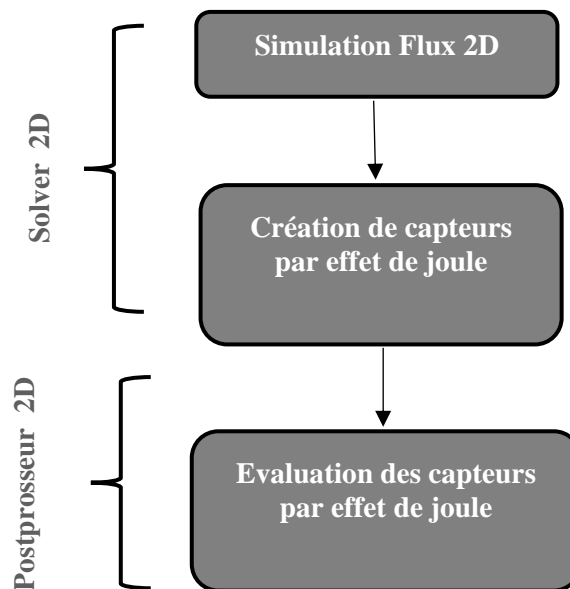


Figure 2.6 modèle de calcul des pertes joule proposé par Flux2D

## 2.6 Les caractéristiques de la machine étudiée :

Le tableau 3.1 ci-dessus présente les données de la machine asynchrone à double alimentation étudiée :

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

	Paramètres	Valeurs
Machine étudiée	Puissance	<b>2kw</b>
	Tension	<b>380 v</b>
	Nombre de phase	<b>3</b>
	Fréquence nominale	<b>50 Hz</b>
	Nombre de pole	<b>4</b>
Stator	Nombre d'encoches	<b>48</b>
	Diametre extérieur	<b>180 mm</b>
	Diamètre interieur	<b>121 mm</b>
Rotor	Nombre d'encoches	<b>36</b>
	Diamètre exterior	<b>120 mm</b>
	Diametres interieur	<b>50 mm</b>
Entrefer	Epaisseur	<b>0.44 mm</b>

Tableau 2.4 Paramètres globales de la machine

### 2.6.1 Construction du modèle de la machine asynchrone à double alimentation :

#### a. Procédure de construction du modèle par FLUX2D :

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut.

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première encoche rotorique. Le reste de la

géométrie et du maillage est créé par propagation.

Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties de la machine, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entrée du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (**DIS**) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre, **Flux2D** vas automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondants à ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage.

Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

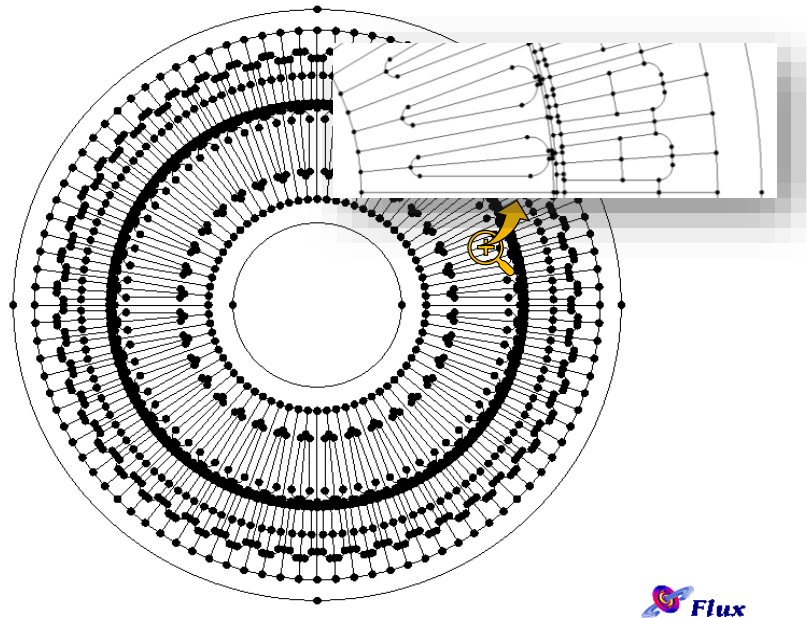


Figure 2.7. Structure de la géométrie de la MADA.

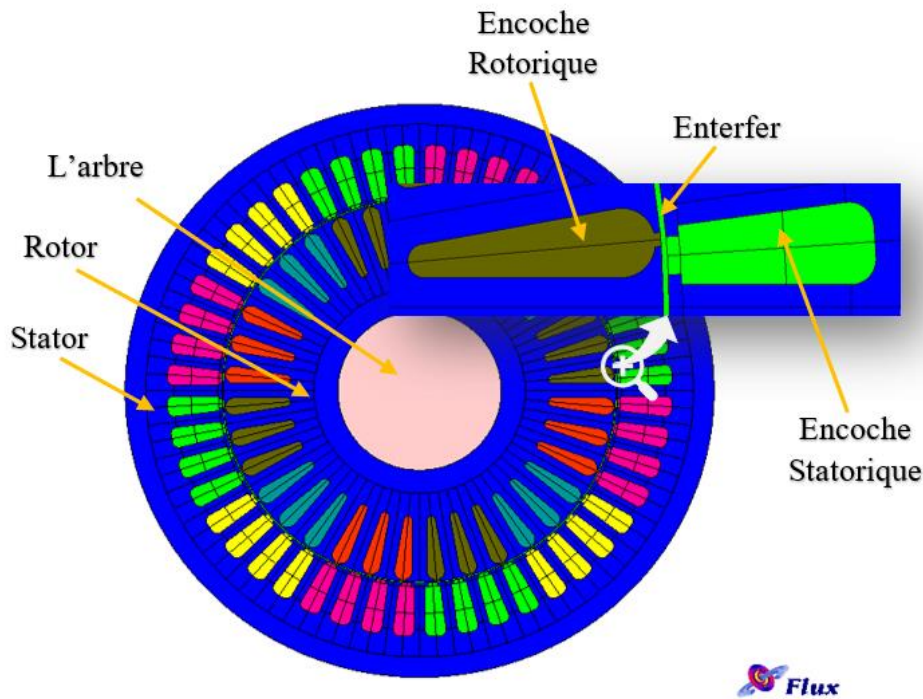


Figure 2.8 Structure de la géométrie de la MADA après l'affectation des régions surfaciques.

### b. Génération du maillage :

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module PreFlux, mais le size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. PreFlux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est O (0,0), l'angle égal à  $360/36$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/48$ . On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 35 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 23fois avec le choix de commande **ADD FACES** and **ASSOCIATED LINKED MESH GENERATOR** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 47 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **BUILD Faces** pour créer le reste des surfaces.

La figure 2.8 présente la géométrie avec les points du maillage.

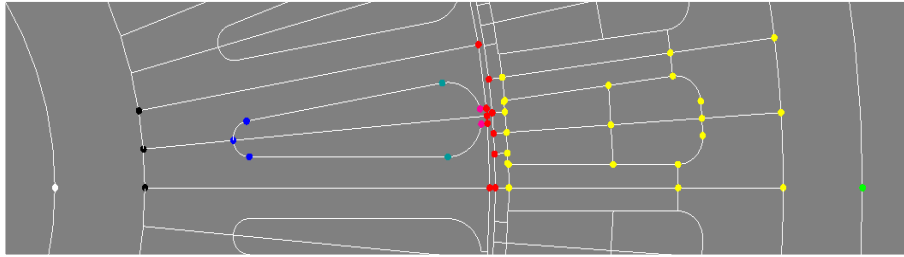


Figure 2.9 la représentation des points de maillage Principale

Jusqu'à ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choisit la commande Mesh lines puis la commande Mesh faces et le maillage sera schématisé. La figure 2.10 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

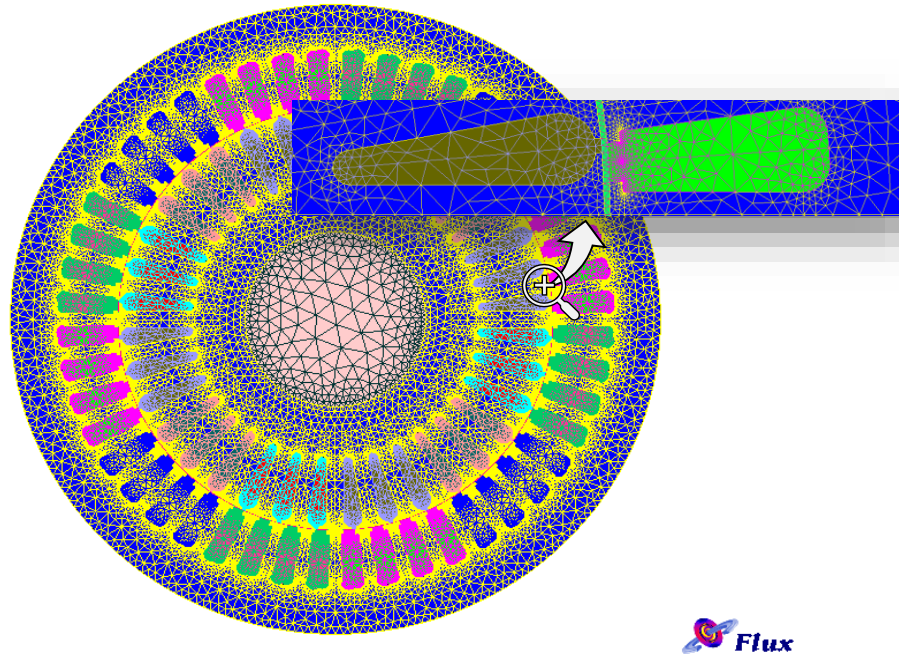


Figure 2.10 Répartition du maillage triangulaire dans la géométrie

On note que 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.[33]

### C. Structures de bobinage

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 harmonique 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. 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 MADA par l'industrie.

La Figure 2.11 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 :

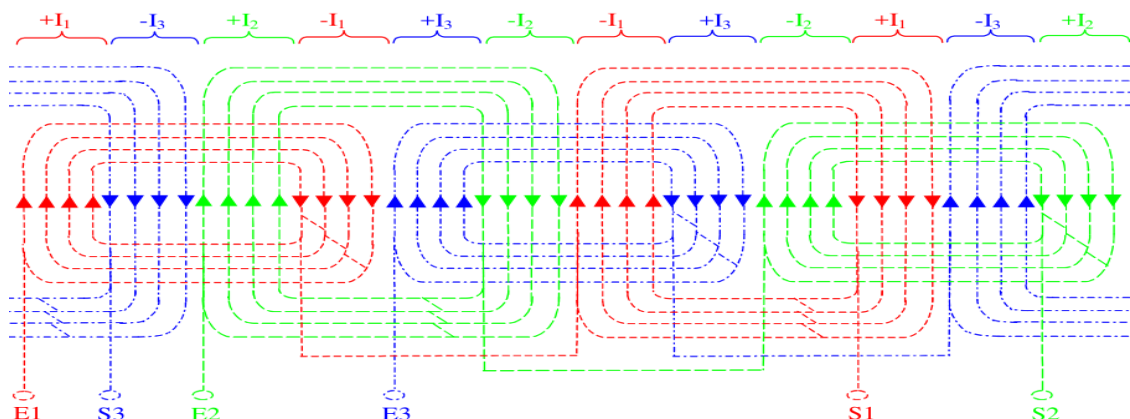


Figure 2.11 Bobinage triphasé représente deux pas polaires.

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

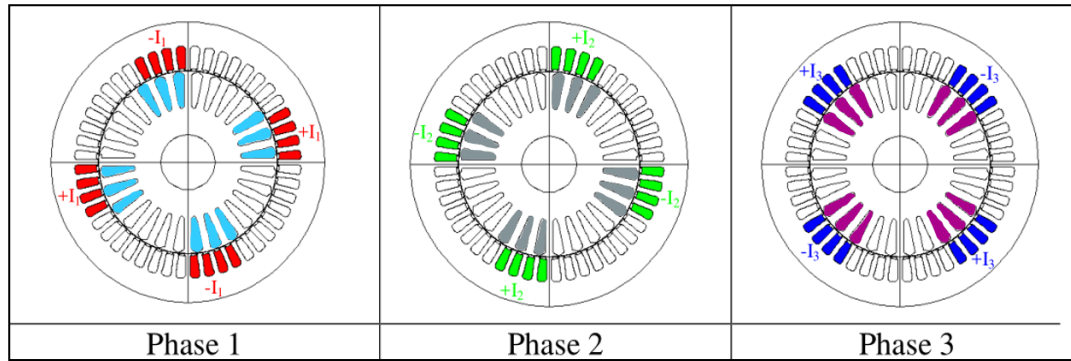


Figure 2.12 Répartition du bobinage statorique et rotorique

### d. Création des matériaux :

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : **FER** (défini comme un matériau ferromagnétique non linéaire), l'**Aluminium** et l'**air**.

