

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou
Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Par : BOUDJELIDA ALLAEDDINE

OUSSALEH ABDELMALEK

Sujet

Etude de l'impact des défauts sur les performances d'une machine asynchrone à
double étoile -masde -

Soutenu publiquement, le 01 /07 /2025 devant le jury composé de :

M.REFFAS Abderrahim	MCA	Univ-BBA	Président
M.ZAIDI El Yazid	MCB	Univ-BBA	Examineur
M.NEZZARI Idhir	MCB	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

je remercie ﷻ le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur monsieur Idhir. Nezzari, chef de département d'électromécanique, pour ces conseils précieux, les orientations ainsi que pour la confiance et laide qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous tenons à remercier les membres de jury, le président et l'examineur pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail ; vos remarques et suggestions ne feront que rehausser la qualité de cette étude et de ce manuscrit.

Nous remercions nos familles et nos amies pour leur aide, soutien et encouragement durant notre cursus universitaire, ainsi que toute personne ayant participé de près ou de loin dans notre formation et à tous ceux qui nous ont soutenus depuis le début pour arriver là où nous sommes aujourd'hui, merci d'avoir cru en nous.

Dédecas

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui mon entourés d'amour et de tendresse à :

Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifice tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite. Au mes très chers frère Au mes très chers sœurs A toute ma famille A mes très chers amis.

Nous dédions ce modeste travail

Mes très chers parents. Que Dieu les protège.

Tous les amis (islam, Aymen, Nasro, Oussama et bien sur oustadi koki)

Sommaire

Chapitre I : Généralité sur la MASDE et des méthodes de diagnostic des défauts

Introduction générale.....	1
I.1. Introduction.....	1
I.2. Histoire sur les Machines Electriques.....	1
I.3. Classification des machines électriques.....	2
I.3.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague).....	3
I.3.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).....	3
I.4 Caractéristiques des machines multi-phasées.....	4
I.5. Description de la MASDE.....	5
I.6. Constitution de la machine asynchrone double étoile.....	6
I.6.1 Stator.....	7
I.6.2 Rotor.....	8
I.7. Les Avantages et les inconvénients de la MSADE.....	9
I.8. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double Étoile.....	9
I.9. Applications de la Machine asynchrone double Étoile.....	10
I.10 Modélisation des défauts entre spires au niveau statorique de la MASDE.....	11
I.10.1. Les différents défauts de la machine asynchrone.....	11
I.10.2. Principe du diagnostic des défauts dans la MASDE.....	13
I.10.3. Causes des défauts.....	13
I.10.3.1. Cause des défauts au statorique.....	14
I.10.3.2. Cause des défauts au rotoriques.....	14
I.10.3.3. Défauts d'isolant dans un enroulement.....	14
I.10.4 Méthodes de diagnostic des machines électrique.....	15
I.11 conclusion.....	17

Chapitre II : Modélisation et conception de la MASDE

II.1. Introduction.....	18
II.2. Mise en équation du problème magnétique.....	18
II.2. 1.. Forme locale des équations de Maxwell.....	18

Sommaire

II.3. Prise en compte du mouvement du rotor.....	21
II.4. Algorithme de résolution.....	22
II.5. Conceptions du modèle 1 dans le Logiciel Flux2D.....	22
II.6 Principe de la méthode des éléments finis.....	23
II.7 Géométrie et maillage.....	23
II.8. Circuits électriques externes.....	25
II.9. Conditions aux limites.....	26
II.10 conclusions.....	27

Chapitre III : Analyse du comportement de la MASDE sur flux2D

III.1. Introduction.....	28
III.2. Logiciel FLUX-2D.....	28
III.3. Application à la simulation de la MASDE.....	29
III.4. Les contraintes et les étapes impliqués dans la conception d'enroulement six phases.....	33
III.5. Conception de l'enroulement statorique.....	33
III.6 Résultats de simulation.....	34
III.6.1 Les grandeurs locale.....	34
III.6.2 les grandeurs mécanique.....	38
III.6.3 les grandeurs électrique.....	40
III.7. Conclusion.....	42

Liste des figures

Figure I-1 Rotor Bobiné.....	3
Figure I-2 Rotor à cage d'écureuil.....	4
Figure I-3 Machines multi-phasées de type.....	5
Figure I-4 Machines multi-phasées de type 2.....	5
Figure I-5 : La Machine asynchrone double étoile.....	6
Figure I-6 : Vue éclaté d'une machine asynchrone double étoile [19].....	7
Figure I-7 Vue interne du stator.....	8
Figure I-8 La Cage d'écureuil [27].....	8
Figure I-9 Modes de fonctionnement suivant glissement [4].....	10
Figure I-10 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases [13].....	11
Figure I-11 Défaut Roulement.....	12
Figure I-12 Rupture de barre.....	13
Figure I-13 Différents court circuits au stator.....	15
Figure II-1 Géométrie et domaine d'étude.....	19
Figure II-2 Ligne de glissement.....	21
Figure II-3 Bande de roulement.....	22
Figure II-4 Géométrie de la machine sous flux2D.....	23
Figure II-5 Courbe d'aimantation B(H).....	24
Figure II-5.1 Maillage des Lignes. Figure II-5.2 Maillage des faces.....	24
Figure II-5.3 Maillage d'interfère.....	24
Figure II-6 Maillage de la machine.....	25
Figure II-7 Circuit électrique de la MASDE.....	26
Figure II-8 Conductions au limites.....	26
Figure III-1 Organigrammes des différents modules du logiciel Flux-2D.....	29
Figure III-2 Représentation des dimensions d'une encoche.....	30
Figure III-3 La Géométrie de la machine asynchrone.....	31
Figure III-4 Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.....	31
Figure III-5 Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de toutes les bobines.....	32
Figure III-6 Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de l'étoile 1 et l'étoile2.....	32
Figure III-7 Schéma complet de l'enroulement montrant les connexions des phases.....	32
Figure III-8 Cartes des lignes de champ.....	35
Figure III-9 L'induction magnétique.....	36
Figure III-10 Flux magnétique dans l'entrefer.....	38
Figure III-11 Vitesse de rotation.....	39
Figure III-12 Couple Électromagnétique.....	39
Figure III-13 Les Courants statorique V1, V2, V3.....	40
Figure III-14 : Les Courants statorique V4, V5, V6.....	41
Figure III-15 Les Courant rotorique.....	42

Liste des tableaux

Tableau III-1 Configuration d'enroulement double étoile	33
---	----

LISTE DES SYMBOLES

ε : La permittivité électrique

A : vecteur potentiel

H_{ck} et H_{cy} : Les champs coercitifs des aimants permanents

w_1 et w_2 : Fréquences d'alimentation de chaque bobinage du stator

α_1 et α_2 : Déphasages initiaux des valeurs maximales de densité de flux

N_r : Nombre de Nids du rotor

R : rayon moyen de l'entrefer

g : largeur de l'entrefer

λ : longueur axiale de l'entrefer

Y : longueur transversale linéaire de l'entrefer

θ : angle mécanique de l'entrefer

θ' : référence angulaire du rotor

P_p : Nombre des paires de pôles du bobinage de puissance

P_c : Nombre des paires de pôles du bobinage de commande

I_n : Courant du bobinage n

V_n : Tension d'alimentation du bobinage n

S1 (S2) : Glissement pour le stator 1 (stator 2)

ω_1 et ω_2 : Pulsations angulaires d'alimentation du stator 1 et du stator 2

Ψ_c : Flux du stator de commande

Ψ_v : Flux du stator de puissance

C_u : Coefficient d'utilisation de la machine

$R_{sp}R_{sc}R_r$: Résistance du bobinage de puissance, de commande et de rotor

j : La densité de courant

ρ : La densité de charge électrique

σ : La conductivité électrique

ν : L'inverse de la perméabilité

B : Induction magnétique

H : Champ magnétique

Introduction générale

Les machines à courant alternatif occupent une place importante dans les entraînements électriques. Ces machines ont remplacé les machines à courant continu, grâce à leur simplicité de construction [1]. Ainsi la présence des moteurs asynchrones dans les entraînements électriques, pour leurs avantages, notamment en ce qui concerne l'absence du collecteur mécanique [1], est devenu indispensable.

De nos jours, la machine asynchrone à double étoile a fait ces preuves dans le domaine de recherche et commence à en prendre de la place dans l'industrie.

Cette nouvelle génération de machines se compose d'un stator portant deux bobinages triphasés indépendants décalés de 30° et un rotor à cage d'écureuil. L'étude et la résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique.

Grâce à ses performances remarquables, la machine asynchrone à double étoile représente une solution particulièrement attractive pour les systèmes d'entraînement électrique. Toutefois, afin de confirmer son potentiel et garantir sa fiabilité en conditions réelles, une analyse approfondie de son comportement en présence de défauts s'avère indispensable.

Dans ce contexte, pour objectif de développer un modèle de cette machine en utilisant le logiciel de simulation par éléments finis Flux2D, afin d'analyser l'impact de différents types de défauts sur ses performances.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire offre une vue d'ensemble sur les machines électriques, avec un intérêt particulier porté à la machine asynchrone à double étoile (MASDE). Ce chapitre aborde également les différents types de défauts susceptibles d'affecter les machines électriques, ainsi que quelques méthodes couramment utilisées pour leur diagnostic.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation numérique par la méthode des éléments finis de la MASDE en utilisant le code numérique Flux2d pour la conception du modèle.

Le troisième chapitre est dédié à l'exploitation du modèle par éléments finis afin d'analyser le comportement et les performances de la machine asynchrone à double étoile en présence de défauts.

Enfin, une conclusion générale viendra synthétiser les principaux résultats obtenus au cours de ce travail et proposera quelques perspectives.

CHAPITRE I



Généralité sur la MASDE et des méthodes de diagnostic des défauts

I.1. Introduction :

La machine asynchrone à double étoile est une machine électrique à courant alternatif dotée de deux systèmes d'alimentation distincts au niveau du stator. Comme son nom l'indique, cette configuration nécessite deux alimentations et aucune connexion électrique directe avec le rotor, ce qui permet de se passer de dispositifs de contact tels que les bagues et balais, améliorant ainsi la robustesse et la fiabilité de la machine.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les principales machines électriques utilisées dans les systèmes d'entraînement, en mettant l'accent sur l'émergence et l'intérêt croissant de la MASDE. Nous présenterons ensuite les principes fondamentaux de son fonctionnement, les types de défauts auxquels elle peut être sujette, ainsi que les méthodes de diagnostic couramment employées pour leur détection.

I.2. Histoire des Machines Electriques :

En 1821 l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique. L'année suivante Peter Barlow lui adjoint une roue dentée.

En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. Dans la même période, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.

En 1832 Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Pixii, ont réalisé génératrice à courant continu.

En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalisait une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Pixii /Ampère qui améliorait le commutateur redresseur.

En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable.

En 1848 apparaissaient les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500 N.m. Ces moteurs furent probablement les premiers à être utilisés pour les applications industrielles.

En 1860 la compagnie "Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes.

En 1865 l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré.

En 1888 Nikola Tesla déposa une quantité de brevets pour tout son système polyphasé (transformateurs, générateurs, moteur synchrones et asynchrones, etc.). Dans ces années, une lutte entre Edison et Tesla est apparue au sujet du choix du courant continu ou alternatif pour la production, l'utilisation et donc la consommation de l'énergie électrique. On remarque sur ce bref historique que les chercheurs ainsi que les ingénieurs n'ont pas cessé d'améliorer, de développer et d'inventer d'autres machines, qui ont satisfait les besoins de plusieurs applications industrielles et domestiques, ce qui a donné lieu à de nombreuses machines allant de "micro machines" aux "giga machines".

Les possibilités de conditionnement de l'énergie électrique, qu'offre l'électronique de puissance, ont non seulement permis de modifier considérablement les conditions de fonctionnement des machines conventionnelles à courant continu et à courant alternatif, mais elles ont également conduit au développement de nouvelles classes de machines comme par exemple les machines à courant continu du type brushless (sans balais), etc.

I.3. Classification des machines électriques :

La classification des machines peut se faire de plusieurs manières :

- ✓ Par la façon d'alimenter ou de délivrer le courant/tension.
- ✓ Par la construction

Par leur type d'alimentation :

- Machines à Courant Continu : Machines à courant continu soit série, parallèle ou compound.

Machines à Courant Alternatif.

- Machines synchrones
- Machines asynchrones.

Par leur construction :

- Machines sans collecteur
- Machines asynchrones
- Machine synchrone à aimants permanents.
- Machines avec collecteur.

- Machines à courant continu
- Machines synchrones a rotor bobiné.

De plus, les machines multi-phasées (dont le nombre de phases est supérieur à trois) sont apparues dans les années 1920 pour la segmentation de puissances des alternateurs, dont les caractéristiques sont présentées ci-dessous. [08]

I.3.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague) :

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil. Cependant, il présente les avantages suivants :

- ✓ Le couple de démarrage est plus élevé.
- ✓ Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures

(Rhéostats), le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat [3].



Figure I-1 Rotor Bobiné.

I.3.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil :

C'est le plus fréquent. Ce type de moteur a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits [3].



Figure I-2 Rotor à cage d'écureuil.

I.4. Caractéristiques des machines multi-phasées :

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator, on discerne deux types de machines multi-phasées ; celles dont le nombre de phases est multiple de trois et l'autre type [06] [07].

On peut avoir plusieurs configurations possibles dans une machine à nombre de phases donné suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, c'est-à-dire le décalage entre les étoiles par exemple une machine double étoile (6 phases) de $\alpha = 0^\circ$ a des caractéristiques différentes de celle d'une machine double étoile à $\alpha = 30^\circ$. Pour la prise en compte de ces différences dans une machine et pouvoir différencier entre les configurations possibles, un autre terme est introduit : le nombre de phases équivalent. Il est défini comme suit :

$$n_{pha} = \frac{180^\circ}{\alpha n}$$

I.1

Machines multi phases type 1 :

Les machines polyphasées du type 1 dans lesquelles le nombre de phases statoriques q est multiple de trois $q = 3k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$). Ses machines sont également connues sous l'appellation machines multi-étoiles, la machine asynchrone double étoile (MASDE). Elle est robuste, fiable et répond à de meilleurs critères de performances par rapport à la machine ordinaire (simple étoile) avec un rendement très élevé. La figure ci-dessous donne des exemples sur les machines multi phases de type 1 [3].

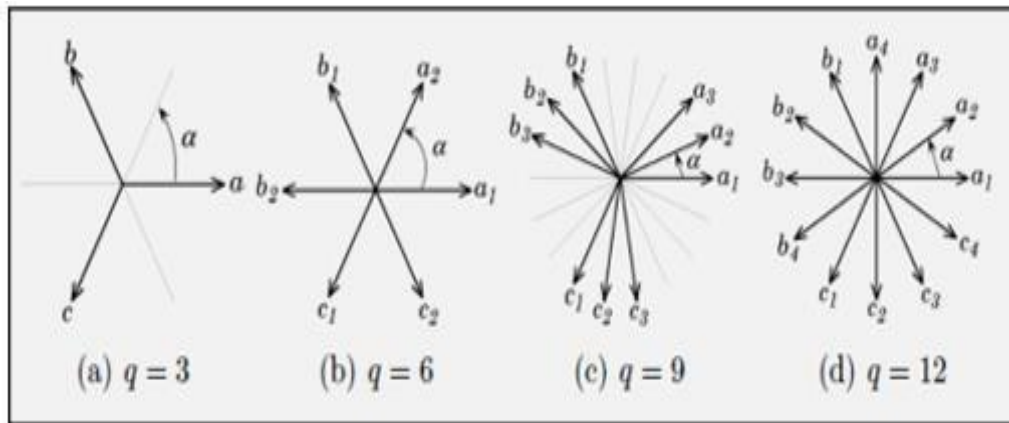


Figure I-3 Machines multi-phasées de type.