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) comme présenté dans le tableau 2.4

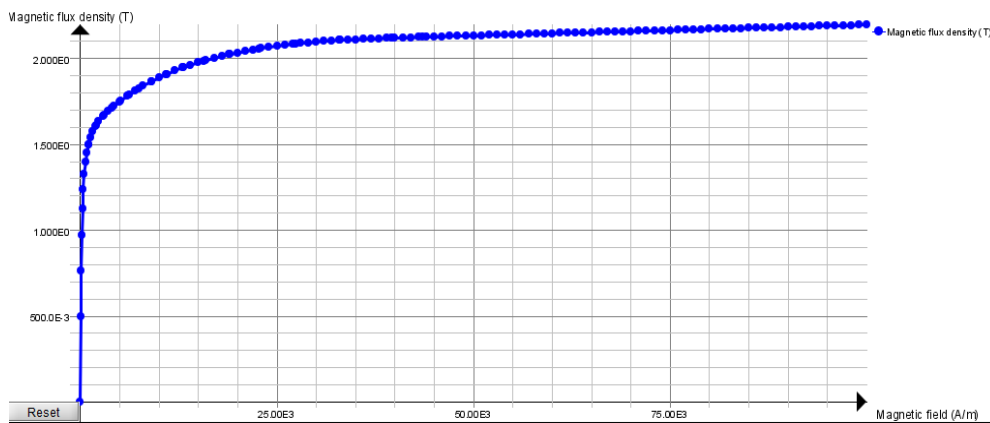
B(T)	H(A/m)	B(T)	H(A/m)	B(T)	H(A/m)
0.00	0.00	1.53858	1252.247	1.866196	9005.836
0.49474	53.06401	1.57333	1550.937	1.906683	10855.24
0.76296	106.1280E+02	1.60464	1909.364	1.94715	13074.53
0.97171	175.5936E+02	1.63386	2339.477	1.986467	15737.68
1.12341	258.9524E+02	1.66216	2855.613	2.023382	18933.46
1.23746	358.9829E+02	1.69062	3474.976	2.056555	22768.39
1.32563	479.0195E+02	1.72055	4218.211	2.084597	27370.31
1.3954	623.0634E+02	1.75333	5110.093	2.106104	32892.61

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

1.4519	795.9161+02	1.78884	6180.353	2.119661	39519.38
1.49881	1003.339E+03	1.82666	7464.663	2.124628	43471.31

**Tableau 2.5** : B(H) du matériau magnétique « FER »

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

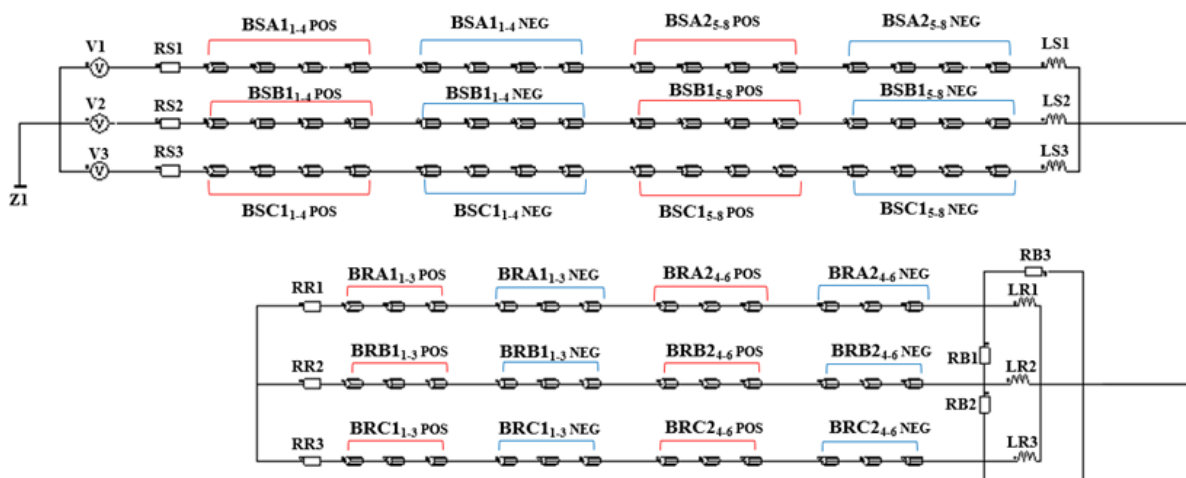


**Figure 2.13** La Caractéristique B(H) du matériau magnétique « FER »

### e. Le circuit électrique de couplage avec la géométrie :

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductances et résistances de tête de bobine , résistance de phase ).

- Le circuit électrique (Figure 2.14) représentant :



**Figure 2.14** Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

## CHAPITRE 2 : MODALISATION D'UNE MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION PAR METHODE ELEMENTS FINIS

---

### Coté Alimentation :

Les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3).

Avec :

$$V1 = V_{max} * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(2 * \pi() * f_s * \text{TIME})$$

$$V2 = V_{max} * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(2 * \pi() * f_s * \text{TIME} - 2 * \pi() / 3)$$

$$V3 = V_{max} * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(2 * \pi() * f_s * \text{TIME} + 2 * \pi() / 3)$$

$$f_s = 50\text{Hz}$$

### Coté Stator :

Les bobinages statoriques :  $B_{SA1-8 \text{ POS}}, B_{SA9-16 \text{ NEG}}; B_{SB1-8 \text{ POS}}, B_{SA 9-16 \text{ NEG}}; B_{SC1-8 \text{ POS}}, B_{SC 9-16 \text{ NEG}}$

Les Inductances de fuite des têtes de bobines :  $L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}$ .

Les résistances de chute de tension dans le réseau :  $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}$

### Coté Rotor :

Les bobinages rotoriques :  $B_{SA1-6 \text{ POS}}, B_{SA7-12 \text{ NEG}}; B_{SB1-6 \text{ POS}}, B_{SA 7-12 \text{ NEG}}; B_{SC1-6 \text{ POS}}, B_{SC 7-12 \text{ NEG}}$

Les Inductances de fuite des têtes de bobines :  $L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}$ .

Les résistances de chute de tension dans le réseau:  $R_{R1}, R_{R2}, R_{R3}$

Les résistances entre phase :  $R_{B1}, R_{B2}, R_{B3}$

### f. Les propriétés physiques et régions :

Le problème étant défini par une **application magnétique de 2D** en **magnéto-transitoire** (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés. Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

**Fixé** : définit les parties fixes du modèle.

**En mouvement** : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.

**Compressible** : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

Dans notre modèle les trois types existent, le stator présente la partie fixe, le rotor est en mouvement (rotation suivant un axe parallèle à **Oz**) et l'entrefer est compressible.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est défini par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondant dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande

(assign regions to faces).

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator. Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

### 2.7 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons basé sur les méthodes et les techniques de la modélisation et des outils de la simulation de la MADA. Pour la résolution des équations des champs électromagnétique on a passe par Conception assisté par ordinateur CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ces performances à partir de ces spécifications géométriques.

Ensuite, nous allons présenter le modèle mathématique des équations de Maxwell qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs même la méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell, Elle permettre d'effectuer une modélisation globale qui prend en compte les effets combinés des différents phénomènes ;Le logiciel Flux 2D se modélise par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs.

On a aussi fait donner les méthodes de calcul analytique et par les outils et algorithmes présentés par Flux 2D qui permet de faire l'évaluation des pertes dans cette machine ensuite nous avons cité la méthode de réalisation de ce modèle 2D de la machine à double alimentation et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons donner les résultat de notre modèle 2D de machine à asynchrone à double alimentation en mode moteur en effectuant une evaluation des pertes a l'aide des modules de calcul des pertes existant sous Flux-2D ;Nous allons voir l'évolution de ces pertes par rapport au vitesse ensuite en fonction de temps nous après avoir simuler le fonctionnement à vide et on charge dans les deux cas sains et avec un défaut de court-circuit entre spires dans la même phase.

### 3.2 Evaluation des pertes en fonction de la vitesse (glissement)

Dans cette partie nous allons voire le comportement des pertes de la machine asynchrone à double alimentation en fonction de la vitesse de rotation ;Nous avons indroduit différents valeurs du glissement (voir tableau 3.1)

Vitesse (tr/min)	Glissement (%)	Valeur de glissement
0	100	1
300	80	0.8
600	60	0.6
900	40	0.4
1092	27.2	0.272
1395	7	0.07
1459	2.7	0.027
1499	0	$1e^{-5}$

Tableau 3.1 : vitesse et valeur de glissement

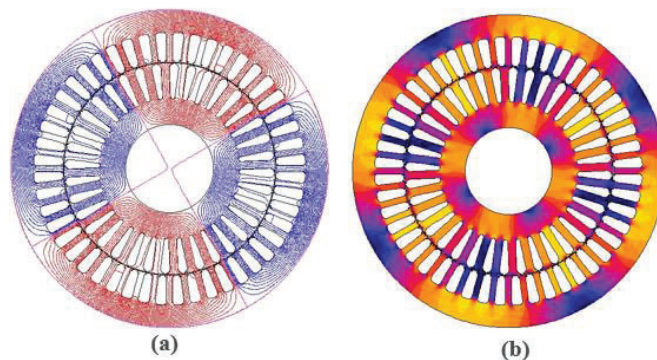


Figure 3.1 répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de  $1e^{-5}$  (1499 tr/min)

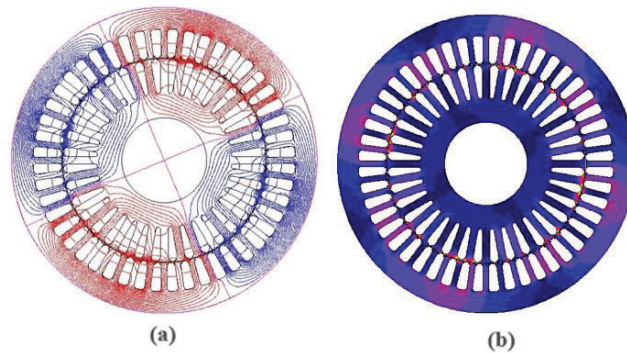


Figure 3.2 répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de 0.6 (600 tr/min)

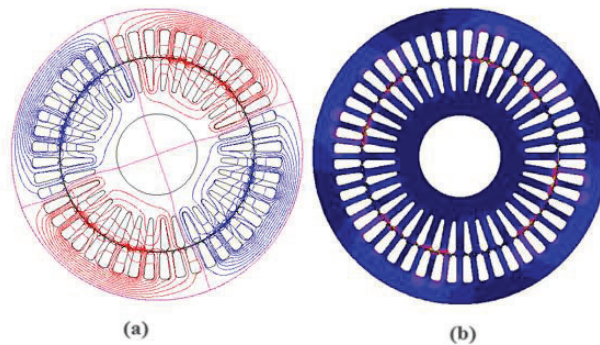


Figure 3.3 répartition des lignes équiflux et de l'induction dans le circuit magnétique pour un glissement de 1 (rotor bloqué)

## 3.2.1 La procédure de calcul des pertes dans Flux 2d :

### a. Les pertes par effet joule statorique :

Pour calculer ces pertes en fonction de glissement en crée un capteurs sous le noms (PJs) , ensuite nous allons choisir le type et les résistances bobinés approprié au enroulement statorique pour pertes par effet joule statoriques comme illustre la figure (3.4) ci-dess

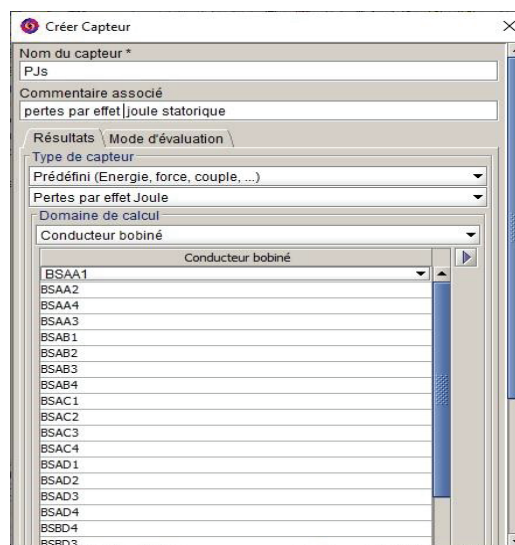


Figure 3.4 création de capteur de pertes par effet joule statprique

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Après la création de capteur nous allons faire une évaluation par la commande présentée dans le logiciel de résolution et tout ça dans la partie postprocesseur.

### b. Les pertes par effet joule rotorique :

Pour calculer ces pertes en fonction de glissement en crée deux nouveau paramètre sous le nom (Pabs,PJr) , comme illustre la figure 3.5 ;

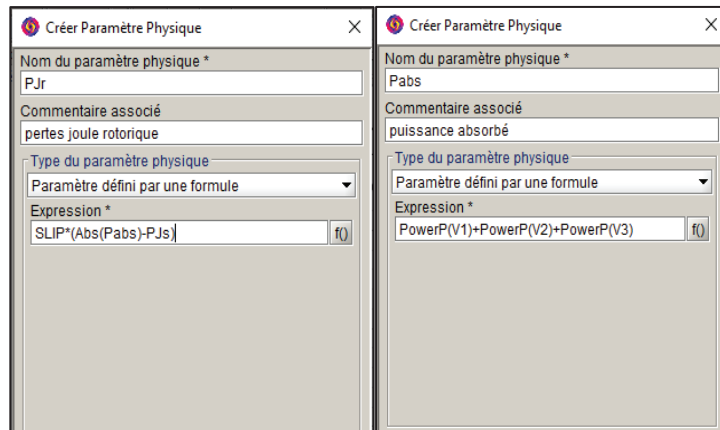


Figure 3.5 création des deux paramètres de puissance absorbé et pertes par effet joule rotorique

### c. Les pertes fer dans le stator :

Pour calculer ce type de pertes nous allons utilisés la commande (**bertottIronLossesvsSlip**) qui va calculer à l'aide de modèle bertotti présenté dans le chapitre précédent après avoir donné quelques informations comme la région étudiée, les caractéristiques de tôle et type de variation dans notre cas le glissement, la figure suivante illustre la fenêtre de remplissage de ces données.