✚ Machines multi-phasées type 2 :

Les machines polyphasées du type 2 sont bien entendu des moteurs dont le nombre de phases statoriques q est un nombre impair. La figure suivante montre des exemples sur les machines multi-phasées de type 2 [4].

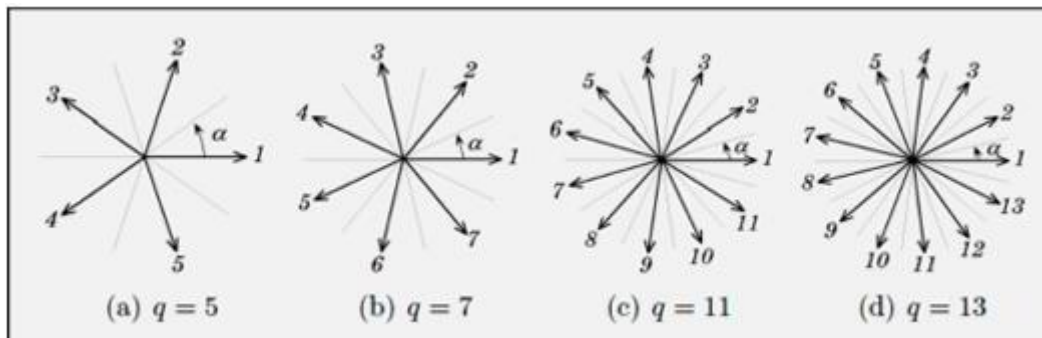


Figure I-4 Machines multi-phasées de type 2.

I.5. Description de la MASDE :

Définition :

La machine asynchrone triphasé à double étiole est une machine qui comporte deux enroulements triphasés dans un seul circuit magnétique (stator), déphasé entre eux d'un angle α (Figure 1-1). Parmi les angles le plus utilisé on trouve le plus souvent $\alpha=30^\circ$.

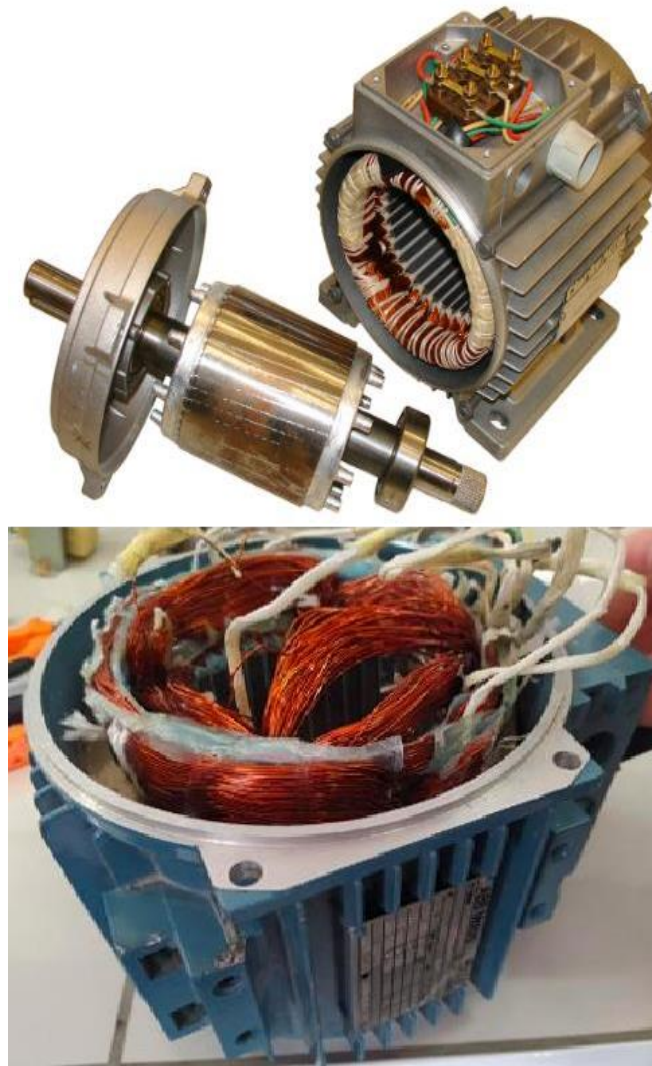


Figure I-5 : La Machine asynchrone double étoile.

Les deux enroulements statoriques alimentés chacun par un système triphasé équilibré de courants entraînant la création d'un champ tournant le long de l'entrefer. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de paires de pôle de la machine et à la pulsation des courants statoriques telle que :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad \mathbf{I.2}$$

Pourquoi l'angle α ?

- ✓ Améliorations des harmoniques perturbateurs
- ✓ Simplifications de la commande électronique
- ✓ Améliorations de la qualité du couple et rendement

I.6. Constitution de la machine asynchrone double étoile :

Elle est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor, contrairement à celle asynchrone triphasés. Elle possède plus de 3 phases

au stator (2x3 phases), et contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation, les enroulements rotoriques sont court-circuités.

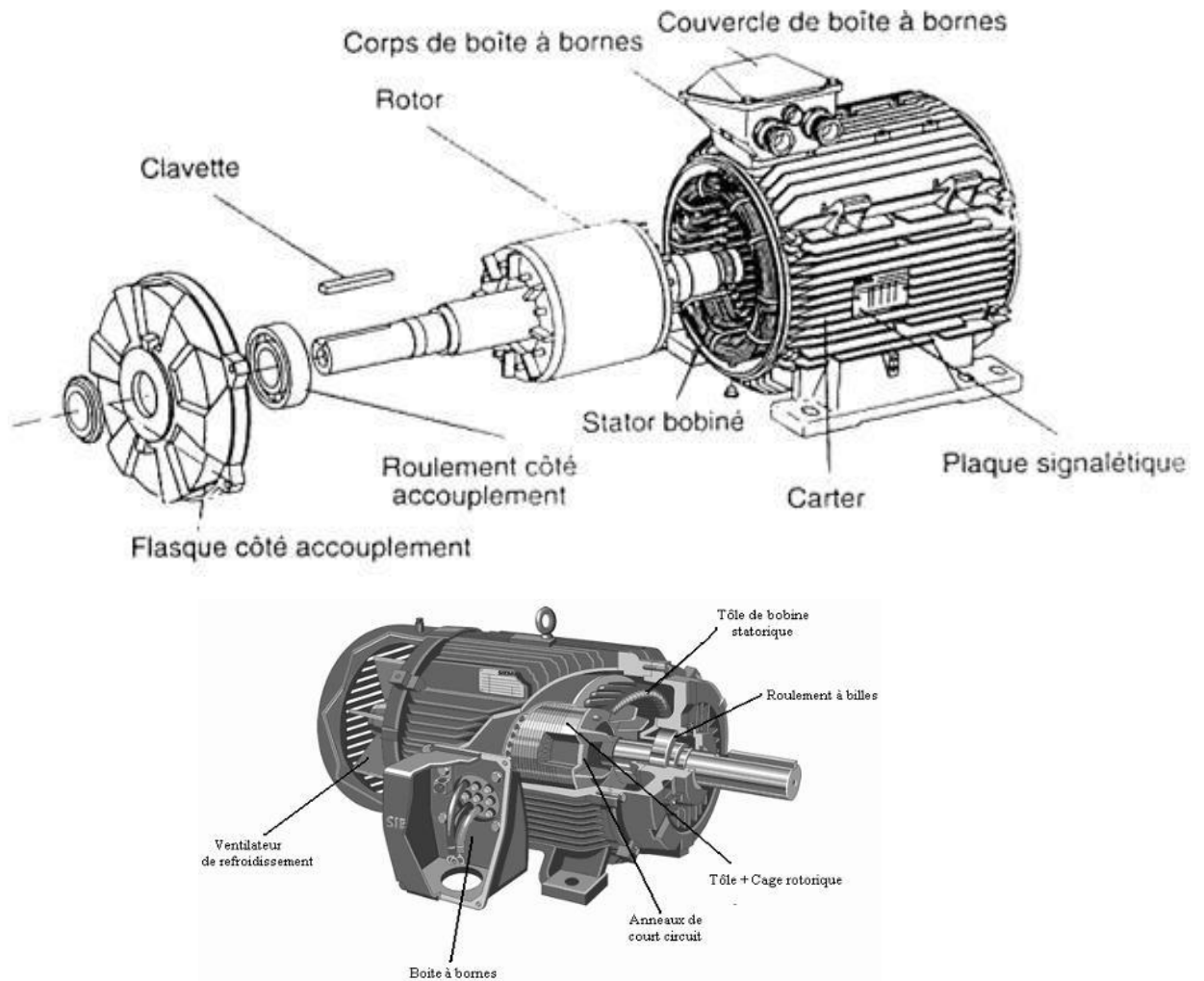


Figure I-6 : Vue éclatée d'une machine asynchrone double étoile [19].

I.6.1 Stator :

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent 6 bobinages indépendants, composent deux groupes de trois phases qu'on appelle les étoiles, chaque étoile est décalée par rapport à l'autre par un angle électrique (α) et alimentée par un réseau triphasé équilibré, elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par des systèmes de tensions ou de courants triphasés stator d'une machine asynchrone.

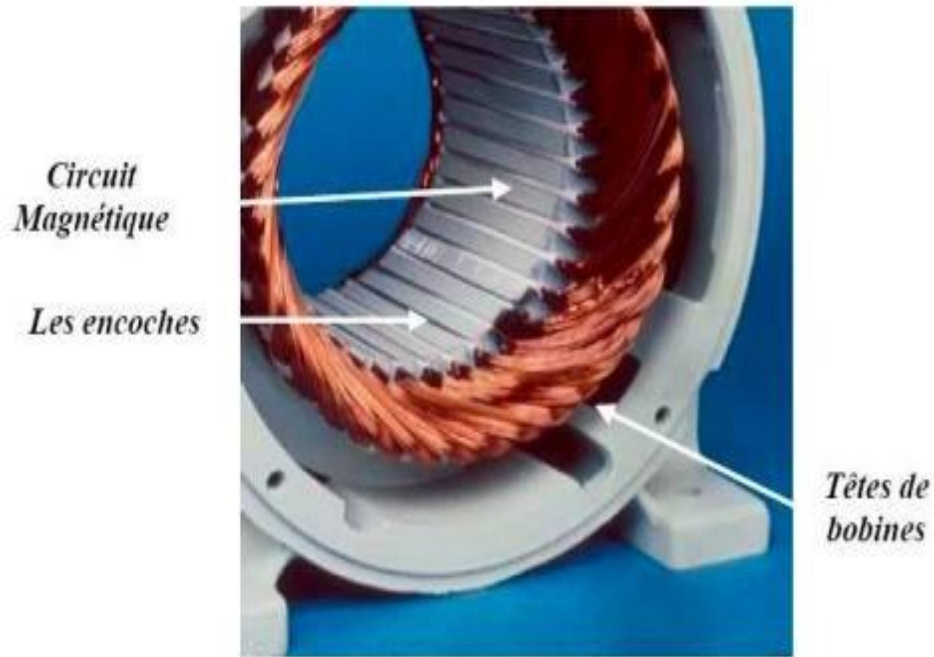


Figure I-7 Vue interne du stator.

I.6.2 Le rotor :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.9). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

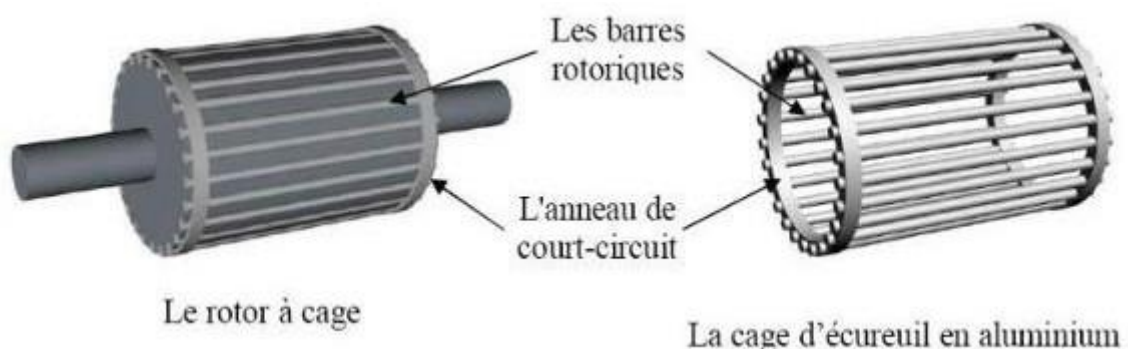


Figure I-8 La Cage d'écureuil [27].

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres

rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [34].

I.7. Les Avantages et les inconvénients de la MSADE :

Depuis plusieurs décennies les MASDE ont été utilisées dans beaucoup applications, pour leurs avantages :

- ✓ Segmentation de la puissance afin de réaliser des ensembles convertisseur machine de forte puissance des composants de calibre réduit.
- ✓ Amélioration des performances des machines alimentées par des tensions ou des courants de forme rectangulaire (onduleurs fonctionnant en pleine onde).
- ✓ Diminution des ondulations du couple électromagnétique et les pertes robotiques.
- ✓ Amélioration de la fiabilité en offrant la possibilité de fonctionner correctement en régimes dégradés (une ou plusieurs phases ouvertes).
- ✓ Elargissement des possibilités de commande par commutation de la vitesse synchrone, en changement la séquence des tensions appliquées à la machine.
- ✓ Diminution du contenu harmonique de la courante du bus continu lors d'une alimentation par onduleurs.

Les inconvénients majeurs :

- ✓ Apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.
- ✓ Nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur-machine.
- ✓ Multiplication du nombre des semi-conducteurs complique le système de commande.

I.8. Principe de fonctionnement de la MASDE

Les courants statoriques de la machine créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 alimenté par des courants triphasé et l'étoile 2 alimenté par les mêmes courants triphasés mais décalé d'un angle $\alpha=30^\circ$). La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques $\langle f_s \rangle$ c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme w_s . Elle définit comme suite, [3].

$$w_s = \frac{f_s}{p} [\text{Rad/s}]$$

Ces deux Champs tournants produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les barres du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celui du synchronisme ($N_r < N_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse de glissement : [9]

$$N = N_s - N_r \quad \text{I.4}$$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{I.5}$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement :

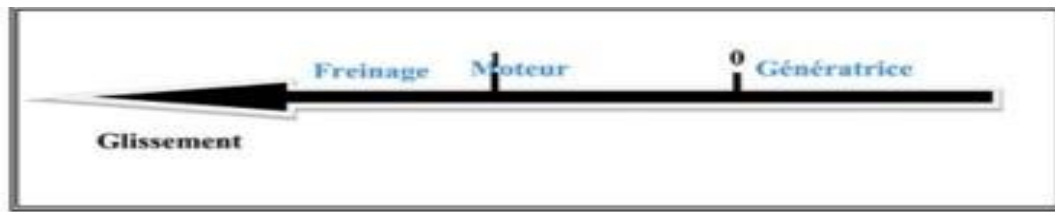


Figure I-9 Modes de fonctionnement suivant glissement [4].

I.9. Applications de la Machine asynchrone double Étoile :

(MASDE) est utilisée beaucoup plus dans Les applications de puissances élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on peut citer aussi les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc. [14]. Une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne (voir la Fig. I.11)

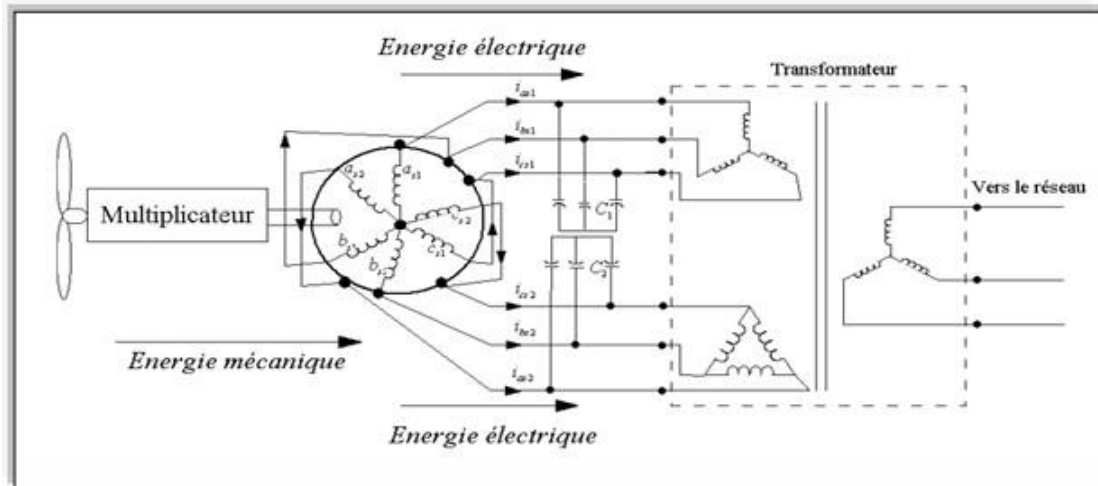


Figure I-10 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases [13].

I.10. : Modélisation des défauts entre spires au niveau statorique de la MASDE

La modélisation et l'identification des paramètres de la machine électrique avec défaut entre spires du bobinage statorique sont des étapes importantes pour la détection de ce type de défaut et son diagnostic. Les modèles doivent prêter un compromis entre simplicité et précision. L'utilisation des modèles externes simplifiés de défaut peut s'avérer limitée, car il est difficile, même théoriquement, d'inclure toutes les imperfections qui existent dans la machine en présence d'un défaut. Toutefois, les modèles sont nécessaires pour étudier le comportement des différentes variables de la machine et d'en déduire des signatures caractéristiques d'un défaut quelconque. L'étude du comportement des machines électriques avec défaut grâce à ces modèles permet la prédiction des grandeurs externes qui peuvent être mesurées et exploitée par des techniques de diagnostics.[32]

I.10.1. Les différents types de défauts de la machine :

Leurs causes sont très variées. Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en quatre familles principales [02].

✓ **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante

✓ **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dV/dt dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [12].

✓ **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure [18], [12]. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.

✓ **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.



Figure I-11 Défaut Roulement.



Figure I-12 Rupture de barre.

2.2. Principe du diagnostic des défauts dans la MASDE :

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- ✓ Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus.
- ✓ Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- ✓ La valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- ✓ La décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. À partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [10].
- ✓ Avec l'avancée en technologie numérique ces dernières années, la capacité informatique est maintenant disponible pour surveiller et diagnostiquer les défauts de la machine pour une variété d'anomalies sur une base en temps réel.

I.10.3. Causes des défauts :

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

- ✓ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problème mécanique, rupture de fixation, problème d'isolation, survolage d'alimentation...
- ✓ Les amplificateurs de défauts : surchauffe fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...

✓ Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défectuosité des composant, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...

I.10.3.1. Cause des défauts statorique

Les défauts statoriques peuvent être dus à plusieurs raisons, parmi lesquelles :

- ✓ Un grand noyau du stator où la température d'enroulements est élevée ;
- ✓ Attachement lâche à la fin de l'enroulement ;
- ✓ Contamination due à l'huile, à la moisissure ou à la saleté ;
- ✓ Cycle de démarrage fréquent ;
- ✓ Surtension, décharges électriques, et fuites dans les systèmes de refroidissement.

I.10.3.2. Cause des défauts rotoriques :

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit sont nombreuses :

- ✓ Effort thermique dû à l'échauffement de l'anneau de court-circuit et à la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau) ;
- ✓ Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, excentricité de l'entrefer), bruits et vibrations électromagnétiques ;
- ✓ Effort dynamique dû au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi qu'aux efforts cycliques
- ✓ Effort environnemental causé par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules.

I.10.3.3. 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 une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [12].

Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✓ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.

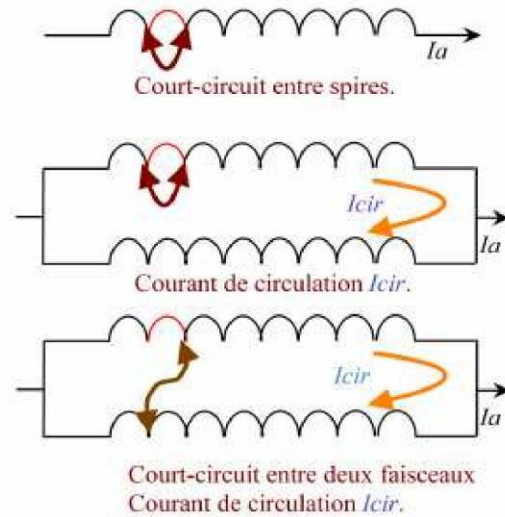


Figure 1-13 Différents court circuits au stator.

I.10.4 Méthodes de diagnostic des machines électrique :

- Méthodes sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal [21].

- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau.

En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées.

- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

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

L'analyse spectrale du signale du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'Etat de santé de la machine.

- Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux.

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis).

- Diagnostic par mesure des vibrations

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations même une amplitude très petite des vibrations de l'armature de la machine peut produire un bruit élevé.

Le bruit et les vibrations sont provoqués principalement par des forces qui sont d'origine magnétique mécanique ou aérodynamique Proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle.[23]

Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance.

- Diagnostic par utilisation Transformée de Fourier rapide (FFT)

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

$$N \log 2.$$

I.6

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal (t).

En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $e^{j2\pi f k T}$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquat.

- Diagnostic par utilisation Transformée en Ondelettes (TO)

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [21].

Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique

I.11 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un aperçu général des machines électriques utilisées dans les systèmes d'entraînement, en mettant en évidence l'intérêt particulier porté à la machine asynchrone. Grâce à sa structure spécifique à double alimentation statorique, cette machine offre plusieurs avantages en termes de performance, de robustesse et de simplicité de commande, ce qui en fait une solution prometteuse pour de nombreuses applications industrielles.

Nous avons également abordé les différents types de défauts susceptibles d'affecter les machines électriques, notamment les défauts statoriques et rotoriques, ainsi que les méthodes de diagnostic permettant de les détecter. Cette analyse met en évidence l'importance d'une étude approfondie du comportement de la MASDE en présence de défauts, afin d'en évaluer la fiabilité en conditions réelles d'exploitation.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la MASDE par éléments finis, une étape essentielle pour simuler et analyser son comportement dans diverses conditions de fonctionnement, y compris en présence de défauts

CHAPITRE II



*Modélisation et
conception de la MASDE*

II.1 Introduction :

La modélisation des phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des systèmes électromagnétiques nécessite des outils mathématiques pour les modéliser [22]. Ces phénomènes sont liés aux circuits magnétiques, électriques et à la conversion électromécanique.

En s'intéressant au modèle interne, ce sont les équations de Maxwell couplées aux équations des circuits électriques et à l'équation mécanique de la MASDE qui peut décrire la formulation mathématique de problème global.

II.2. Mise en équation du problème magnétique :

II.2.1. Forme locale des équations de Maxwell :

Les équations de Maxwell décrivent les propriétés macroscopiques locales associées aux grandeurs électriques et magnétiques. Ces grandeurs vectorielles dépendantes du temps et de l'espace sont :

$H(p, t)$: Champ Magnétique [A.m-1]

$E(p, t)$: Champ Électrique [V.m-1]

$B(p,t)$: Induction Magnétique [T]

$D(p, t)$: Induction Électrique [C.m-2]

$J(p, t)$: Densité volumique du courant électrique de conduction [A/m²]

$\rho(p, t)$: densité volumique de la charge électrique libre [C/m³] t représente le temps absolu dans le sens de la transformation de Lorentz, elle est réduite à celle de Galilée et ρ représente un point du domaine étudié.

Les équations de Maxwell qui représentent les lois générales de l'électromagnétisme reliant les grandeurs précédentes sont :

$$\text{rot}(H) = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{II.7}$$

$$\text{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{II.8}$$

$$\text{div}(B) = 0 \quad \text{II.9}$$

$$\text{div}(D) = \rho \quad \text{II.10}$$

Les équations (II.7) et (II.8) représente, respectivement, le couplage et l'évolution dans le temps du champ magnétique-induction électrique et du champ électrique-induction magnétique. La troisième (II.9) exprime la conservation du flux magnétique. La combinaison entre (II.7) et (II.10) donne (II.11) la loi de conservation de la charge :

$$\text{div}(j) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{II.11}$$

La figure (II.1) montre la géométrie et le domaine d'étude.

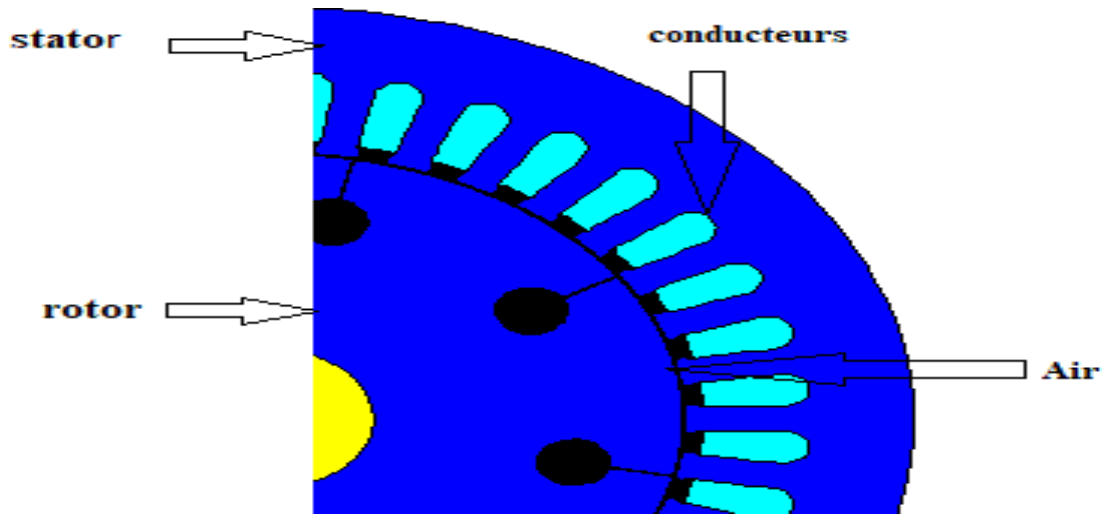


Figure II-1 Géométrie et domaine d'étude.

Cette figure représente les différentes zones de la MASDE :

Le fer, l'air et les conducteurs. On attribue à chaque zone ses propriétés électromagnétiques, résistivité des matériaux conducteurs et les propriétés magnétiques des matériaux linéaires et non-linéaires (représentés par leur courbe de saturation B(H)).

En tenant compte des hypothèses adoptées pour le modèle 2D, l'équation aux dérivées partielles gouvernant la diffusion du champ électromagnétique dans la machine :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial a}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial a}{\partial y} \right) = js - \sigma \left(\frac{\partial a}{\partial t} + \mathit{grad}(v) \right) \quad \text{II.12}$$

$$\text{Div} \left(\frac{1}{\mu} \mathit{grad}(a) \right) + \sigma \left(\frac{\partial a}{\partial t} + \sigma \mathit{grad}(v) \right) = -js \quad \text{II.13}$$

Selon la Fig.II.2, on distingue trois régions différentes dans l'étude de la MASDE par rapport au deuxième terme de l'équation (II.13) :

Stator : La conductivité du fer du stator est nulle parce qu'il est constitué de tôles fines isolées entre elles. Le stator de MASDE est constitué de deux bobinages, ce qui conduit à l'existence de deux densités de courant, c'est celles imposées par les deux alimentations de ce stator. Elles sont réparties d'une façon uniforme sur la surface de l'encoche. Ce qui donne un potentiel vecteur dans le stator qui vérifie l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) &= \mathbf{0} && \text{Dans le fer} && \text{II.14} \\ \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) &= -(\mathbf{J}_{s1} + \mathbf{J}_{s2}) && \text{Dans les encoches} \end{aligned}$$

Afin de couplé ces équations magnétiques aux circuits électriques des deux bobinages, les densités de courant $(\mathbf{J}_{s1} + \mathbf{J}_{s2})$ seront exprimées en fonction des courants de phases.

$$\mathbf{J}_{s1,2} = \frac{n_{e1,2}}{s_{e1,2}} \beta (\alpha_{a1,2} \mathbf{i}_{a1,2} + \alpha_{b1,2} \mathbf{i}_{b1,2} + \alpha_{c1,2} \mathbf{i}_{c1,2}) \quad \text{II.15}$$

$n_{e1,2}$: Nombre de conducteur du bobinage 1 ou 2 par encoche.

$s_{e1,2}$: Surface de l'encoche occupée par les $n_{e1,2}$ conducteurs du bobinage 1 ou 2

β : Un coefficient égale a (± 1) donnant le sens des conducteur et $(\alpha_{a1,2} \alpha_{b1,2} \alpha_{c1,2})$ qui Définissent l'appartenance des encoches aux phases $(a_{1,2} b_{1,2} c_{1,2})$.

En remplaçant la valeur de $\mathbf{J}_{s1,2}$ dans l'équation (II.14) :

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) + \left\{ \begin{aligned} &\frac{n_{e1}}{s_1} \beta (\alpha_{a1} \mathbf{i}_{a1} + \alpha_{b1} \mathbf{i}_{b1} + \alpha_{c1} \mathbf{i}_{c1}) \\ &+ \frac{n_{e2}}{s_2} \beta (\alpha_{a2} \mathbf{i}_{a2} + \alpha_{b2} \mathbf{i}_{b2} + \alpha_{c2} \mathbf{i}_{c2}) \end{aligned} \right\} = \mathbf{0} \quad \text{II.16}$$

Entrefer :

Dans la deuxième région l'entrefer, le potentiel vecteur vérifie l'équation :

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) = \mathbf{0} \quad \text{II.17}$$

Rotor:

Le rotor de la MASDE est constitué des tôles isolées les unes des autres et d'une cage qui contient 4 nids comme décrit précédemment. Le potentiel vecteur vérifie :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) = \mathbf{0} & \text{dans le fer} \\ \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(a) \right) + \partial \frac{\partial A}{\partial t} - \operatorname{grad}(V) = \mathbf{0} & \text{dans les encouches} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

La densité de courant induite dans le rotor s'écrit :

$$\mathbf{J} = -\partial \left(\frac{\partial A}{\partial t} - \operatorname{grad}(V) \right) \quad \text{II.19}$$

II.3. Prise en compte du mouvement du rotor :

On trouve deux techniques [22] importantes pour prendre en considération le mouvement de rotation du rotor

- ✓ Technique de ligne de glissement
- ✓ Technique de la bande de roulement.