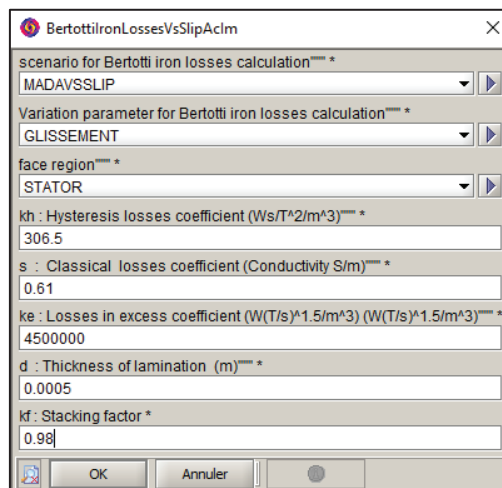


Figure 3.6 création des pertes fer dans le stator

## 3.2.2 Les résultats d'évaluation :

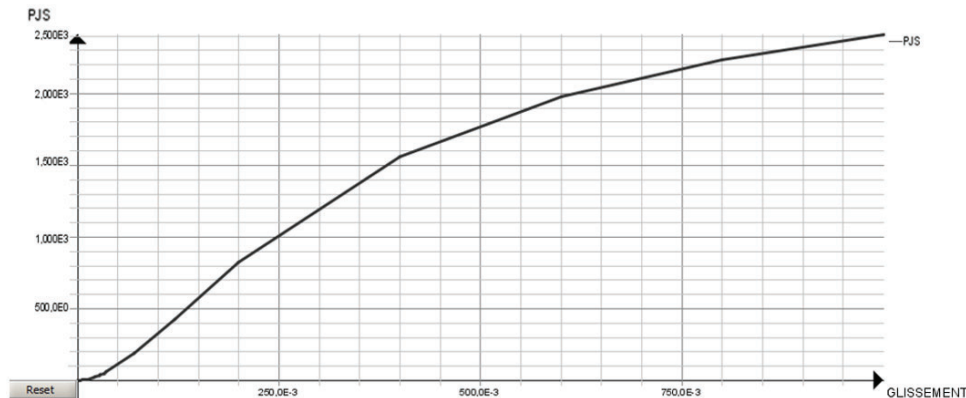


Figure 3.7 les pertes joule statorique en fonction du glissement

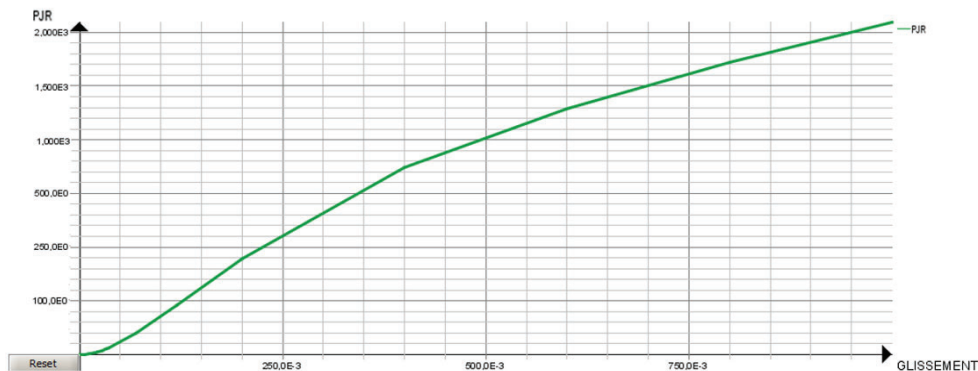


Figure 3.8 les pertes joule rotorique en fonction du glissement

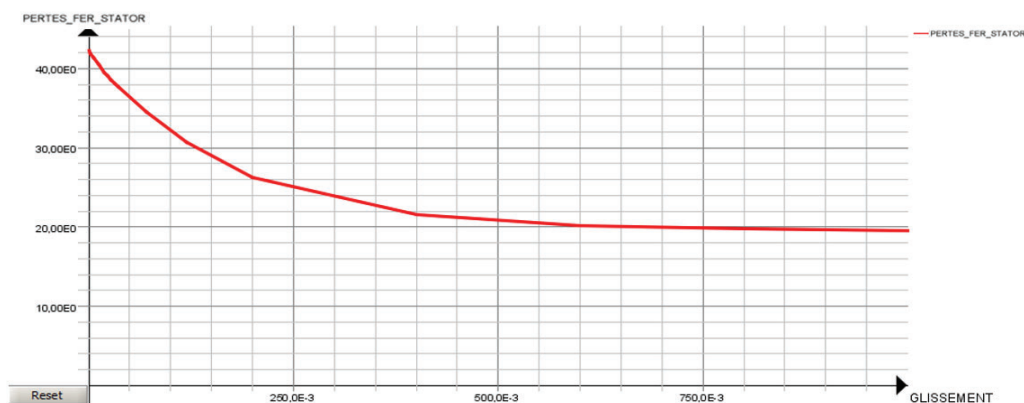


Figure 3.9 les pertes fer en fonction du glissement

### Interprétation

D'après la figure 3.9 nous remarquons que les pertes fer dans le stator dimuent avec le glissement car la pénétration du flux dans le rotor s'affaiblie lorsque on s'éloigne de vitesse de synchronisme (figures 3.2 et 3.3 ), par contre pour les pertes par effet joule statoriques et rotoriques (figure 3.7 et 3.8) nous remarquons que les pertes dans les deux enroulements

statorique et rotorique augmente de façon proportionnelle aux valeurs de glissement à cause d'augmentation des courants .

### 3.3 Résultats de simulation de la machine état saine

#### 3.3.1 Fonctionnement à vide :

Après avoir fait la simulation de la machine en état sans défaut et avec un couple résistant nul  $C_r=0$ , nous avons eu les résultats suivants :

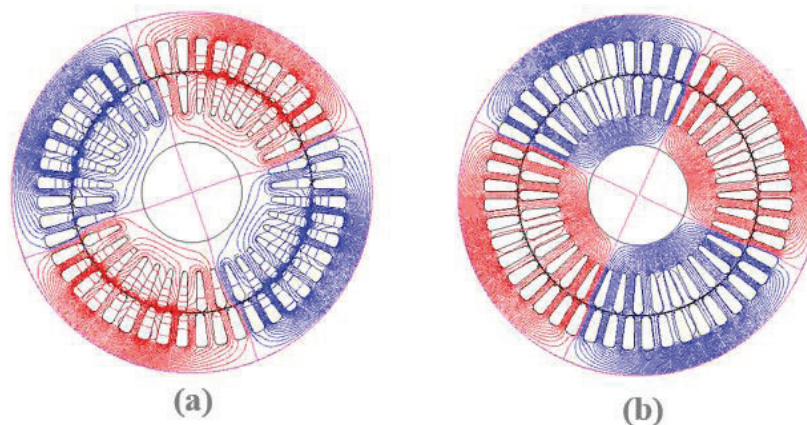


Figure 3.10 répartition des lignes équiflux  
(a) à  $t=0.0s$  (b) à  $t=0.8s$

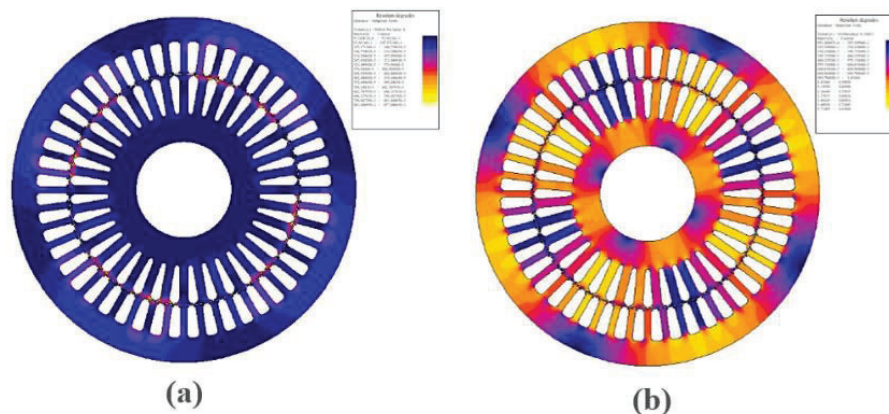


Figure 3.11 la répartition de l'induction magnétique  
(a) à  $t=0.0s$  (b) à  $t=0.8s$

Les figures (3.10) et (3.11) présentent respectivement les lignes équiflux et l'induction magnétique dans le circuit magnétique ; Nous remarquons bien la présence de deux paires de pôles, la distribution des lignes et l'induction magnétique est quasi-symétrique par rapport aux axes des pôles, les lignes de flux entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor.

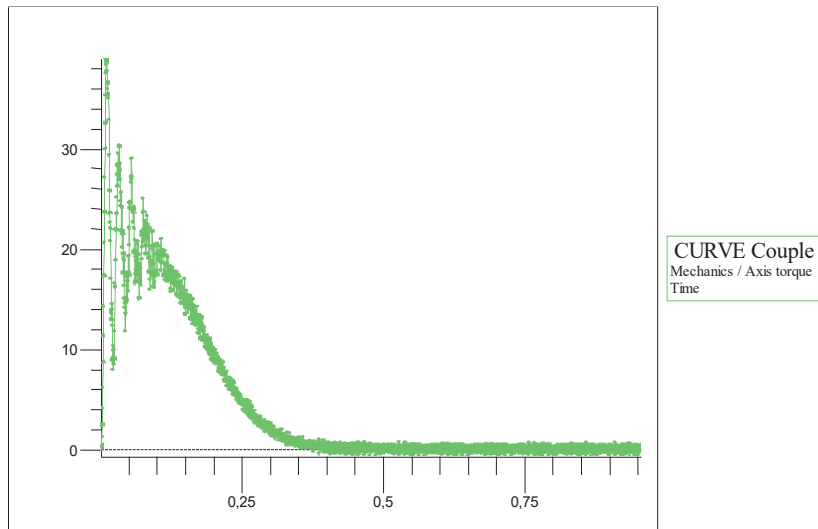


Figure 3.12 Le couple moteur à vide.