- Ligne de glissement :

Dans cette technique, on doit coupler les maillages du stator et du rotor dans l'entrefer par l'intermédiaire d'un contour fermé, appelé ligne de glissement en 2D, ou surface de glissement pour des problèmes en 3D (Fig.II.2). Nous devons faire un maillage régulier dans ce contour. Ce maillage doit suivre le mouvement du rotor. La machine n'est maillée qu'une seule fois mais le pas d'intégration dans le temps est imposé au départ. Malgré que cette technique soit peu coûteuse en termes de temps de calcul, elle fait que le déplacement du rotor se déplace discrètement.

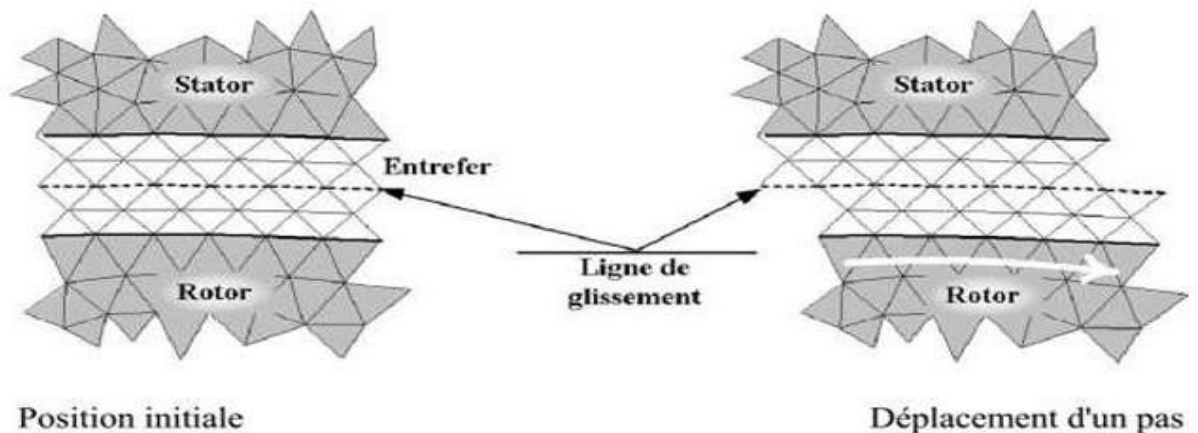


Figure II-2 Ligne de glissement.

- Bande de roulement :

Cette technique utilise une bande d'éléments réguliers de l'entrefer afin de lier le maillage de stator à celui de rotor (Fig.II.3). La distorsion des éléments de la bande de roulement provoque des difficultés d'ordre numérique. Il est nécessaire de remailler la bande de roulement à chaque fois que cette distorsion devient importante et d'optimiser la connexion des différents nœuds afin de garder le maillage satisfaisant. Cette solution permet d'atteindre toutes les positions du rotor sans être obligé de remailler à chaque fois.

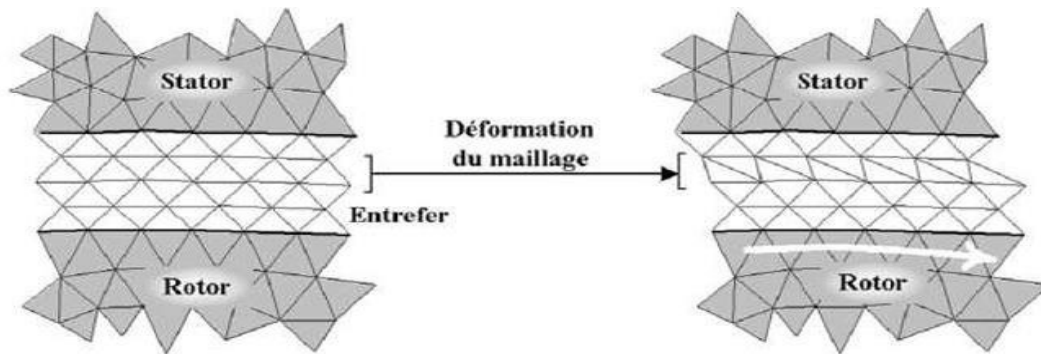


Figure II-3 Bande de roulement.

Flux2d utilise la technique de bande de roulement. En plus des règles habituelles de maillage, quelques règles supplémentaires doivent être respectées pour le maillage de la bande de roulement : La bande de roulement ne doit comprendre qu'une seule couche d'éléments triangulaires, et ceux-ci doivent être aussi équilatéraux que possible.

II.4. Algorithme de résolution :

L'algorithme de résolution est le suivant :

- Initialisation des variables à $t=0$ ($A^0, I_s^0, \Omega^t, \theta^0$)
- Calcul à $(t + \Delta t)$ de $\begin{Bmatrix} A \\ I_s \end{Bmatrix}^{t+\Delta t}$
- Calcul du couple électromagnétique $C_{em}^{t+\Delta t}$ en fonction de $\{A\}^{t+\Delta t}$
- Calcul de la vitesse $\Omega^{t+\Delta t}$ et de la nouvelle position du rotor $\theta^{t+\Delta t}$
- Faire tourner le rotor à la nouvelle position
- Si la distorsion des éléments est importante remailler la bande de roulement
- Incrémenter le temps $(t + \Delta t)$ et refaire toutes les étapes

II.5. Conception du modèle de la MASDE sur Flux2D :

Le logiciel utilisé pour résoudre ce problème de modélisation électromécanique de la MASDE est Flux2d. Basé sur la méthode des éléments finis, Flux2d calcule les états magnétiques, électriques et thermiques des dispositifs bidimensionnels. Il permet la résolution de problèmes [25] [26] : Magnétostatique, Magnéto-harmonique, Magnétique transitoire, Conduction électrique, Electrostatique et thermique. Les grandeurs locales (champs électromagnétiques et thermique par exemple) et globales (forces, couples, courants, inductances) seraient difficiles, voire impossible déterminer par d'autres méthodes lorsque la géométrie du dispositif est complexe ou lorsque les matériaux sont non linéaires.

II.6 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.[17]

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 [20].

II.7 Géométrie et maillage :

La figure II.6 représente la géométrie, de la MASDE étudiée, construite sous Flux2D.

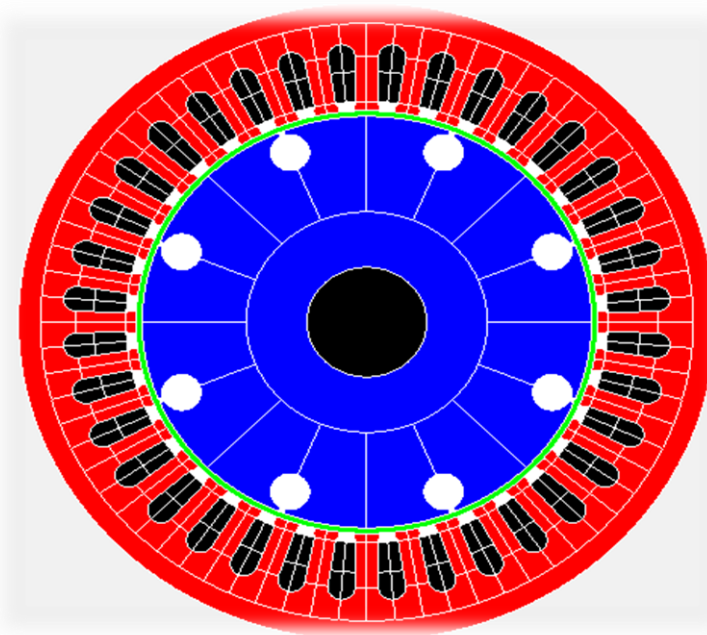


Figure II-4 Géométrie de la machine sous flux2D.

Les caractéristiques $B(H)$ de magnétisation du circuit magnétique statorique et rotorique de la machine sont données par la courbe illustrée dans la Fig. II.5 (matériau doux isotrope avec une loi de comportement $B(H)$ non linéaire) [29][28].

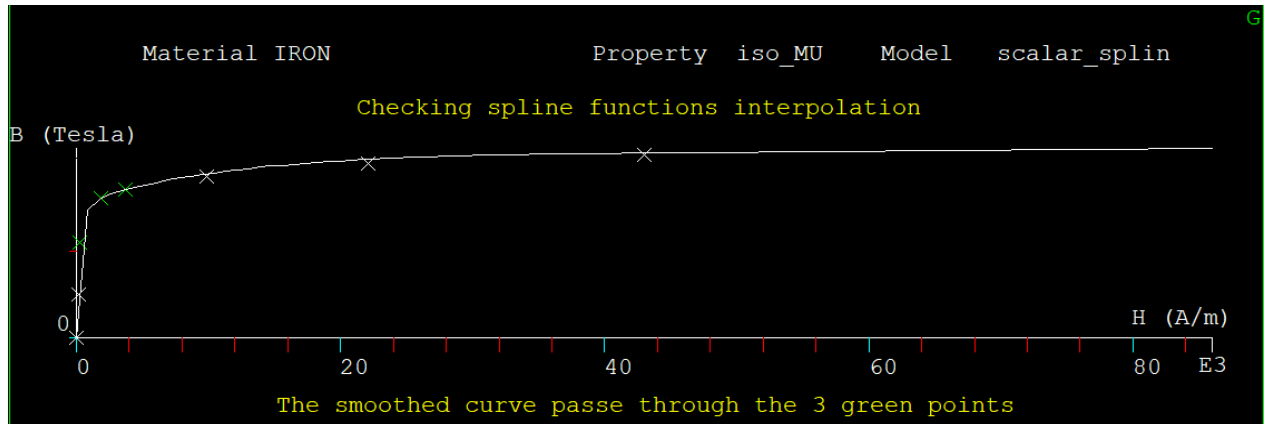


Figure II-5 Courbe d'aimantation B(H).

Le maillage de la structure est représenté sur la Fig.II.6. À l'issue du maillage, Flux 2D contrôle la qualité des triangles obtenues et signale ceux qui risquent de conduire à des résultats faux (triangles trop allongés ou trop pointus). L'utilisateur a alors la possibilité d'améliorer le maillage ou de poursuivre en ignorant cet avertissement.[30][31]

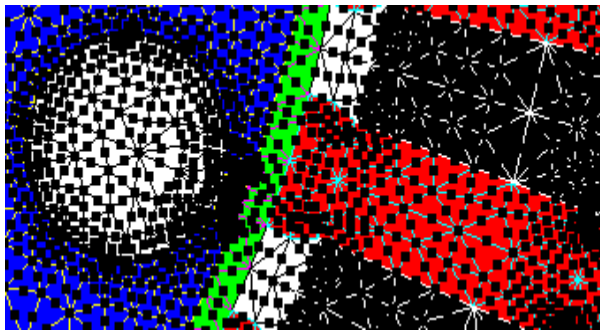


Figure II-5.1 Maillage des Lignes.

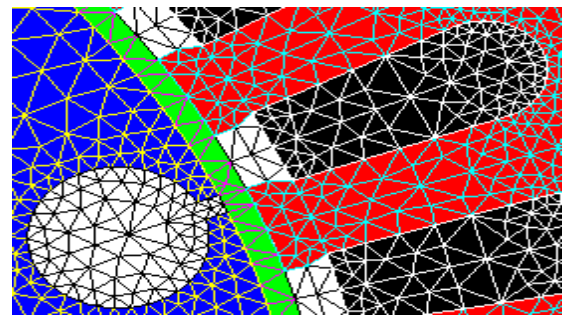


Figure II-5.2 Maillage des faces.

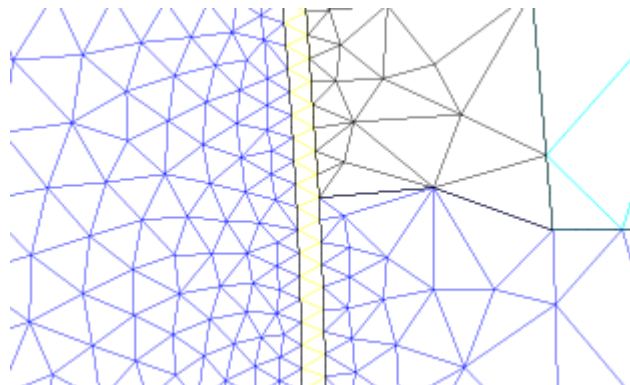


Figure II-5.3 Maillage d'interfère.

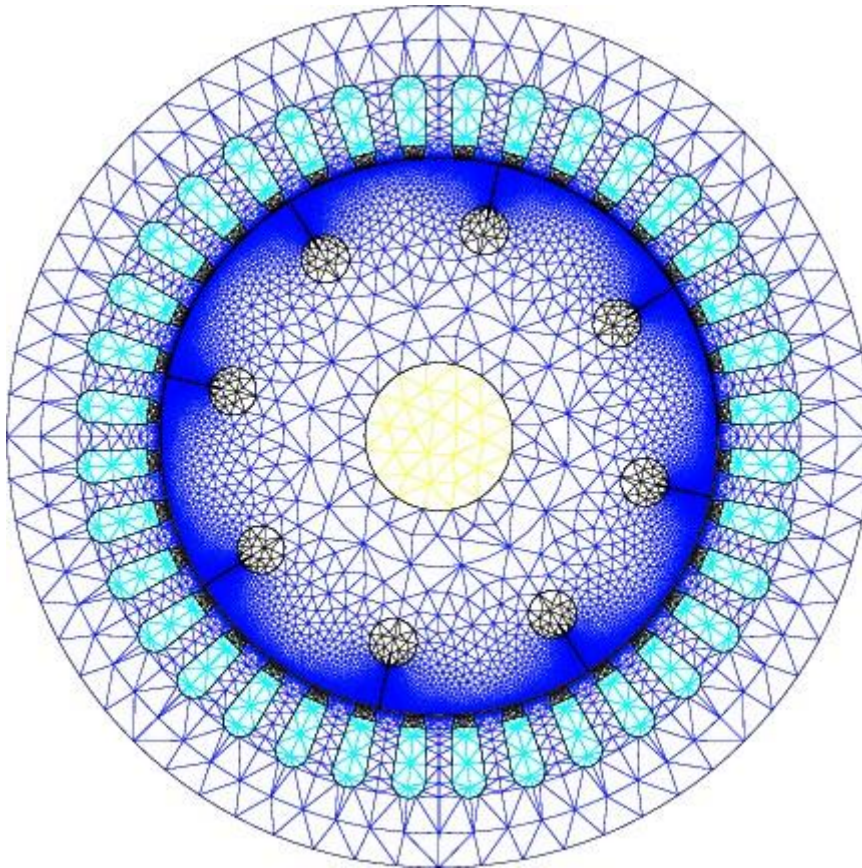


Figure II-6 Maillage de la machine.