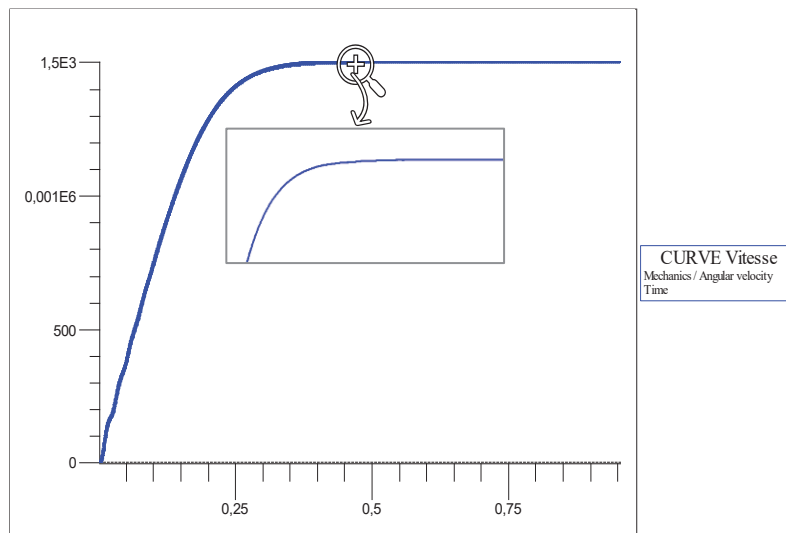


Figure 3.13 : la vitesse de rotation à vide

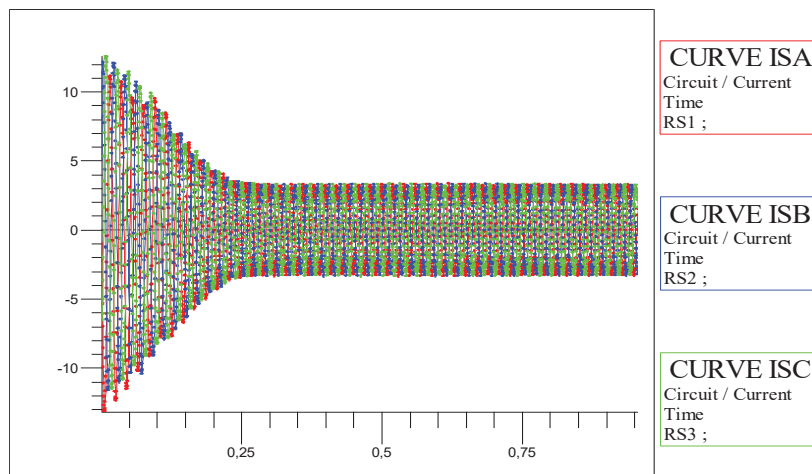


Figure 3.14 Les courants statoriques à vide

# CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

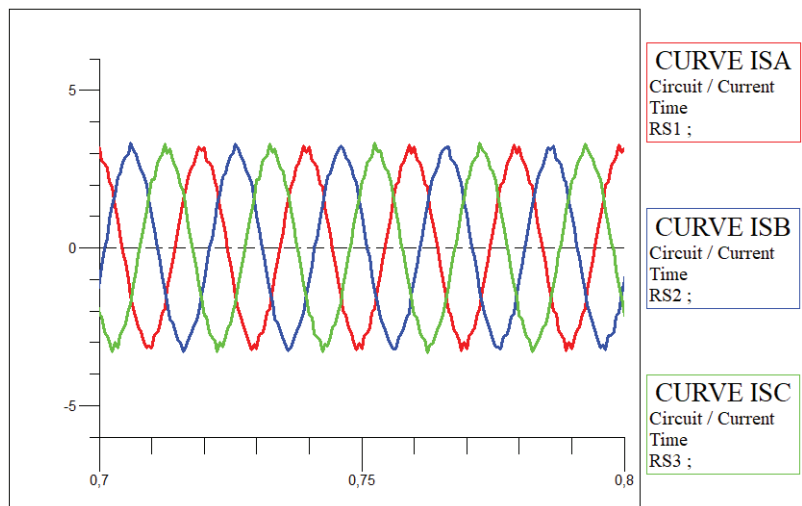


Figure 3.15 zoom courants statoriques à vide

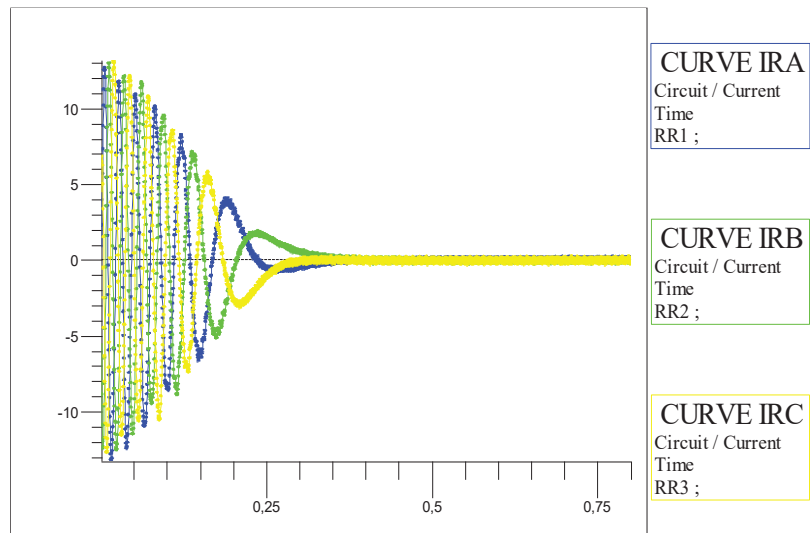


Figure 3.16 les courants rotoriques à vide

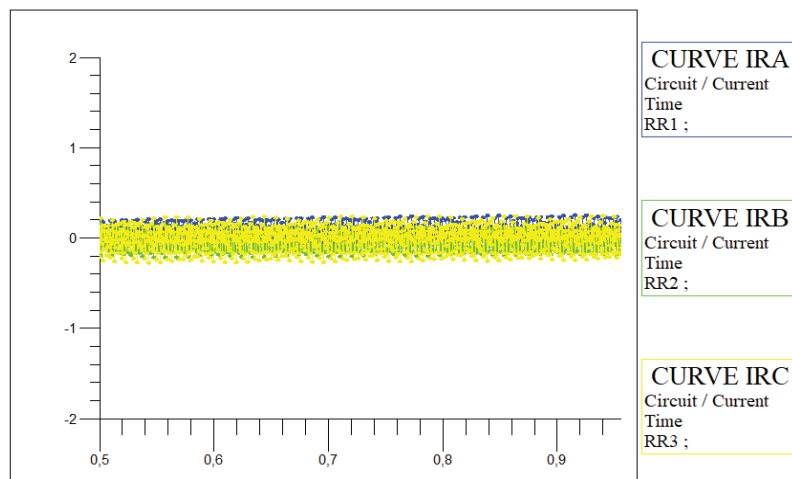


Figure 3.17 Zoom courants rotorique à vide

## 3.2.2 Fonctionnement en charge :

Après avoir faire La simulation de la machine en état saine en appliquant un couple résistant  $C_r=4 \text{ N.m}$  , nous avons eu les résultats suivantes :

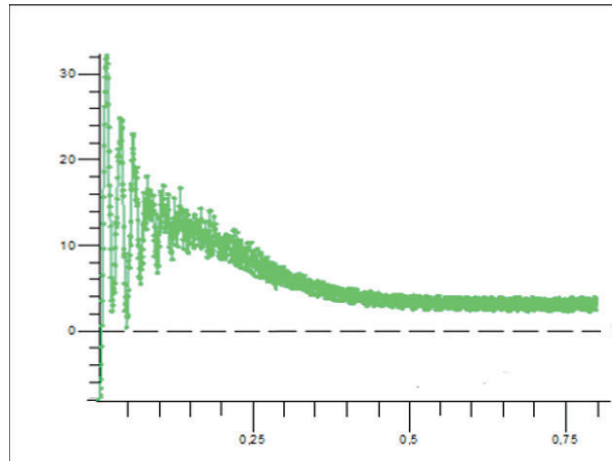


Figure 3.18 : le couple moteur en charge

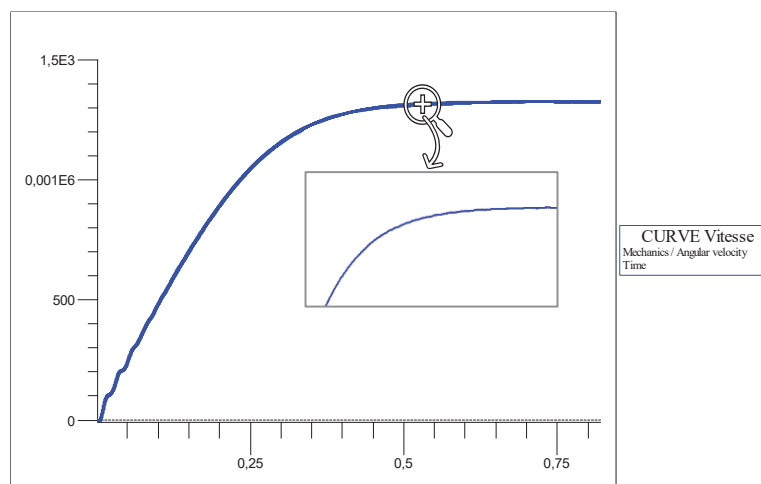


Figure 3.19 : la vitesse de rotation en charge

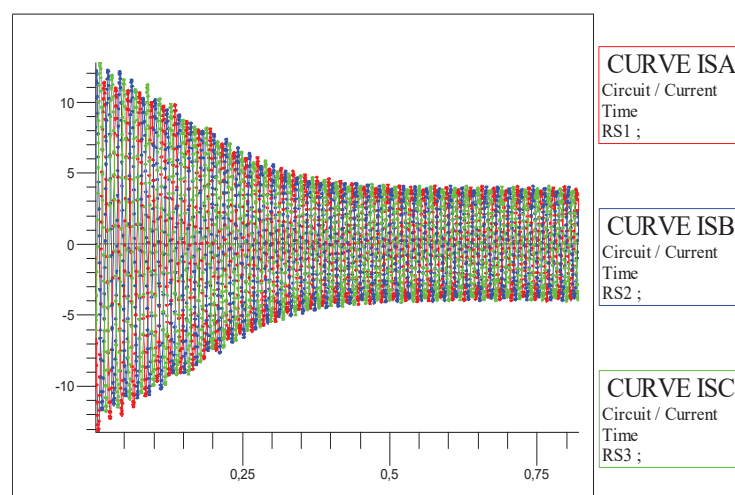
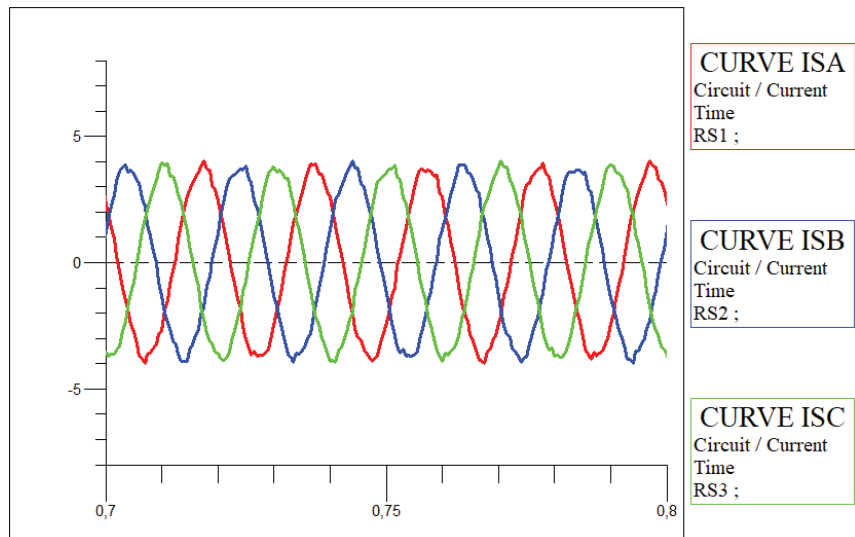
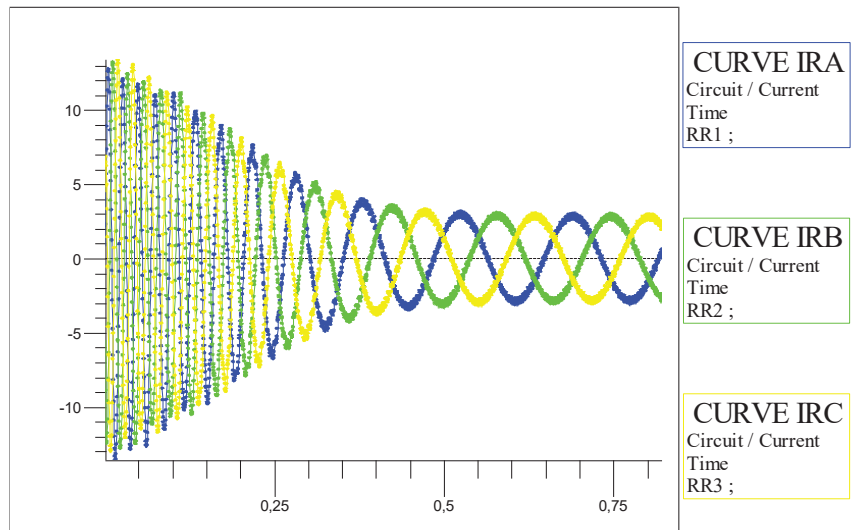


Figure 3.20 : les courants statoriques en charge

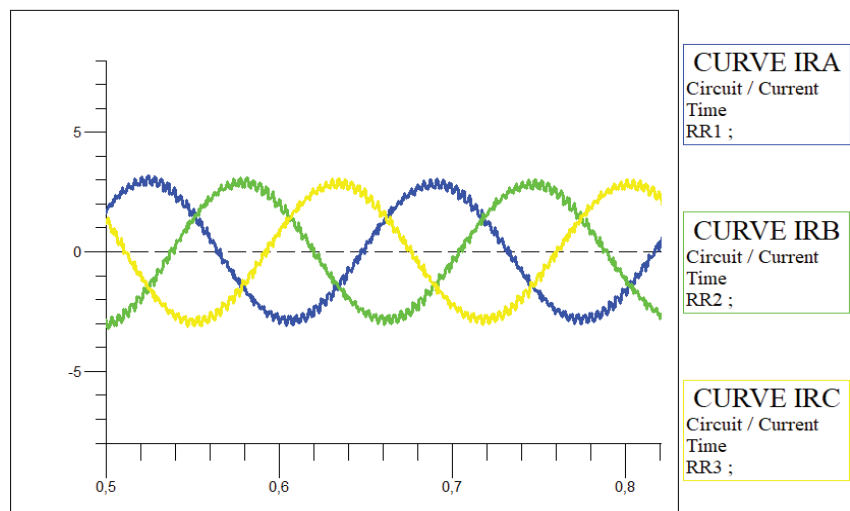
## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION



**Figure 3.21** Zoom courants statoriques en charge



**Figure 3.22** : les courants rotoriques en charge



**Figure 3.23** Zoom courants rotoriques en charge

### Interprétation des résultats

Dans le cas de démarrage à vide ; Nous constatons aux premiers instants les courants statoriques présentes des dépassements excessifs (faible vitesse) ; nous reconnaissons le classique appel de courant au démarrage égal à 6 fois environ le courant nominal pour créer un couple de démarrage qui s'élève à une valeur maximale de 40 N.m

L'oscillation du couple est l'élément marquant pendant le régime transitoire (le régime transitoire jusqu'à 0.4 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.

Les courants rotorique se stabilisent à des valeurs au tour de zéro de fait qu'il n'y a pas de charge.

Dans le cas de démarrage en charge , nous appliquons un couple résistant égale à 4 N.m nous remarquons que le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple résistant, cela induit une légère diminution de vitesse de rotation de la machine ,une augmentation des courants statoriques qui atteignent en régime permanent la valeur de 4A et l'apparition des courant rotoriques qui prenant une valeur proche de 3A avec une forme très proche de sinusoïd .