Surface elements:

Number of elements not evaluated: 0 %

Number of excellent quality elements: 99.17 %

Number of good quality elements: 0.72 %

Number of average quality elements: 0.11 %

Number of poor-quality elements :0.01 %

Number of anormal elements: 0 %

II.8. Circuits électriques externes :

Les circuits électriques externes dans Flux2d sont connectés au domaine éléments finis à travers les flux magnétiques. Ces circuits sont construits à l'aide du programme CIRFLU qui dispose dans sa bibliothèque de tous les composants de base des circuits électriques. Lors de la connexion du circuit électrique au domaine élément finis, il faut associer les conducteurs bobinés et les conducteurs massifs du circuit électrique aux éléments conducteurs du domaine éléments finis. La figure II.7 représente le circuit électrique externe associé à notre model éléments finis.

Conclusion :

Dans ce chapitre, un modèle électromagnétique de la (MASDE) a été élaboré, suivi par la conception du modèle éléments finis sur flux2d. Il servira de base, dans le chapitre suivant, à l'analyse du comportement de la MASDE en régimes transitoire et permanent, en fonctionnement normale et en présence **d'un défaut de court-circuit entre deux bobines.**



CHAPITRE III



*Analyse du
comportement de la
MASDE sur flux2D*

III.1. Introduction :

La MASDE conçu dans le chapitre précédent est à l'origine, une machine asynchrone à cage triphasée classique. Elle est transformée de telle sorte que le fer statorique partage deux bobinages triphasés équilibrés.

Dans ce chapitre, nous intéressons, alors, à la simulation de notre machine à la présence d'un défaut de court-circuit entre deux bobines.

III.2. Logiciel FLUX-2D :

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos [11]. 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 [15].

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés, [16] :

1 – Module pré-processeur :

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

2 – Module processeur :

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

3 – Module post-processeur de Flux-2D (PostPro 2D) :

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

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (III.1).

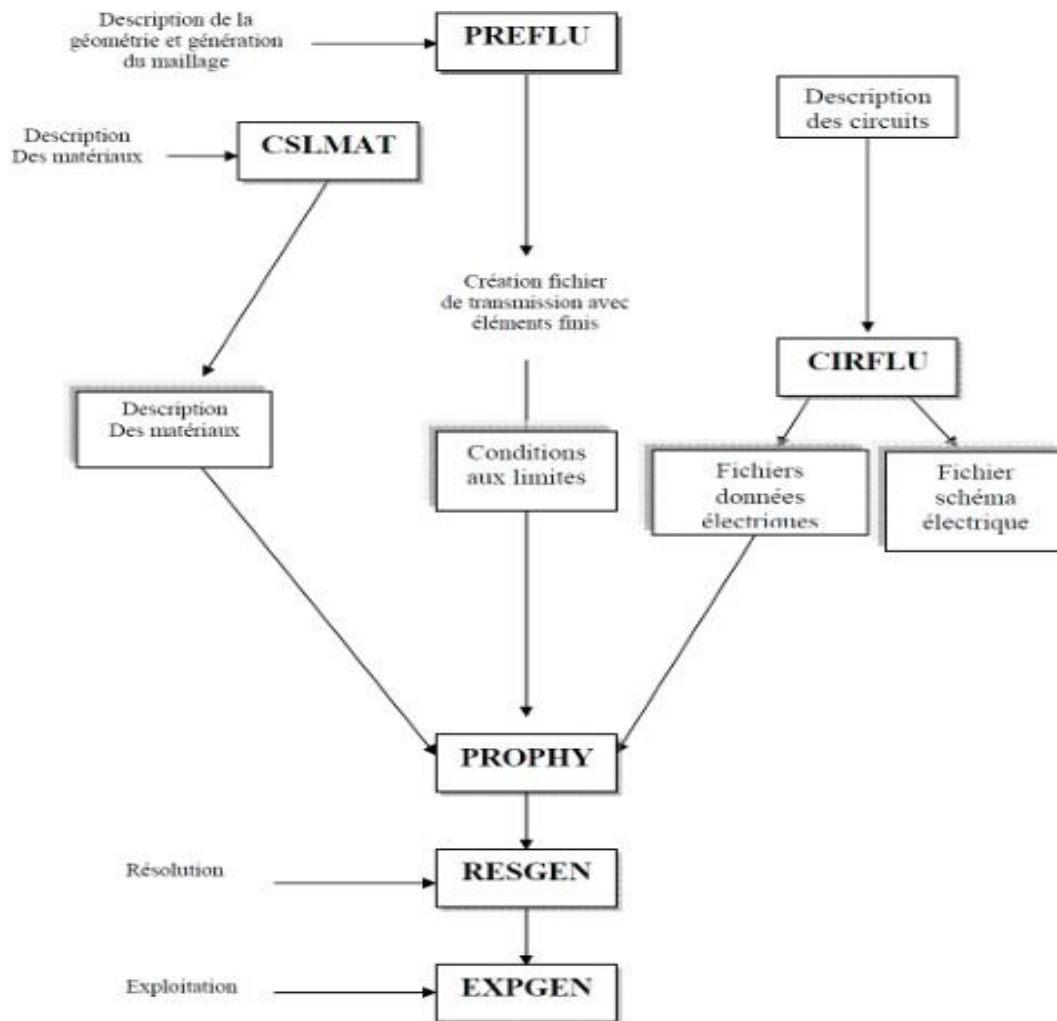


Figure III-1 Organigrammes des différents modules du logiciel Flux-2D.

III.3. simulation de la MASDE sous logiciel Flux2-D :

Les paramètres de la machine étudiée dans cette section proviennent d'une machine développée dans le cadre d'un projet de fin d'étude [05]. Celle-ci a été conçue à partir du rebobinage d'une MASDE dont les caractéristiques sont les suivantes :

➤ Nombre d'encoches $N_s = 36$ encoches ;

- Nombre de pôles = 6 pôles ;
- Puissance nominale = 1.1 kW ;
- La tension nominale 230-400 V ;
- Le courant nominal par phase = 2.66 A;
- La vitesse nominale = 750 tr/min ;
- Facteur de puissance $\cos\varphi = 0.81$;
- Le diamètre intérieur de l'alésage du stator. $D_s = 89.98$ mm ;
- L'enroulement statorique est un enroulement imbrique à 64 spires par bobine et 6 bobines par phase ;
- Le nombre de spires par phase $N_{ph} = 92$ spires ;
- Longueur du circuit magnétique de stator $L = 65.81$ mm ;
- Le nombre encoche par pôle par phase $q = 3$
 - Nombre de groupe = $2 p_m = 4 \times 3 = 12$;
 - Nombre de bobine par phase = $N_s / 2m = 36 / 6 = 6$;
 - La surface de l'encoche $Q_S = 44.77$ mm²,
 - Largeur inférieure d'encoche $b_1 = 5.46$ mm ;
 - Largeur supérieure d'encoche $b_2 = 4.15$ mm ;
 - L'ouverture d'encoche $b_p = 3.23$ mm ;
 - La hauteur d'encoche $h_z = 13.51$ mm.
- $D_r = 89.98$ mm ;
- Le langur de rotor $L = 66.49$ mm ;
- L'entrefer $g = 0,65$ mm ;

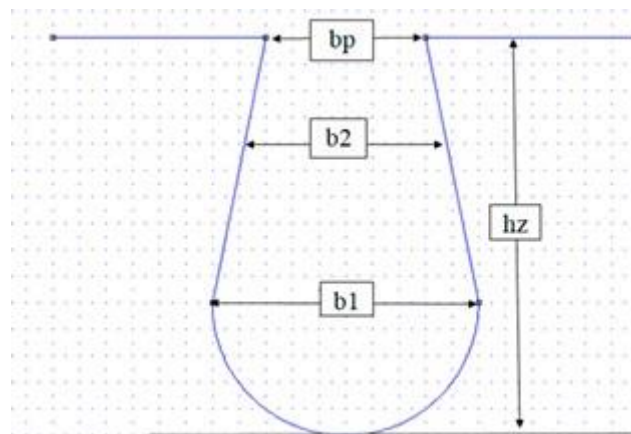


Figure III-2 Représentation des dimensions d'une encoche.

✓ La figure III.3 représenté la géométrie de la machine asynchrone [33].

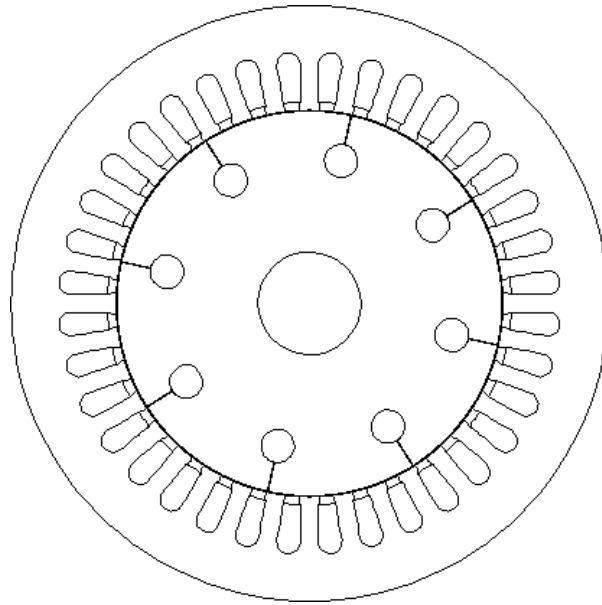


Figure III-3 La Géométrie de la machine asynchrone.

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont sur la figure (III .4).

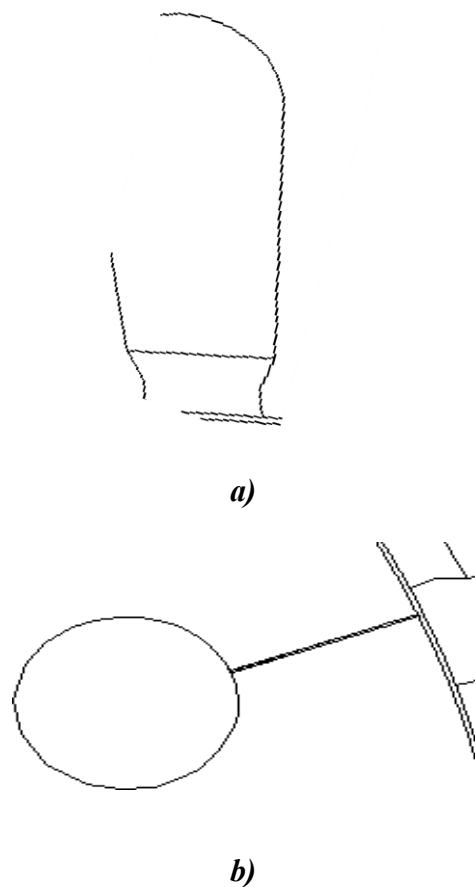


Figure III-4 Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.

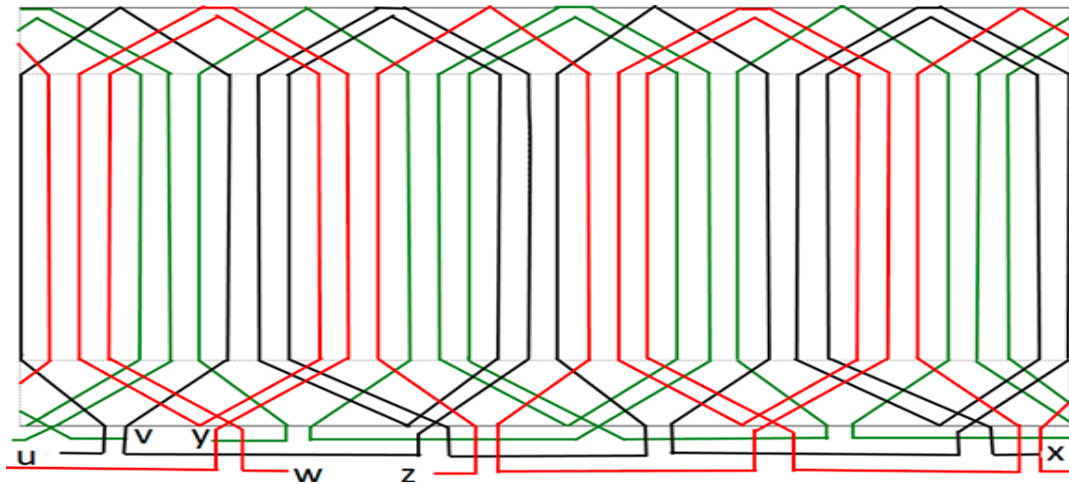


Figure III-5 Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de toutes les bobines.

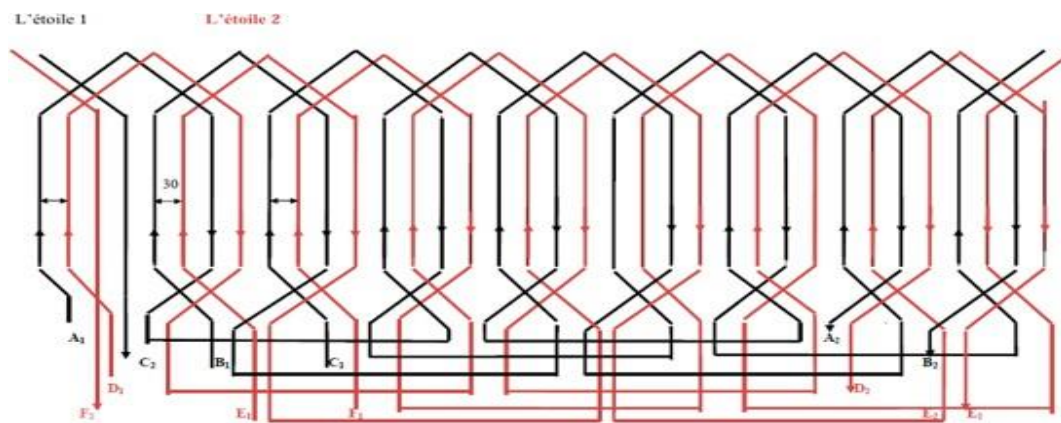


Figure III-6 Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de l'étoile 1 et l'étoile 2.

✓ Le bobinage de la MASDE comprend deux enroulements triphasés identiques, décalés de 30° , et connectés en étoile. Ils sont placés dans le même stator pour produire un champ magnétique plus régulier et performant

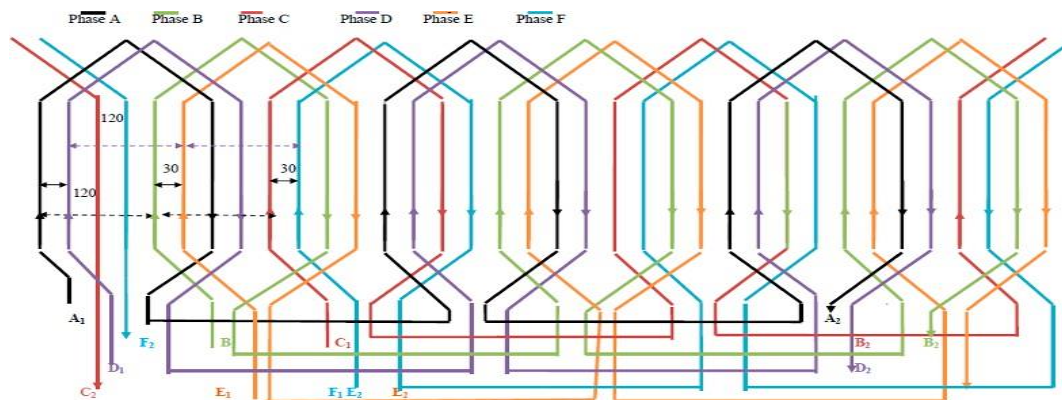


Figure III-7 Schéma complet de l'enroulement montrant les connexions des phases.