### 3.4 Résultats de simulation de la machine avec défaut

Le type que nous allons traiter dans cette partie est le court-circuit entre spires qui touche de première phase de l'enroulement Statorique ; Notre circuit devient comme illustre la figure ci-dessous

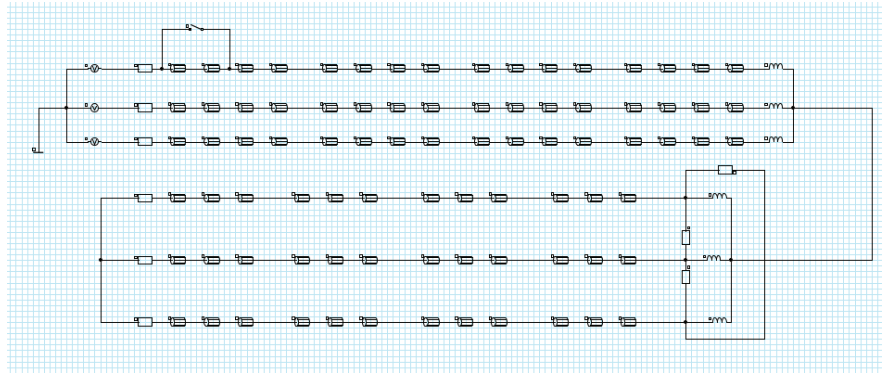


Figure 3.24 : Circuit équivalent en présence de défaut court-circuit entre spires

### 3.4.1 Fonctionnement à vide :

Après avoir faire La simulation de la machine en état avec défaut et avec un couple résistant nulle  $C_r=0$  , nous avons eu les résultats suivantes :

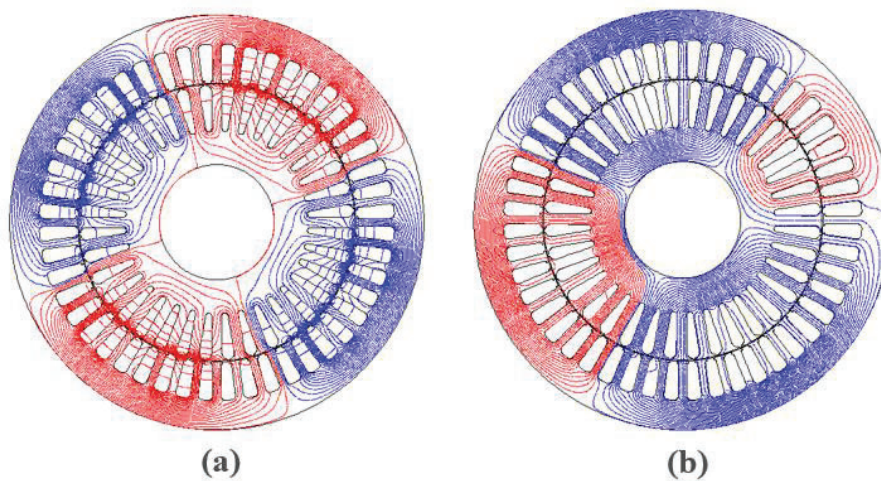


Figure 3.25 répartition des lignes équipotentiels  
(a) à  $t=0.0s$  (b) à  $t=0.8s$

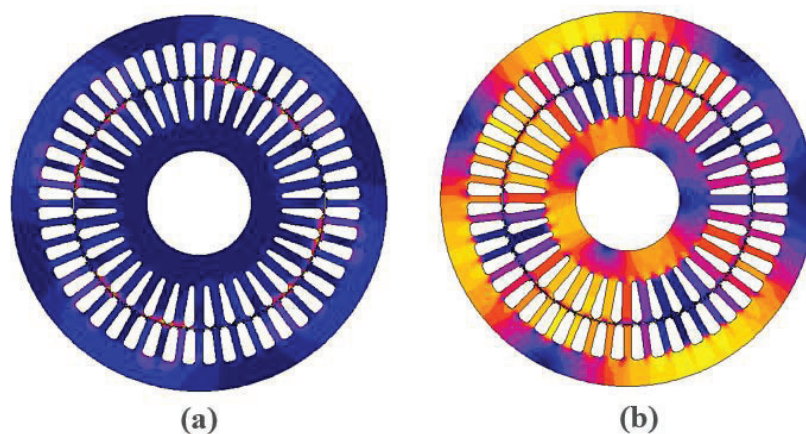
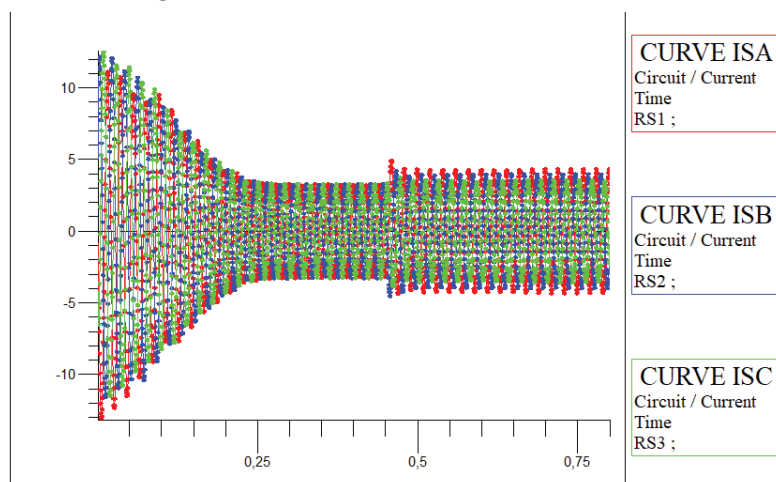
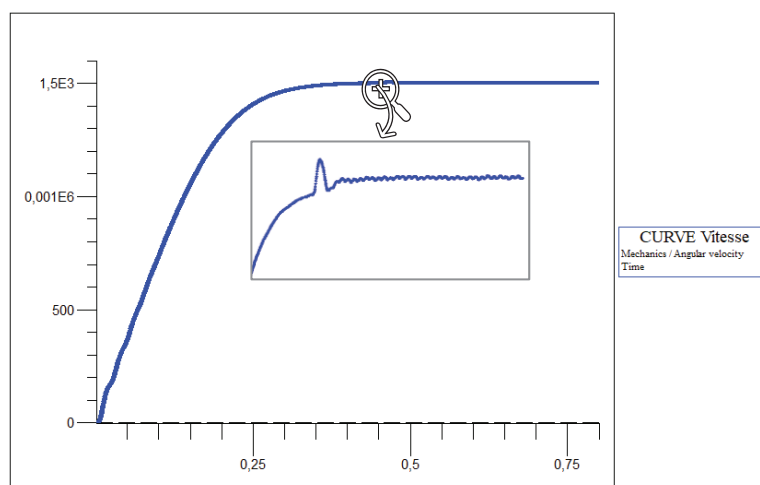
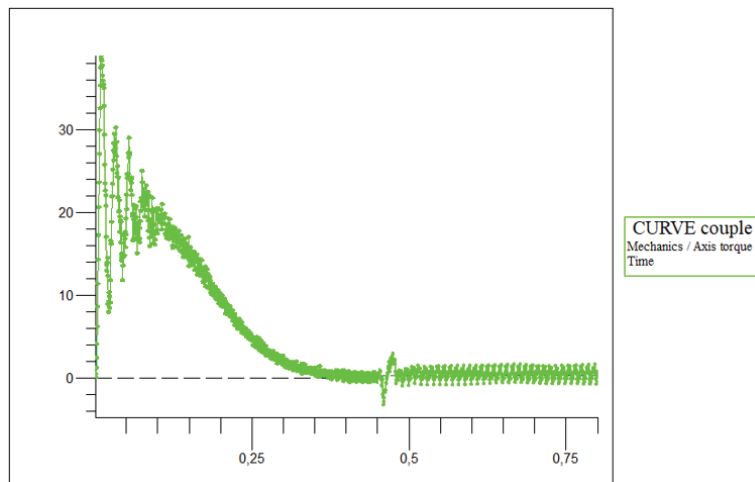


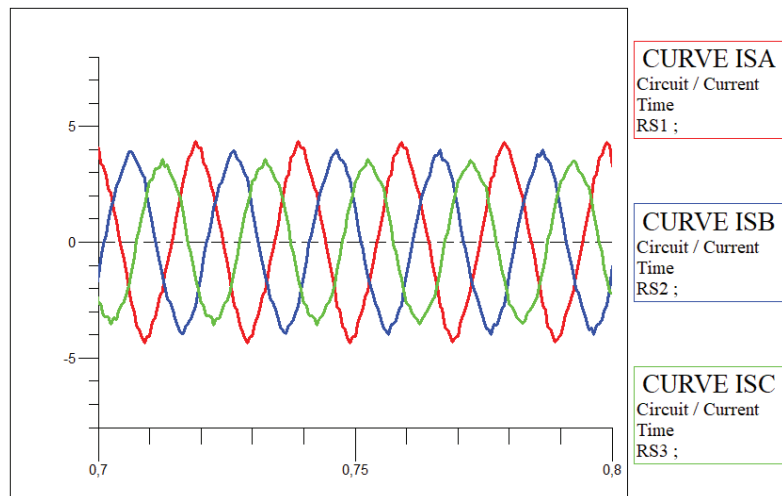
Figure 3.26 la répartition de l'induction magnétique B  
(a) à  $t=0.0s$  (b) à  $t=0.8s$

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

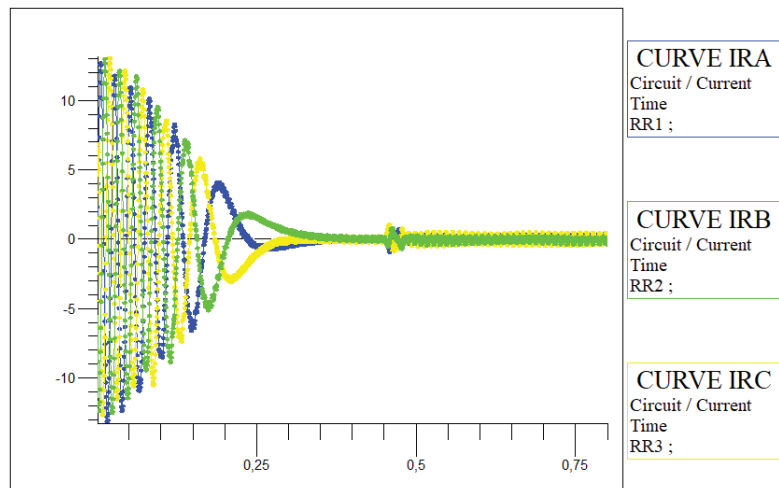
La figure (3.25) présente les lignes équiflux fait apparaître clairement l'effet du court-circuit. Ceci s'exprime par un déséquilibre de la répartition des équiflux et par le rétrécissement de ces lignes aux voisinages des encoches où se trouvent les conducteurs court-circuités.

La répartition de l'induction figure (3.26) n'est pas aussi équilibrée. Aux accueils des défauts, apparaissent des valeurs d'induction élevées.

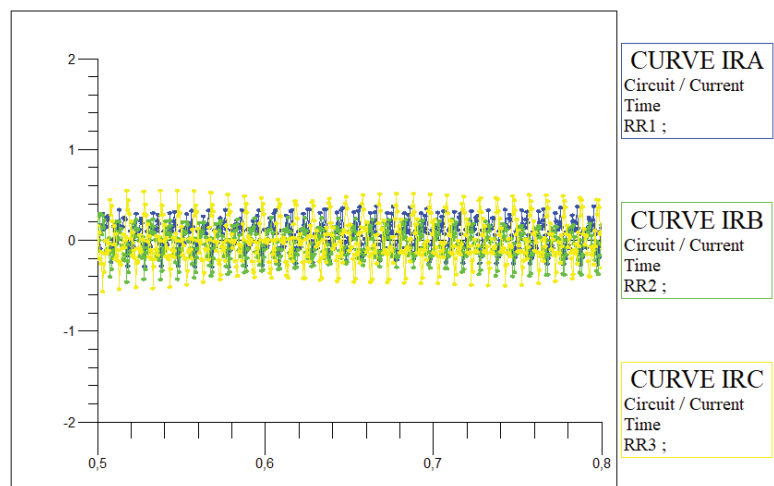




**Figure 3.30** zoom courants statoriques à vide



**Figure 3.31** les courants rotoriques à vide



**Figure 3.32** zoom courants rotoriques à vide

## 3.4.2 Fonctionnement en charge :

Après avoir fait la simulation de la machine en état avec défaut et avec l'appliquant d'un couple résistant égale à 4 N.m , nous avons eu les résultats suivantes :

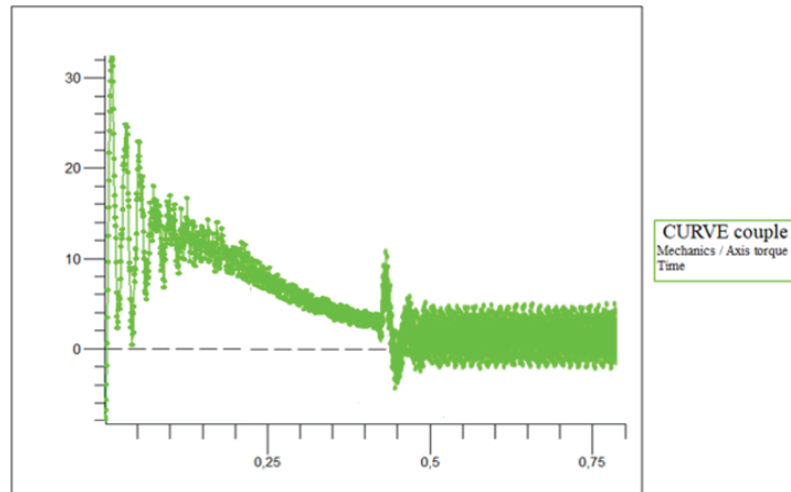


Figure 3.33 couple moteur en charge

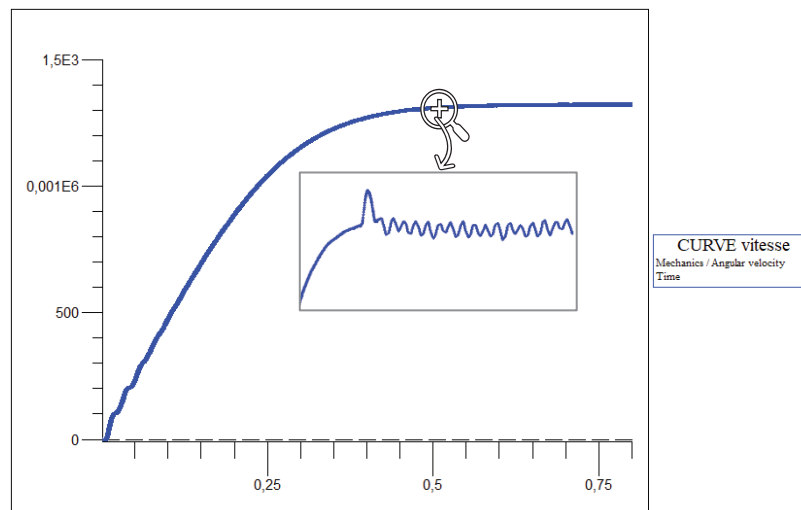


Figure 3.34 la vitesse de rotation en charge

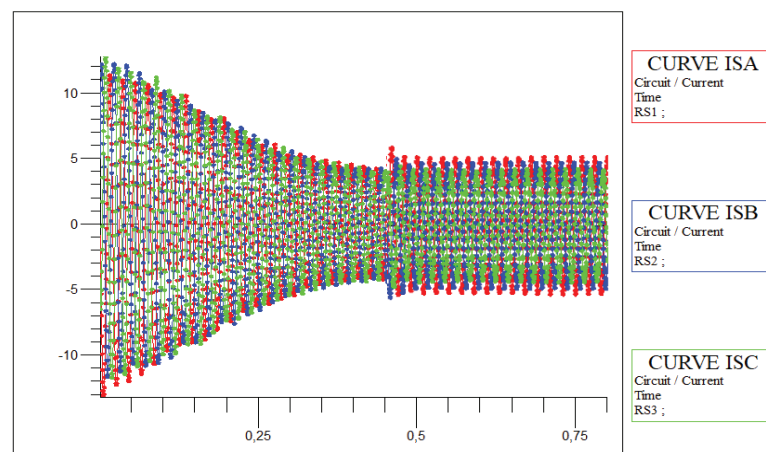


Figure 3.35 les courants statoriques en charge

# CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

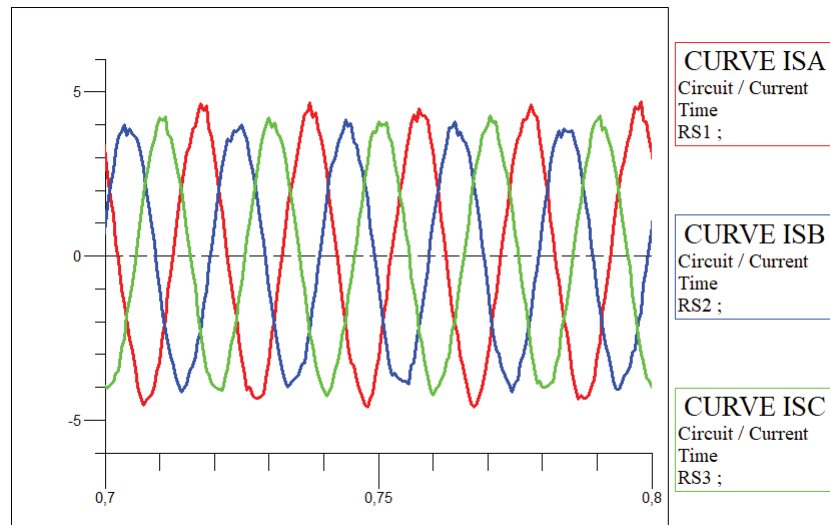


Figure 3.36 zoom courants statoriques en charge

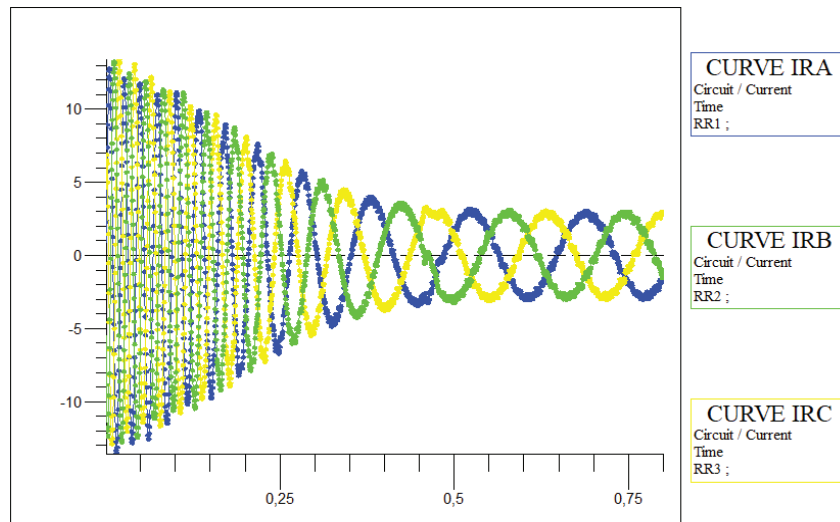


Figure 3.37 les courants rotoriques en charge

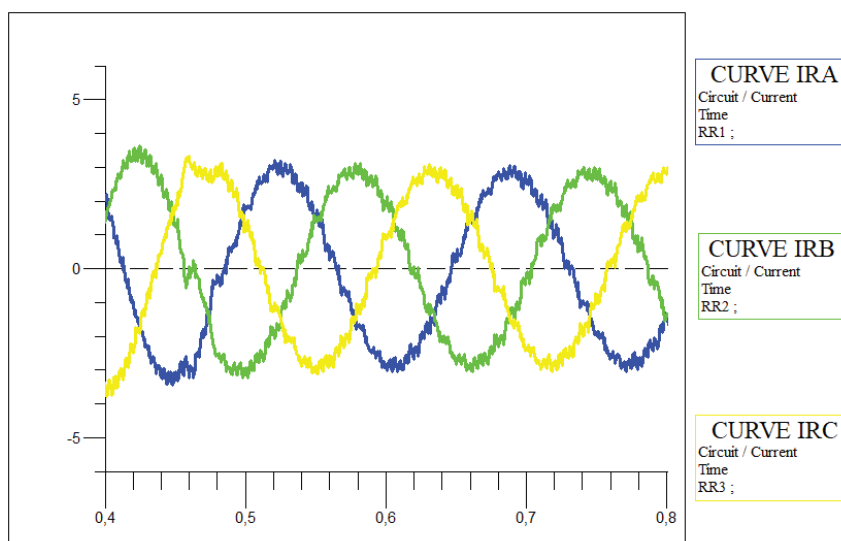


Figure 3.38 zoom courants rotoriques en charge

### Interprétation des résultats

Dans le cas de fonctionnement à vide, nous remarquons que dans le régime transitoire le couple électromagnétique développé par la machine est oscillatoire et prend une valeur max de 40 (N/m), et en régime permanent le couple est nul sauf dans le cas de présence de défaut où il présente des petites oscillations irrégulières.

nous remarquons aussi une augmentation visible de l'amplitude du courant dans la phase en défaut ( $I_{sa}$ ) par rapport aux autres courants ( $I_{sb}$  ;  $I_{sc}$ ) des deux phases (b et c) cela est dû au défaut de court-circuit entre spires dans la phase (a) qui a provoqué une diminution de résistance de phase et par conséquent une augmentation du courant.

Les courants rotoriques présentent aussi de faibles harmoniques de même pour la vitesse de rotation qui prend une valeur de 1500 tr/min en régime permanent jusqu'à l'instant de fermeture de switch (présence de défaut) on remarque aussi de faibles oscillations.

Dans le cas de démarrage en charge après l'application d'un couple résistant égal à 4 N.m nous remarquons que le couple prend des valeurs importantes en régime transitoire et lorsque la vitesse se stabilise, le couple prend une valeur égale à la charge résistive, et après 0.45s le moteur se fonctionne sous un court-circuit entre spire le couple prend une forme d'harmoniques plus grande que à vide ; tendit que pour la vitesse de rotation on remarque une diminution jusqu'à quelle attend la valeur 1435 tr/min à cause de couple résistant appliqué et des oscillations

Nous remarquons aussi un déséquilibre en amplitude et en déphasage des courants statoriques et la présence des harmoniques qui déforme la forme de ces courants rotoriques.

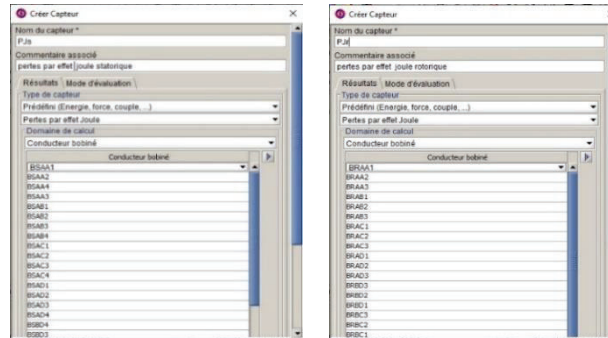
### 3.5 Résultat d'évaluation des pertes en mode transitoire :

#### 3.5.1 La procédure de calcul des pertes dans Flux 2d :

##### a. Les pertes par effet joule statorique et rotorique :

Pour calculer ces pertes en fonction de temps on crée deux capteurs sous les noms (PJS, PJR), ensuite nous allons choisir le type et les résistances bobinées appropriées au enroulement statorique pour pertes par effet joule statoriques ou rotoriques comme

illustre la figure (3.41) ci-dessus

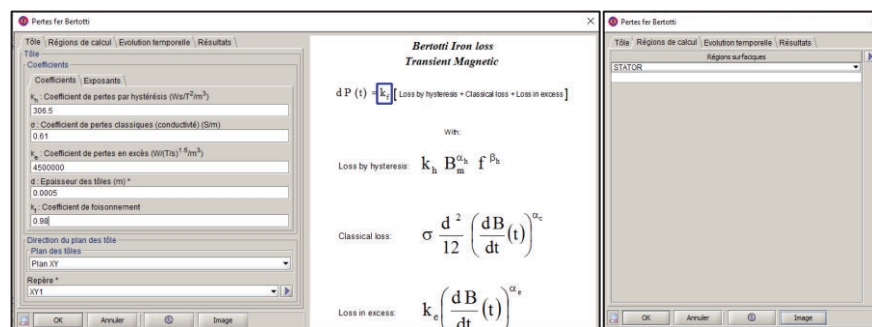


**Figure 3.39** création des capteurs de pertes par effet joule statrique et rotorique

Après la création de ces capteurs nous allons faire une évaluation de ces capteurs par la commande présenté dans le logiciel de résolution et tout ça dans la partie postprocesseur (après faire la résolution de notre modèle en mode transitoire).

### b. Les pertes fer dans le stator :

Pour calculer ce type de pertes nous allons utiliser la commande (Pertes fer bertotti) qui va calculer à l'aide de modèle bertotti présenté dans le chapitre précédent après avoir donné quelques information comme la région étudier les caractéristiques de tôle et l'intervalle de calcul , la figure suivante illustre la fenêtre de remplissage de ces données.



**Figure 3.40** création des pertes fer dans le stator

### 3.5.2 Dans le cas d'une machine saine :

Après avoir faire La simulation de la machine en état sans défaut et avec un couple résistant comme suit :

$$0 < t < 0.45 \rightarrow Cr = 0 \text{ N.m} \quad (\text{fonctionnement à vide})$$

$$t > 0.45 \rightarrow Cr = 4 \text{ N.m} \quad (\text{fonctionnement en charge})$$

# CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Nous avons eu les résultats suivantes :

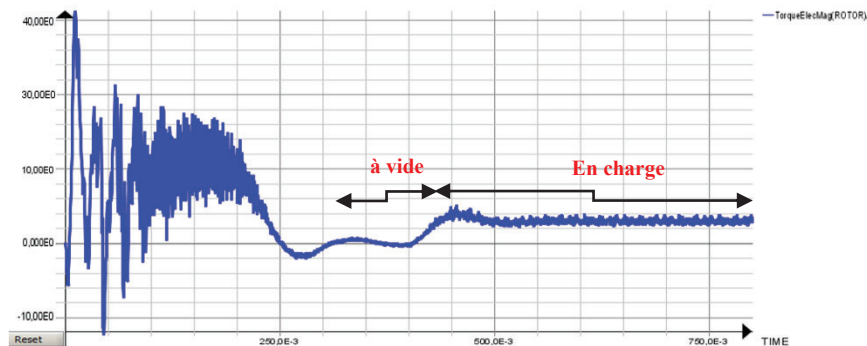


Figure 3.41 le couple électromagnétique en état saine

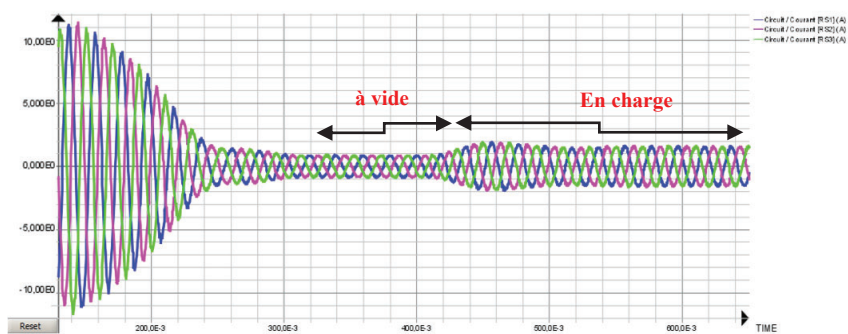


Figure 3.42 les courants statoriques en état saine

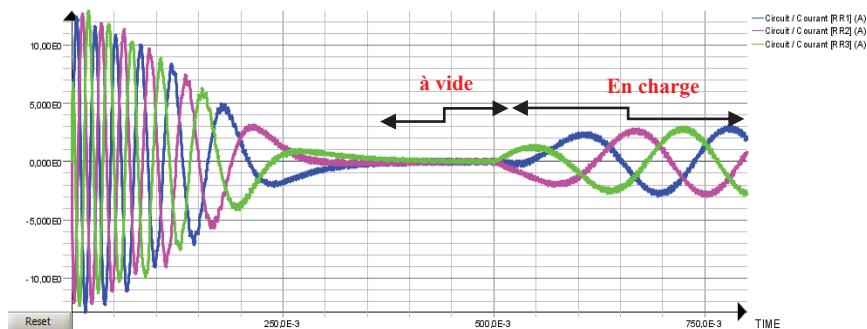


Figure 3.43 les courants rotoriques en état saine



Figure 3.44 la vitesse de rotation en état saine

# CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

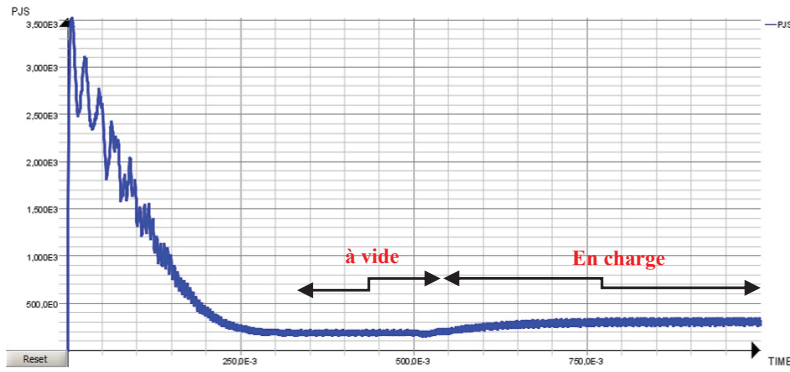


Figure 3.45 les pertes joules statorique en état saine

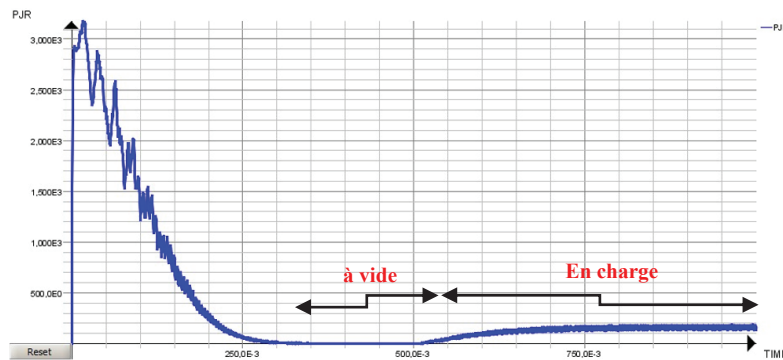


Figure 3.46 les pertes joules rotorique en état saine

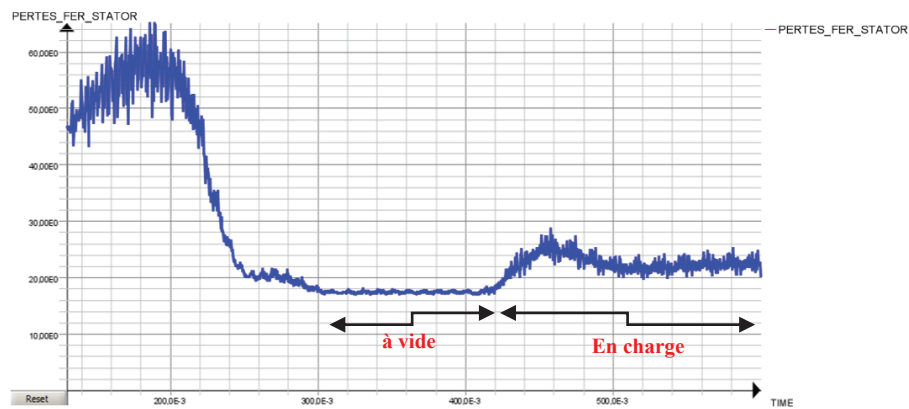


Figure 3.47 les pertes fer dans le stator en état saine

Editer Résultat[BERTOTTI\_LOSSES\_IN\_STATOR]

Nom du résultat \*  
BERTOTTI\_LOSSES\_IN\_STATOR

Commentaire associé  
19/23/06 13:58:04

Résultats	Description
Pertes fer	
Pertes fer Bertotti	
Pertes fer moyennes (sur une période) (W)	
Total	27.463610510538725
Par hystérésis	1.70733505533324
Classiques par courants de Foucault	20.50638847284142
En excès	5.249886982364068
Energie de pertes fer (sur une période) (J) *	
	12.907896939953202

OK Appliquer Annuler Détail >>

Figure 3.48 décomposition des pertes fer dans le stator en état saine

### 3.5.3 Dans le cas d'une machine avec défaut :

Après avoir faire La simulation de la machine en état avec défaut et avec un couple résistant comme suit :

$0 < t < 0.45 \rightarrow Cr = 0 \text{ N.m}$  (fonctionnement à vide)

$t > 0.45 \rightarrow Cr = 4 \text{ N.m}$  (fonctionnement en charge)

Nous avons eu les résultats suivantes :

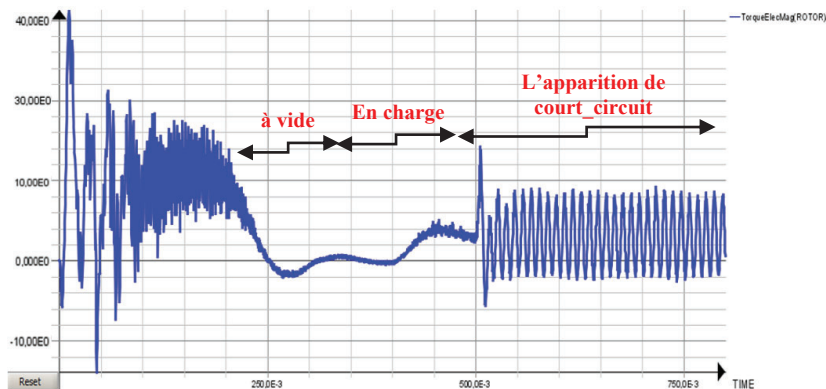


Figure 3.49 le couple électromagnétique en défaut

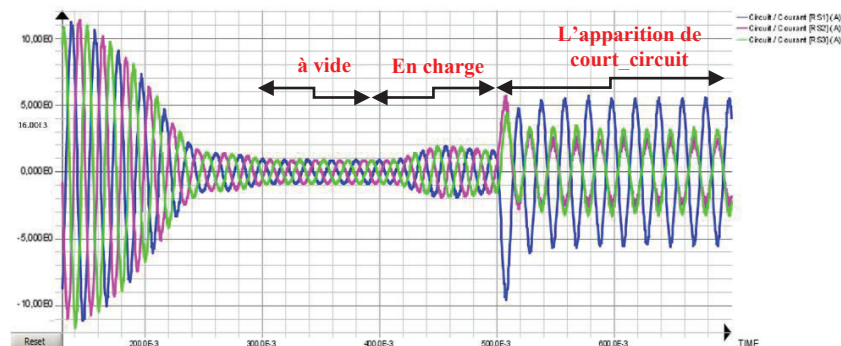


Figure 3.50 les courants statoriques en défaut

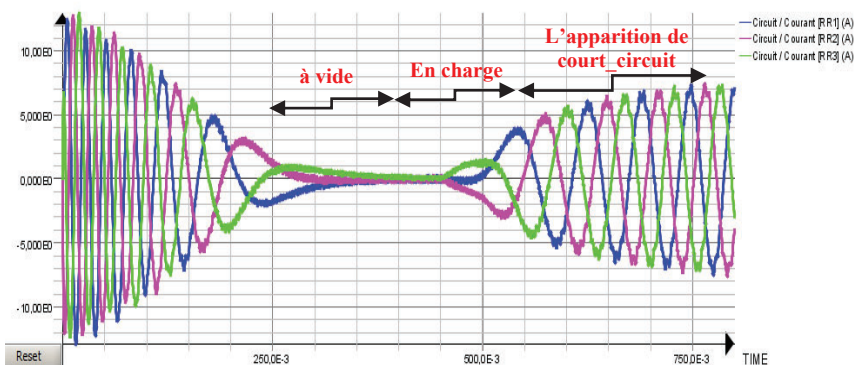


Figure 3.51 les courants rotoriques en défaut

# CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

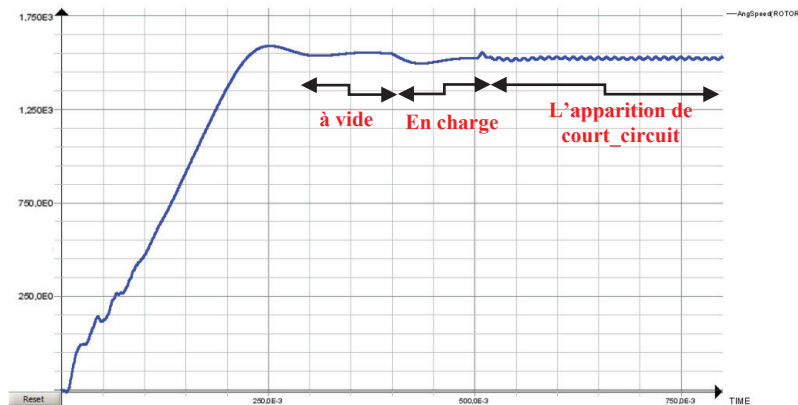


Figure 3.52 la vitesse de rotation en défaut

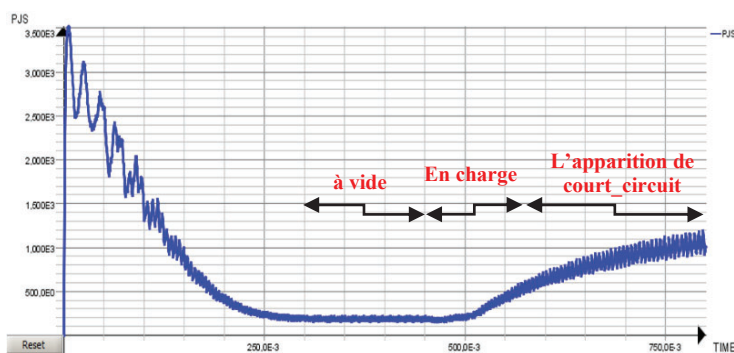


Figure 3.53 les pertes joules statorique en défaut

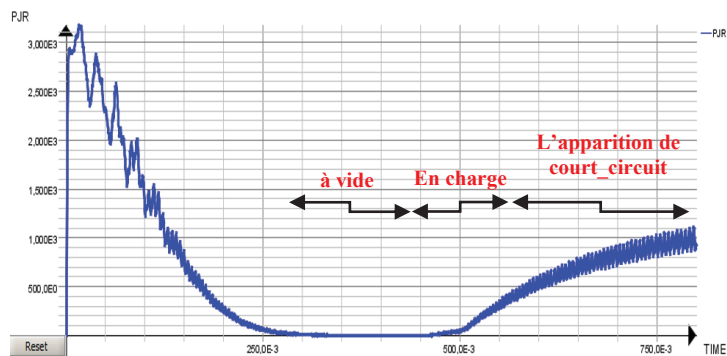


Figure 3.54 les pertes joules rotorique en défaut

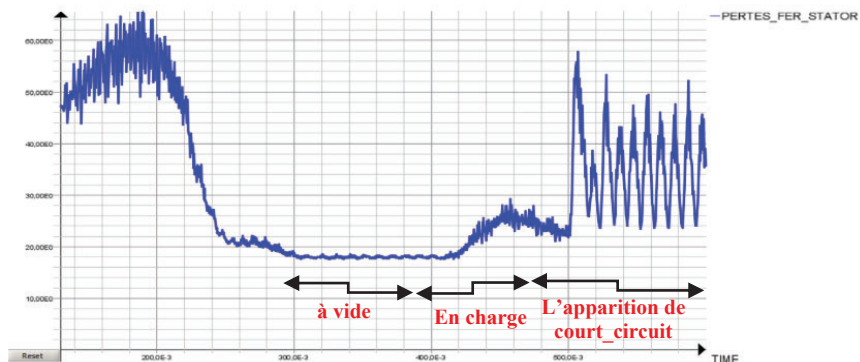


Figure 3.55 les pertes fer dans le stator en défaut

## CHAPITRE 3 : SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

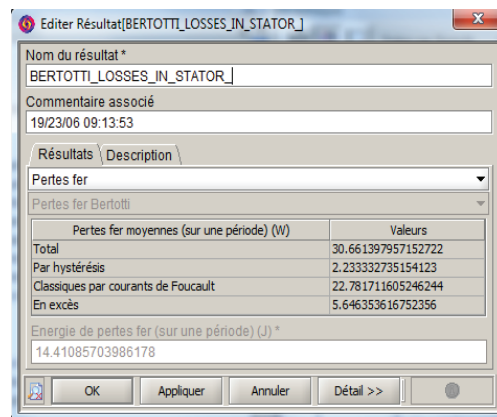


Figure 3.56 la décomposition des pertes fer dans le stator en défaut

Les pertes Fonctionnement	Pertes par effet joule statorique $P_{J_S\_moy}$	Pertes par effet joule rotorique $P_{J_R\_moy}$	Pertes fer totale $P_{fer\_total\_moy}$
<b>à vide</b>	<b>204.02 w</b>	<b>0 w</b>	<b>16.41 w</b>
<b>En charge</b>	<b>296.8 w</b>	<b>152 w</b>	<b>22.91 w</b>
<b>En court-circuite entre spires</b>	<b>1000.26 w</b>	<b>986.91 w</b>	<b>49.67 w</b>

Tableau 3.2 : Les pertes en différente mode de fonctionnement

### Interprétation des résultats

D'après comparaison entre les résultat obtenu de la simulation avec le cas d'une machine saine et avec défaut de court-circuit entre spires, nous avons remarqué que :

Durant le régime transitoire les amplitudes des courants statorique et rotorique est très grande au démarrage ce qui provoque une augmentation importante au niveaux des pertes par effet joule dans les deux enroulements statorique et rotorique , de même pour les pertes fer dans le stator.