III.4. Les contraintes et les étapes impliqués dans la conception d'enroulement six phases :

Les contraintes présent en compte dans la conception du schéma d'enroulement à 6 phases, sont :

- ❖ La principale limitation est de maintenir les mêmes valeurs de couple de sortie et de densité de flux maximale le long de l'entrefer de la machine triphasée 6 phases.
- ❖ La puissance nominale de la machine 6 phases est également maintenue à la même valeur que la machine triphasée.
- ❖ Selon les données de conception disponibles pour la machine triphasée ci-dessus, les équations de couple et d'intensité sont utilisées ici pour déterminer le nombre réel de tours nécessaires pour concevoir une machine double étoile.
- ❖ Les enroulements sont conçus avec le schéma de reconstruction d'enroulement décrit ci-dessus à l'esprit, chacun contenant les déphasages requis entre les différentes phases A, B, C, D, E et F

III.5. Conception de l'enroulement statorique :

Dans le cas du moteur à 36 encoches, 6 pôles et 6 phases, le nombre d'encoche par pôle par phase est égal à 1, puisque la conception d'enroulement statorique est disposée à simple couche, le nombre total de bobine par phase est 3 qui est égalent la moitié du nombre de bobine par phase de la machine triphasée. Chaque phase contient 464 spires, alors, chaque bobine comporte 154 spires [34][24].

Présentation de l'étoile (1) et l'étoile (2) est montrée dans le tableau suivante :

Phase A	Phase B	Phase C	Phase D	Phase E	Phase F
1 → 7 ↙	5 → 11 ↙	9 → 15 ↙	2 → 8 ↙	6 → 12 ↙	10 → 16 ↙
13 → 19 ↙	17 → 23 ↙	21 → 27 ↙	14 → 20 ↙	18 → 24 ↙	22 → 28 ↙
25 → 30 ↙	29 → 35 ↙	33 → 39 ↙	26 → 32 ↙	30 → 36 ↙	34 → 4 ↙

Tableau III-1 Configuration d'enroulement double étoile.

III.6 Résultats de simulation :

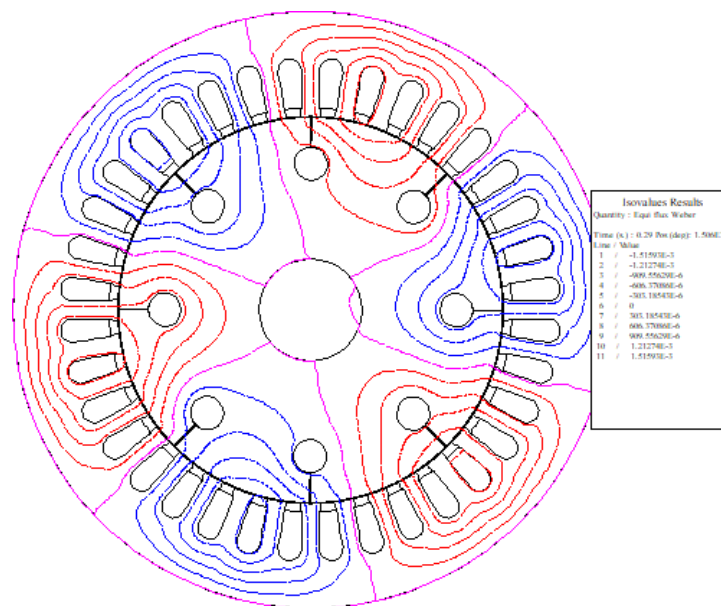
Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle développé sous Flux2D afin d'analyser le comportement de la machine en régime transitoire et en régime permanent, aussi bien dans des conditions normales de fonctionnement qu'en présence d'un défaut. Le défaut étudié est un court-circuit entre les bobines 3 et 4 de la première phase (voir figure II.7). Ce court-circuit est simulé à l'aide d'un interrupteur qui se ferme à l'instant $t = 0,3 \text{ s}$, après que la machine a atteint son régime permanent.

Nous présentons les différentes grandeurs caractéristiques de la machine (grandeurs locales, électriques et mécaniques) et analysons l'impact de ce défaut sur ses performances globales.

Les simulations de la MASDE sur Flux2d ont donné les résultats suivants :

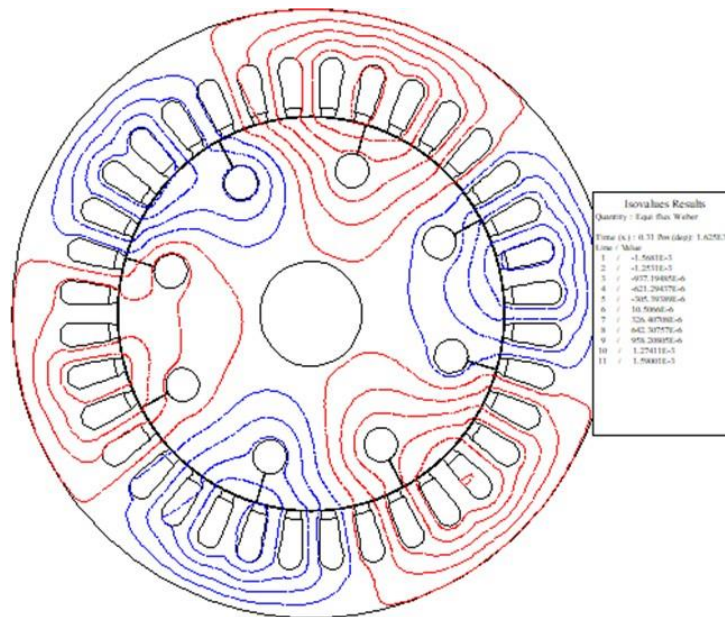
III.6.1. Les grandeurs locales :

Les lignes de champs : Avant/Après le défaut



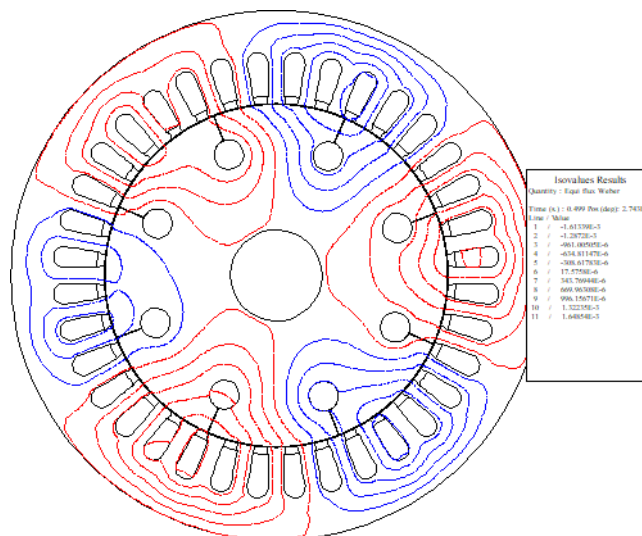
Avant $t=0.29$

✓ Les lignes de champ (rouges et bleues) présentent une distribution uniforme et symétrique dans l'ensemble de la machine, donc à $t = 0,29\text{s}$, la machine fonctionne en régime stable et symétrique, sans signe visible de défaut.



Après t =0.31s

✓ À l’instant $t = 0,31$ s, on observe clairement les effets du défaut rotorique sur le champ magnétique. La rupture de symétrie et les irrégularités dans la répartition des lignes de champ confirment une perturbation électromagnétique significative dans la machine.

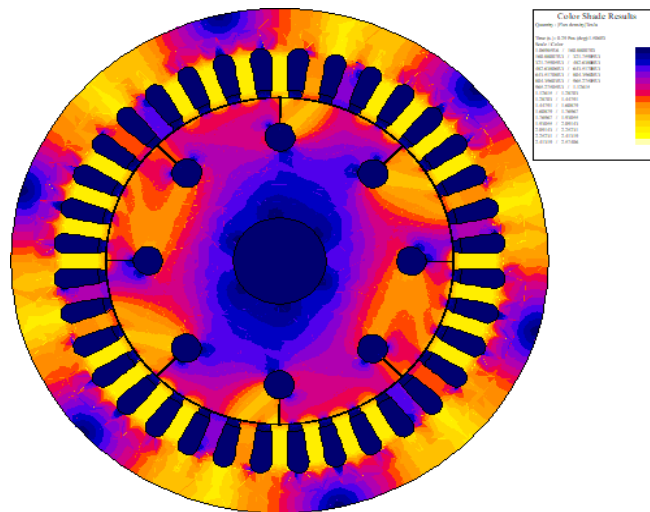


Après t=0.499s

Figure III-8 Cartes des lignes de champ.

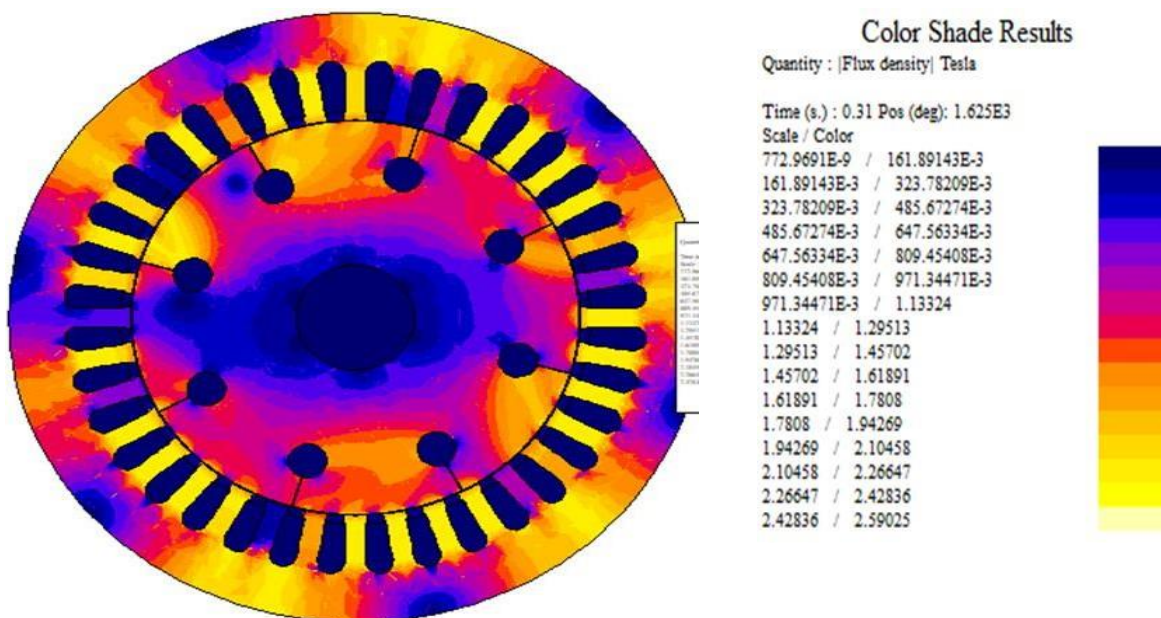
La figure III.8 montre les lignes de champ magnétique à l’instant $t = 0,499$ s. On observe une bonne distribution du flux dans les dents du stator et du rotor, avec une symétrie relative, indiquant un fonctionnement globalement équilibré. Les lignes rouges et bleues représentent respectivement les zones de flux positif et négatif. Cela permet de visualiser la circulation du champ magnétique à travers l’entrefer et les encoches

L'induction magnétique : Avant/Après le défaut



Avant $t=0.29s$

✓ Image à $t = 0.29 s$, la distribution de l'induction magnétique montre des zones très intenses (du violet au jaune) situées principalement dans le circuit magnétique ce qui indique un fort flux magnétique dans ces régions. Les couleurs dégradées (en bleu foncé/noir) représentent l'intensité décroissante de l'induction magnétique dans les zones conductrices et dans l'entrefer.

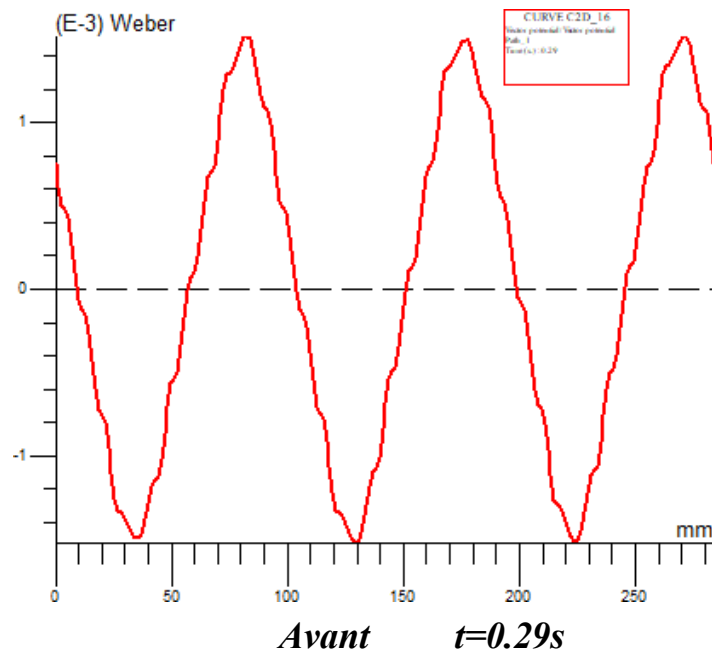


Après $t=0.31s$

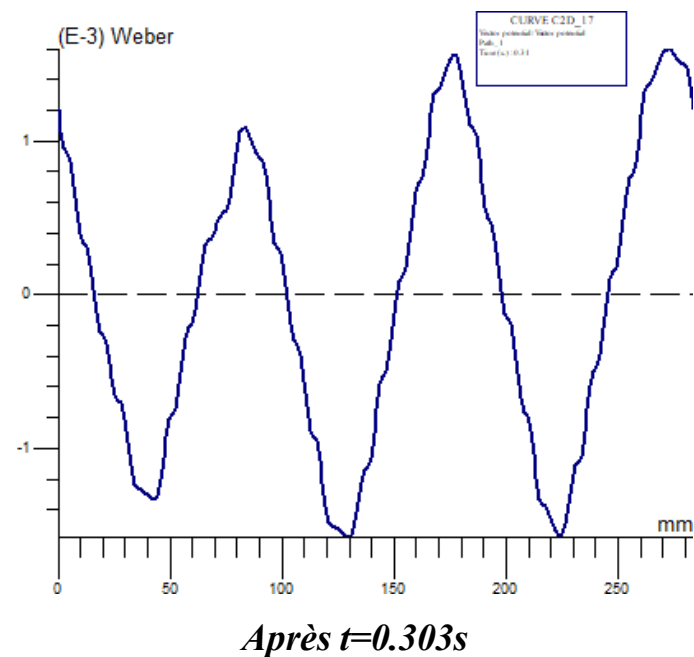
Figure III-9 L'induction magnétique.

✓ Image à $t = 0.31s$: À ce moment légèrement plus tardif (après le défaut), la forme générale de la distribution magnétique est similaire, mais on note une légère augmentation de l'induction.

Le flux dans l'entrefer : Avant/Après le défaut



à $t = 0,29s$: Le flux dans l'entrefer présente une forme sinusoïdale avec une amplitude maximale bien définie, indiquant un fonctionnement normal et équilibré de la machine asynchrone avant apparition de tout défaut.



à $t = 0,31s$: Une légère distorsion commence à apparaître dans le profil du flux. L'amplitude reste similaire, mais la forme n'est plus parfaitement sinusoïdale.

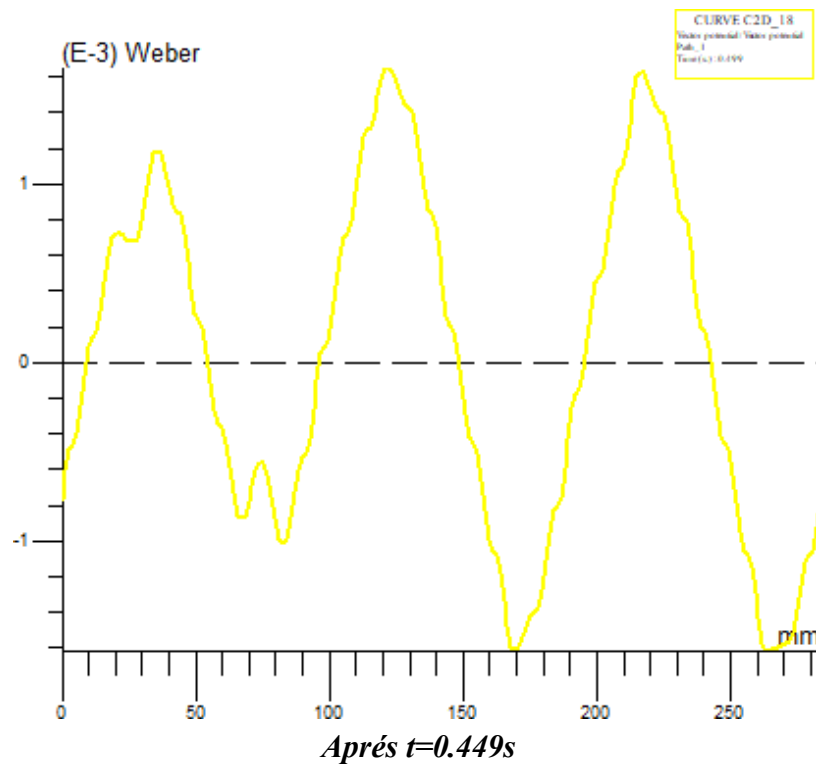


Figure III-10 Flux magnétique dans l'entrefer.

À $t = 0,499s$: Le flux est clairement déformé et présente des ondulations irrégulières. Cette déformation importante est typique d'un défaut avancé dans la machine. L'asymétrie et la présence d'harmoniques perturbent la distribution normale du champ magnétique dans l'entrefer.

✓ L'analyse des courbes du flux magnétique dans l'entrefer à différents instants montre une dégradation progressive du profil magnétique, ce qui confirme la présence d'un défaut significatif affectant la répartition du champ magnétique dans l'entrefer. Cette évolution temporelle met en évidence l'importance de la surveillance du flux pour la détection précoce des défauts.

III.6.2. Les Grandeurs mécaniques :

Le transitoire de la vitesse de rotation et le couple électromagnétique développés par la machine sont représentés sur les figures III.11 et III.12. Les allures de ces grandeurs sont similaires à celles de la machine asynchrone classique, avec un temps de démarrage important et des fluctuations de couple plus importantes. Ceci s'explique par le fait que la MASDE n'est pas conçue pour fonctionner avec un seul bobinage.

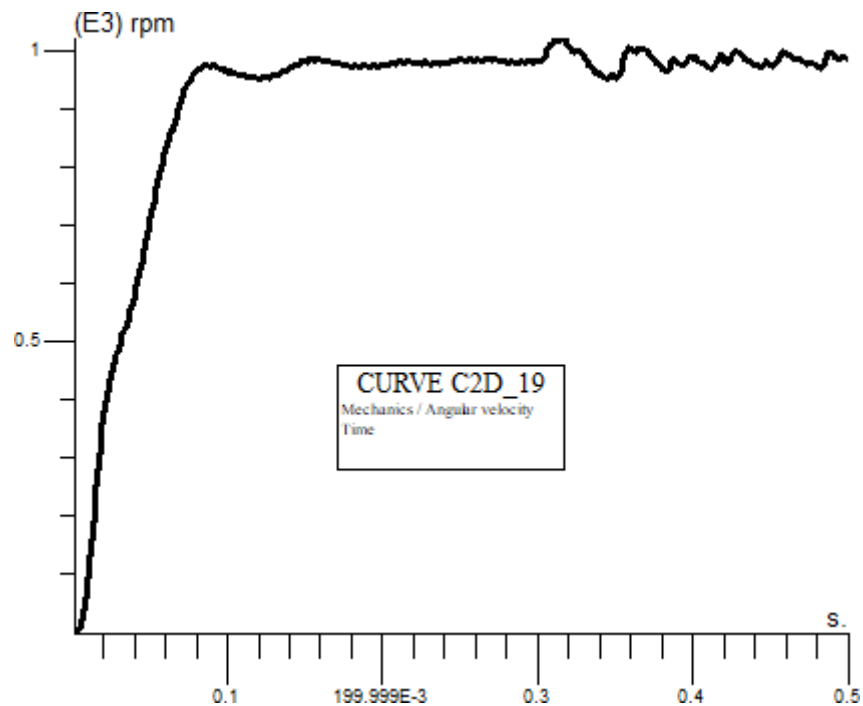


Figure III-11 Vitesse de rotation.

La courbe dans la figure (III.11) montre une évolution typique d'une vitesse de rotation au cours du temps. La vitesse de rotation commence à zéro et augmente rapidement jusqu'à environ, mais À partir de **0.3 s**, la courbe présente des variations plus marquées donc on ce cas il y a un défaut.

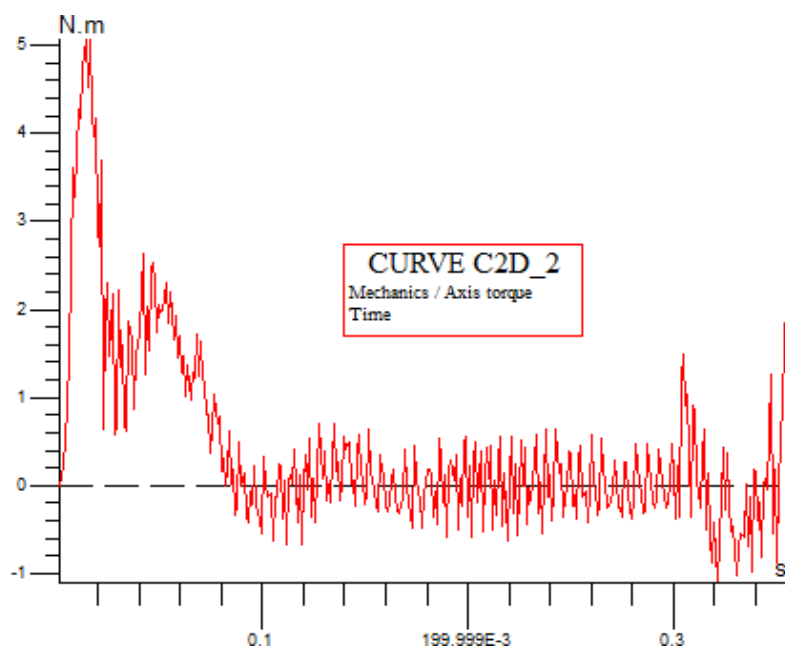


Figure III-12 Couple Électromagnétique.

Cette figure (III.12) représente l'évolution du couple électromagnétique (en N.m) en fonction du temps. Le couple atteint une valeur de plus de **5 N.m**, au début après le pic le couple chute progressivement, indiquant que le moteur stabilise son effort pour atteindre le régime permanent entre **0.1 s et 0.3 s**, le couple fluctue autour d'une valeur moyenne faible (environ 0,5 N.m).

III.6.3. Grandeurs électriques :

L'analyse de ces courbes permet de mieux comprendre le comportement de la MASDE. On observe notamment que les courants présentent une forme typique d'un régime transitoire suivi d'un régime permanent.

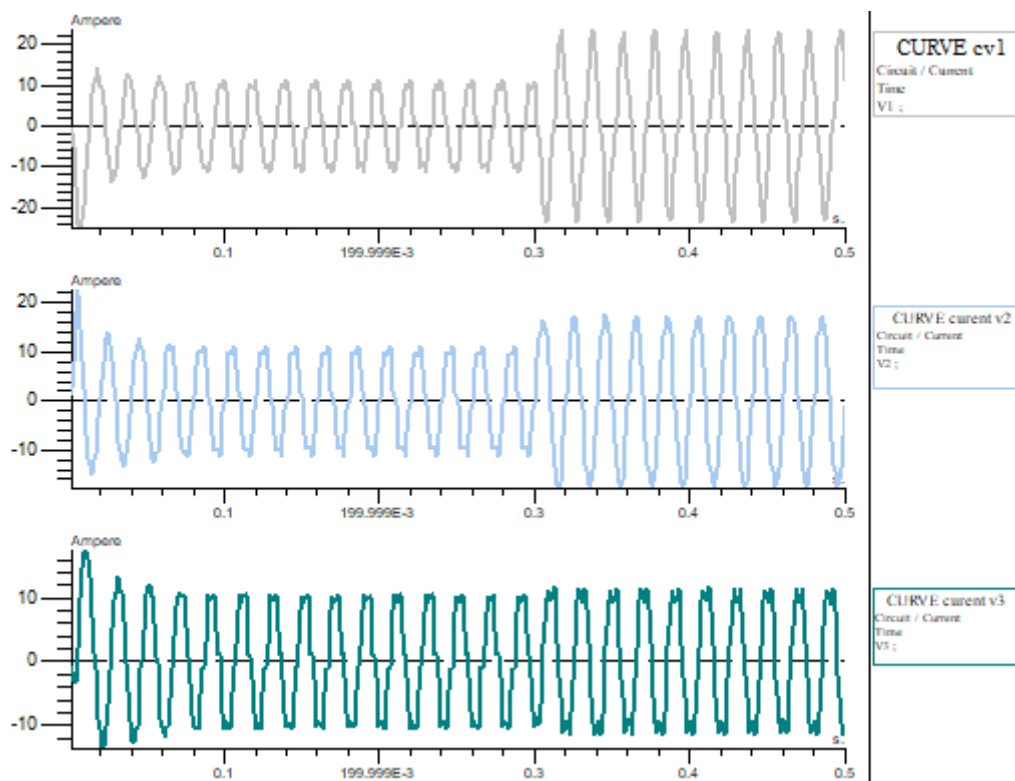


Figure III-13 Les Courants statorique V1, V2, V3.

✓ La figure III.13 illustre les courants statoriques de la première étoile. Avant l'instant $t=0,3$ s, les courants sont bien formés, traduisant un bon fonctionnement électromagnétique de la MASDE après une phase transitoire de démarrage classique. Le système atteint rapidement un régime permanent, sans perturbations majeures, avec des courants stabilisés autour de 10 A.

Après l'apparition du défaut à $t=0,3$ s, on observe une augmentation significative des courants dans les phases 1 et 2, atteignant jusqu'à 20 A, ainsi qu'une légère hausse dans la phase 3.

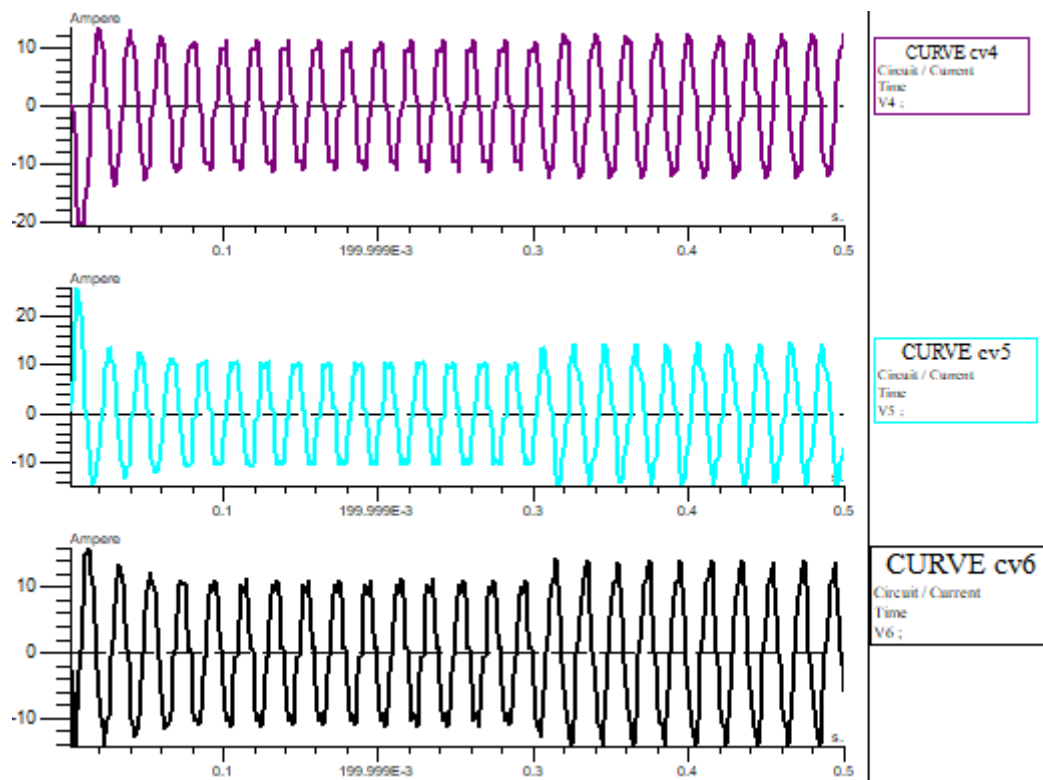


Figure III-14 : Les Courants statorique V4, V5, V6.

✓ De même pour la deuxième étoile, avant l'instant $t=0,3$ s, les courants sont bien formés. Le système atteint rapidement un régime permanent, sans perturbations majeures, avec des courants stabilisés autour de 10 A.

Après l'apparition du défaut à $t=0,3$ s, on observe une légère augmentation.