En fonctionnement à vide nous remarquons que les pertes fer se stabilise à une valeur proche de **16.41 W**, les pertes joule statorique prennent une valeur moyenne de **204 W** et que les courant rotorique sont nul de se fait les pertes joule rotorique s'annule aussi.

En fonctionnement charge nous remarquons l'apparition des des pertes rotoriques qui prenant une valeur de 152 W, et une augmentation au niveaux des pertes joule statorique jusqu'à 297 W à cause d'augmentation des courants statoriques et rotoriques et que les pertes fer augmente et se stabilise au tour de 23 W.

Enfin dans le cas de présence de défaut les pertes fer sont plus importantes que dans cas de la machine saine cette augmentation est dû aux harmoniques créés par ce type de défauts comme montre la décomposition présentée dans les figures (3.48) et (3.56) où les pertes fer on eu une augmentation visible ,plus le courant de court-circuit est élever plus les pertes fer sont importantes

Nous remarquons aussi une amplification des courants rotoriques de suite une augmentation au niveaux des pertes joule rotorique et que l'amplitude des courants statoriques effectué est très grande ce qui provoque une augmentation importante au niveaux des pertes joule dans l'enroulements statorique.

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre nous avons fait une l'élaboration des résultats du la simulation de la MADA sous l'environnement du logiciel Flux 2D. Malgré que cette modélisation soit très couteuse en temps de calcul, mais elle reste une moyenne pratique et fiable pour voire le comportement de la machine en présence d'un défaut , on conernous sur l'impact de variation de vitesse de rotation et de court circuit entre spires crée dans un enroulement statorique sur les pertes magnétique (pertes fer) et pertes par effet joule dans les deux enroulements statorique et rotorique en deux régimes à vide et en charge.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'évaluation des pertes dans les moteurs asynchrones à double alimentation. Nous avons focalisé sur les défauts électriques très critiques qui peuvent détruire le bobinage du moteur dus aux augmentations de la température au niveau du bobinage et de ce fait une dégradation accélérée des isolants....etc.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation par la méthode des éléments finis réalisée est dédiée à la simulation de la machine en deux modes (transitoire et statique) en deux régimes à vide et en charge ; Malgré que cette modélisation soit très onéreuse en temps de calcul, elle montre une grande fidélité au comportement de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus en régime sain et défectueux dans le troisième chapitre.

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 court-circuit entre spires, 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 de la variation de vitesse de rotation et le court-circuit entre spires créé dans un enroulement statorique sur les pertes et les autres grandeurs électromécaniques de la machine à savoir le couple, la vitesse, les courants statoriques et rotoriques.

Le défaut court-circuit entre spires d'une même phase dans une ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné, il apparaît soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement.

Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage.

Finalement, on peut dire que les résultats obtenus depuis la simulation on peut visualiser les pertes dans les différentes parties de machine et le comportement des différentes grandeurs (courant rotorique, couple...etc.) de moteur en plusieurs cas sans le risque de détruire la machine..

**A.1 LES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DE LA MACHINE :**

**A.1.1 DIMENSIONNEMENT DES ENCOCHES :**

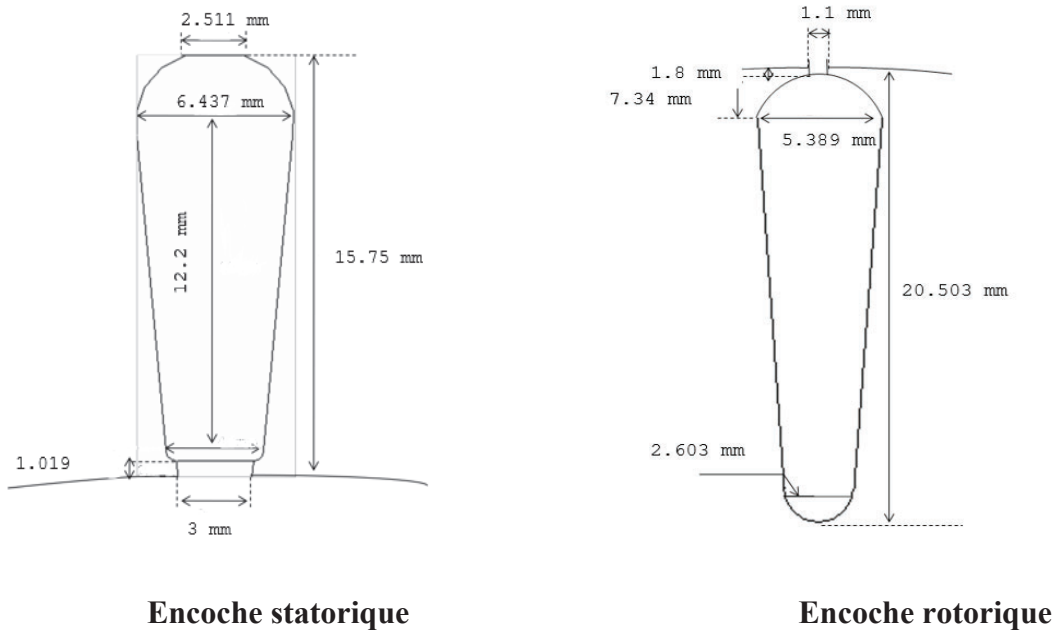


Figure A.1 Dimensions et formes des encoches statorique et rotorique.

**A.1.2 DIMENSIONS DU STATOR ET DE ROTOR :**

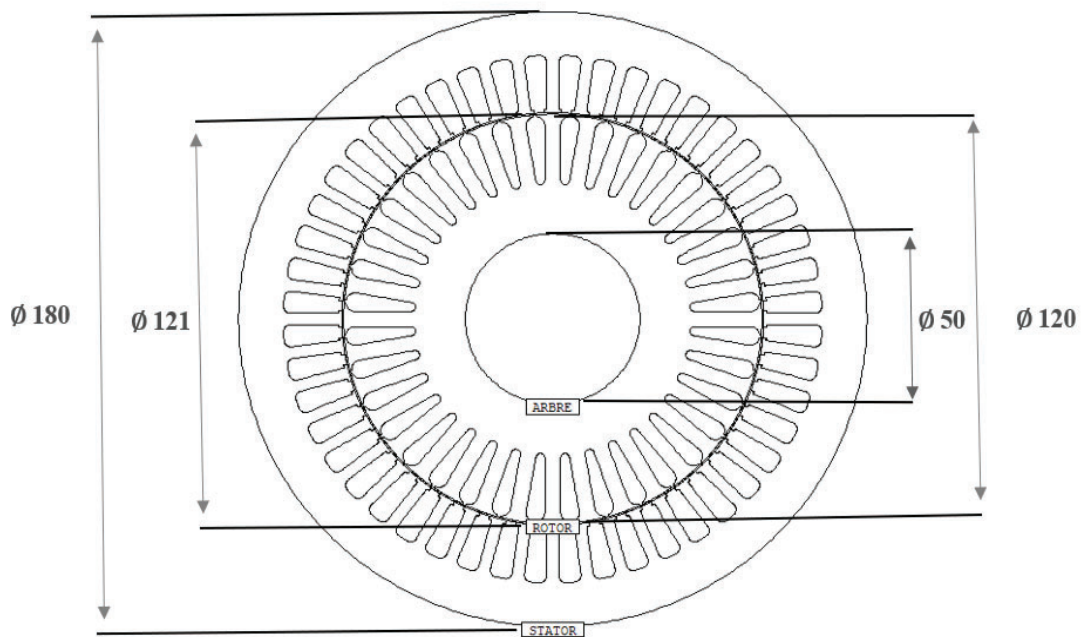


Figure A.2 Dimensions du Stator et de Rotor

### A.3 LOGICIEL DE RESOLUTION (FLUX 2D)

The screenshot displays the Flux 10.4.1 software interface. At the top, the CEDRAT logo (GROUPE CEDRAT, www.cedrat.com) and G2E lab logo (Grenoble, INPG, CNRS, EDF) are visible. The main title is "Flux<sup>®</sup> 10.4.1" with a copyright notice "© 2010".

**Marketing**

 GROUPE CEDRAT Grenoble, France <a href="http://www.cedrat.com">http://www.cedrat.com</a>	Support Commercial	 MAGSOFT CORPORATION Ballston Spa, NY <a href="http://www.magsoft-flux.com">http://www.magsoft-flux.com</a>
--	-----------------------	--

**Development**

 GROUPE CEDRAT Grenoble, France <a href="http://www.cedrat.com">http://www.cedrat.com</a>	Preflu2D Version 10.4.1 Components: - Java 1.6: <a href="http://fr.sun.com">http://fr.sun.com</a> - Open Cascade: <a href="http://www.opencascade.org">http://www.opencascade.org</a> - Jython: <a href="http://www.jython.org">http://www.jython.org</a> - Advanced CAD import is using ACIS components, copyright 2003-2009 Spatial Corp. <a href="http://www.spatial.com">http://www.spatial.com</a> - SPEED <a href="http://www.speedlab.co.uk">http://www.speedlab.co.uk</a> - Netgen : <a href="http://www.hp fem.uni-linz.ac.at/netgen/index.html">http://www.hp fem.uni-linz.ac.at/netgen/index.html</a>	 Grenoble, France <a href="http://www.g2elab.grenoble-inp.fr/">http://www.g2elab.grenoble-inp.fr/</a>
--	---	---

Copyright© 2009 CEDRAT, INPG, CNRS, EDF

Figure A.4 : Logiciel FLUX-2D

- [1] Y. Nacera « Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux ».Mémoire de Magister.UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU . Mai 2009
- [2] S. Bachir « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique ». Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2002.
- [3] Bapio BAYALA "machines électriques" FORMATION CONTINUE-TECHNICIENS SUPERIEURS - INGENIEURS ELECTROTECHNICIENS; 2010 p6
- [4] A.Dendouga « Contrôle des puissances actives et reactivede la machine a double alimentation (DFIM) »Thèse de doctorat Université de Batna 2.
- [5] Abdessemed, R. (2011). Modélisation et simulation des machines électriques.Ellipses. p.141-142.
- [6] C.BENNOUR « simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaine éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de Magister, université mohamed khider Biskra,2012 .
- [7] B. Multon, «Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement les machines à réluctance variable », Revue 3E.I, N. 3, 1995, pp.3-8.
- [8] Salloum, G. « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » Doctoral dissertation, Toulouse, INPT ,2007.
- [9] K.El Khil « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA): optimisation des pertes dans les convertisseurs: reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé » Doctoral dissertation, Toulouse 2006.
- [10] El Mahdi « Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », thèse doctorat A.S.A 2010
- [11] Vidal P.É «Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation » Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse , 2004
- [12] L. Benalia, « Commande en tension des moteurs a induction double aliments » Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna,2010.
- [13] G. GRELLET, « Pertes dans les machines tournantes », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.

- [14] D.Abdelhakim « MCONTROL DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION », mémoire de magistère, Electrotechnique de l'université de Batna, 2012.
- [15] B.VASEGHI « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation – Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, le 3 décembre 2009.
- [16] A.abdelmalak « réglage par mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation MADA » Memoire Magister université M'SILA ,2005
- [17] B.Saad « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider–Biskra, 2014.
- [18] B.SAMIA « Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones » Mémoire de Magister. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS 2011
- [19] V.Perrier « Idée de la base Application de la théorie des ondelettes, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG » Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [20] A. Aimer « Emploi de la représentation temps-fréquence dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones à cage » Mémoire de magister, université d'Oran 2010.
- [21] O.Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone », Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Centrale de Lille 2006.
- [22]S.BAZINE « Conception et implémentation d'un Meta-modèle de machines asynchrones en défaut». Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [23] B.mimi « Etude des machines électriques par CAO » Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [24] A.Assam « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostiques » ,Thèse de magister de l'Université de Sétif,2010.
- [25] C.Labiod, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de Biskra, 2014
- [26] A.Toufik, BOURAHLA Mohamed amine, «Calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage double étoile», thèse de master en électrotechnique Industrielle, Université USTHB, 2010.

- [27] R.HACHELAF«Etude de l'influence des défauts du bobinage sur les caractéristiques électromagnétiques de la MASDE», thèse de Magister a école militaire polytechnique,2011.
- [28] G.Datt et G.Touzot « Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis », Maloine S.A. Editeur Paris, Deuxième édition, 1984.
- [29] FLUX-2D, version 7.60, « Notice d'utilisation générale, volume 4: Equations, sous - programmes utilisateurs, géométrie et maillage avec PREFLU, axiperiodique » , Cédrat, 2001.
- [30] H.Adil .Nessissen Abdelkader «Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil» thèse de master en génie électrique, Université Djilali Bounaama – Khemis Miliana, 2015.
- [31] H.Tarek, «EVALUATION DES PERTES MAGNÉTIQUES DANS UNE MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE ALIMENTATION PAR ONDULEUR DE TENSION», thèse de Magister a école militaire polytechnique,2009.