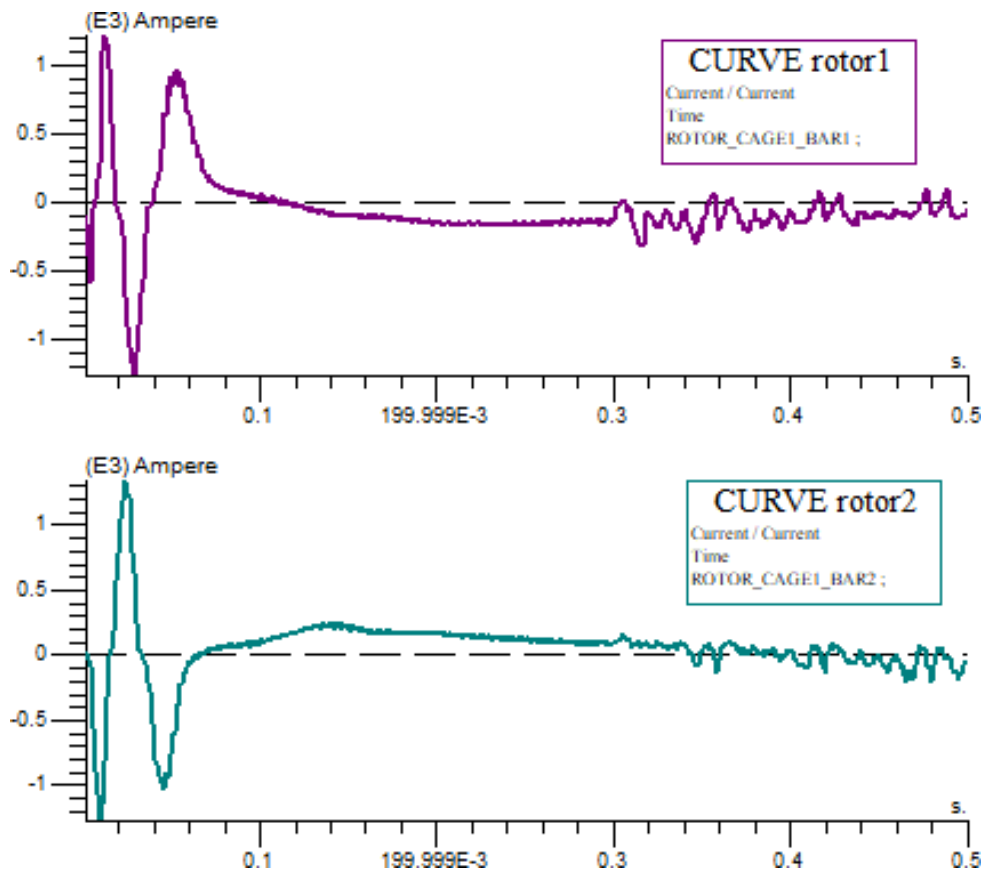


Figure III-15 Les Courant rotorique.

✓ L'analyse des courants circulant dans les barres du rotor montre qu'après une phase transitoire, durant laquelle les courants atteignent une valeur maximale de 1000 A, ceux-ci diminuent progressivement pour se stabiliser, en régime permanent, entre 100 A et 200 A. Après l'apparition du défaut à l'instant $t=0,3$ s, on observe des fluctuations significatives dans les valeurs de ces courants

III.10. Conclusion :

Ce chapitre a présenté la modélisation et la simulation de la machine asynchrone double étoile (MASDE) à l'aide du logiciel Flux2D. En régime de fonctionnement normal, la machine présente un comportement stable et équilibré. L'introduction d'un défaut, tel qu'un court-circuit entre deux bobines, engendre des perturbations visibles dans le champ magnétique, le couple électromagnétique, les courants et la vitesse de rotation. Cette étude a permis de simuler et d'analyser le comportement de la MASDE en conditions normales et dégradées, mettant en évidence l'intérêt d'une modélisation fine pour la détection des défauts internes.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'impact des défauts sur les performances d'une machine asynchrone à double étoile (MASDE). Ce travail s'est articulé autour de trois axes principaux : l'identification des défauts potentiels, la modélisation de la machine, et la simulation de son comportement en conditions normales et dégradées.

Dans le premier chapitre, une revue des différents types de défauts susceptibles d'affecter la MASDE a été réalisée. Ces défauts, qu'ils soient d'origine mécanique ou électrique, peuvent altérer significativement le fonctionnement de la machine. Les principales méthodes de diagnostic ont été présentées, mettant en lumière leur pertinence pour la détection précoce de ces anomalies.

Dans le deuxième chapitre, un modèle mathématique précis de la machine a été développé en s'appuyant sur la méthode des éléments finis. Cette approche, implémentée dans le logiciel Flux2D, permet une analyse détaillée des interactions électromagnétiques, mécaniques et thermiques au sein de la MASDE. Ce modèle constitue un outil fondamental pour simuler le comportement de la machine dans divers scénarios de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, la simulation du fonctionnement de la MASDE a permis de comparer les régimes normal et dégradé, notamment en cas de court-circuit entre deux bobines. Les résultats obtenus ont mis en évidence les effets notables de ce type de défaut sur le champ magnétique, le couple électromagnétique, les courants statoriques et la vitesse de rotation. Ces perturbations démontrent l'importance d'une modélisation fine pour anticiper et diagnostiquer les défauts internes.

Ainsi, cette étude confirme que l'analyse par modélisation et simulation constitue une approche pertinente pour évaluer l'impact des défauts sur la MASDE. Elle ouvre également des perspectives pour le développement de stratégies de surveillance et de maintenance prédictive adaptées à ce type de machine.

Référence

- [1] Djaborebbi Amina "étude et commande d'machine Asynchrone double étoile " Thème Master académique Ouargla 26/06/2013.
- [2] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, Modélisation des machines électriques, Presses de l'Uni- vérité de Batna, Algérie, 1997.
- [3] Hocine Amimeur Mémoire Magister en Electrotechnique " Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement " 28 /05 / 2008.
- [04] D. Hadiouche, L. Baghli, A. Rezzoug, "Space-vector PWM techniques for dual three-phase AC machine: analysis, performance evaluation, and DSP implementation," IEEE Trans on Indus Appl., vol. 42, no. 4, pp. 1112–1122, July/August 2006.
- [05] BENTOUHAMI LARAF'' Etude des performances d'un moteur asynchrone à cage double étoile'' Mémoire de Projet de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme de Master en électronique, 2021
- [6] E. A. Klingshirn, "High phase order induction motors—Part I— Description and theoretical consideration," IEEE Trans Pow App Syst., vol. PAS–102, no. 1, pp. 47–53, Jan 1983.
- [7] G. K. Singh, "Multi-phase induction machine drive research—a survey," Electric Power System Research., pp. 139—47, vol. 61, 2002.
- [08] D. Hadiouche, ''contribution {l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure'', Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1., soutenue 20 décembre 2001.
- [9] L. Benalia, « Commande en tension des moteurs à inductions double alimentes », thèse de doctorat, Université de Batna 2010.
- [10] HADJOUTI Yassine & HAMBLI Ali, « Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques », Mémoire de master, bouira.

- [11] G. Barakat « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", Revue Internationale de Génie Electrique (RIGE), 2005.
- [12] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel cage induction motors" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.
- [13] Kercha Safia et Goubi Wissam " Etude et modélisation des machines électriques double étoile" Thème Master académique. Université kasdi merbah Ouargla 27/06/2013.
- [14] Elkheir Merabet Mémoire de Magister en Electrotechnique "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile", 04 /06 / 2008.
- [15] Boussag, A., & Essadiq, M. (2018). *Détection de défauts de court-circuit entre spires statoriques d'une machine synchrone à aimants permanents* (Mémoire de Master). Université Mohamed Boudiaf – M'sila
- [16] B. Vaseghi : ' Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires : Modélisation – Réduction du courant de défaut ', Thèse de doctorat de l'Université de Nancy, 3 décembre 2009.
- [17] T. Boumegoura « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon 2001
- [18] V. Kogan & B. Nindra. "Investigation of high voltage stator winding vibrations in full-scale slot model". In Electrical Insulation Conférence, pages 155-166, Sept.1997.
- [19] M. OUADAH. "Modélisation et Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones à Cage D'écureuil par L'approche des Circuits Multiples Couplés Magnétiquement en Tenant Compte des Harmoniques D'espace «, Thèse de magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger, Décembre 2008.
- [20] A. H. Bonnett, "Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures", IEEE
- [21] M. BENBORDI Bachir, « DIAGNOSTIC DE DEFAUTS AU ROTOR PAR L'ANALYSE DE LA SIGNATURE DU COURANT MOTEUR » thèse de 2005 Transactions on Industrie Applications, vol. 36, no. 5, Septembre/Octobre 2000.

- [22] Y. OUAZIR ‘‘ Contribution à la modélisation électromagnétique des machines à induction’’ Thèse doctorat d’état, ENP Alger, 2006
- [23] E. Durand, ‘‘Magnétostatique’’, Edition Masson, Paris, 1968.
- [24] F. J. POZA LOBO ‘‘Modélisation, conception et commande d’une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable ‘‘ Thèse de Doctorat. Ins Nat. Poly Grenoble. 2003.
- [25] Flux 2D, version 10.4, ‘‘Application 2d et 3d, Volume 01 : Les Nouveautés, Flux 2D et son Environnement’’ Cedrat, Avril 2008.
- [26] Flux2D, Version 10.4, ‘‘Guide d’utilisation, volume 01 : Outils généraux, Géométrie et maillage’’ Cedrat, Aout 2010.
- [27] HAMADOU Adil et NESSISSEN Abdelkader, *Modélisation numérique d’un moteur asynchrone à cage d’écureuil*, Mémoire de Projet de Fin d’Études pour l’obtention du diplôme de Master en Génie électrique, 2015
- [28] Flux2D, Version 10.4 : ‘‘Guide d’utilisation volume 2 Description physique, Résolution et Exploitation’’ Cedrat Aout 2010.
- [29] Flux2D, Version 9.2 : ‘‘ Induction Machine Calculations in Flux2D’’ Cédrat 2006.
- [30] Flux-2D (version 7.6) commercialisée par Cédrat, Zirst, 38 240 Meylan, France.
- [31] FLUX2D®, « application induction motor technical paper », Cedrat, May 2006.
- [32] G. DEDIER « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.
- [33] K. Marouani, F. Khoucha, A. Kheloui, L. Baghli and Hadiouche : « Study and simulation of direct torque control of double-star induction Motor drive », UERElectrotechnique, EMP, BP17-16111-Bordj El-Bahri, Algiers, Algeria, GREEN, Vandoeuvreles- Nancy, Cedex, France
- [34] E. Durand, ‘‘Magnétostatique’’, Edition Masson, Paris, 1968.

Annexe A

Paramètre de la MASDE :

Nombre d'encoches $N_s = 36$ encoches ;

Nombre de pôles = 4 pôles ;

Puissance nominale = 1.1 kW ;

La tension nominale 230-400 V ;

Le courant nominal par phase = 2.66 A ;

La vitesse nominale = 750 tr/min ;

Facteur de puissance $\cos\varphi = 0.81$;

Le diamètre intérieur de l'alésage du stator. $D_s = 89.98$ mm ;

L'enroulement statorique est un enroulement imbriqué à 64 spires par bobine et 6 bobines par phase ;

Le nombre de spires par phase $N_{ph} = 92$ spires ;

Langueur du circuit magnétique de stator $L = 65.81$ mm ;

Le nombre encoche par pôle par phase $q = 3$

Nombre de groupe = 2 pm = $4 \times 3 = 12$;

Nombre de bobine par phase = $N_s / 2m = 36 / 6 = 6$;

La surface de l'encoche $Q_S = 44.77$ mm²,

Largeur inférieure d'encoche $b_1 = 5.46$ mm ;

Largeur supérieure d'encoche $b_2 = 4.15$ mm ;

L'ouverture d'encoche $b_p = 3.23$ mm ;

La hauteur d'encoche $h_z = 13.51$ mm.

$D_r = 89.98$ mm;

Number of elements not evaluated: **0 %**

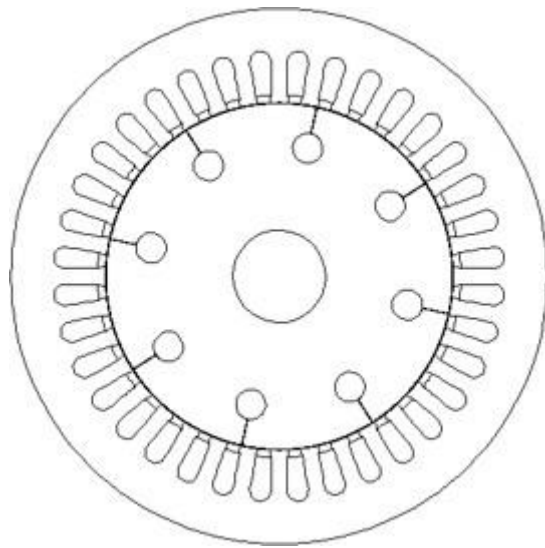
Number of excellent quality elements: **99.17 %**

Number of good quality elements: **0.72 %**

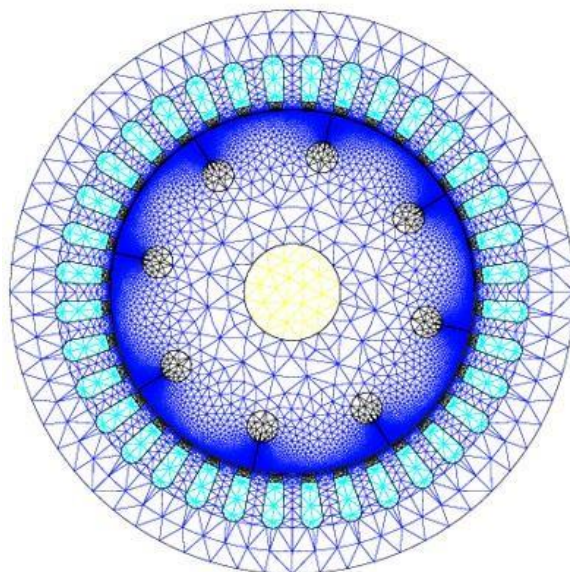
Number of average quality elements: **0.11 %**

Number of poor-quality elements :**0.01 %**

Number of anormal éléments : **0 %**



La géométrie de la machine



Maillage de la machine

ملخص

في هذا البحث، تم استخدام تقنية العناصر المحدودة بهدف تشخيص الأعطال في المحركات غير Flux-2D السنجابي. تُعدّ هذه التقنية، التي تم تنفيذها باستخدام برنامج المتزامنة ذات القفص وسيلة فعالة لتحليل الإشارات أحادية وثنائية الأبعاد بدقة عالية. وقد أثبتت فعاليتها في تحديد الأعطال الداخلية للمحرك قيد الدراسة. يهدف هذا العمل إلى نمذجة مختلف أنواع الأعطال في المحرك غير المتزامن باستخدام التحليل بالعناصر المحدودة، وهي طريقة تقترب كثيراً من ظروف التشغيل

ABSTRACT:

In this paper, the finite element method is employed for the diagnosis of faults in asynchronous squirrel-cage machines. This technique, implemented through the Flux 2D software, provides a highly accurate analysis of both unidimensional and bidimensional signals. It proves to be an effective approach for identifying various internal faults in the machine under study. The main objective of this work is to model different fault conditions in asynchronous machines using finite element analysis, a technique that closely replicates practical operating conditions.

RESUME :

Dans ce mémoire, nous avons eu recours à la méthode des éléments finis afin de diagnostiquer les défauts présents dans les machines asynchrones à cage d'écureuil. Cette approche, qui permet une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels via le logiciel Flux-2D, s'est révélée particulièrement efficace pour identifier les défauts de la machine étudiée. Le travail présenté consiste à modéliser les différents types de défauts en utilisant une modélisation par éléments finis, une méthode reconnue pour sa proximité avec les conditions réelles de fonctionnement.

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

