

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Génie Electrique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de

Magister en : Electrotechnique

Option : Electricité Industrielle

**Modélisation Des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic
Prise en Compte Adéquate du Circuit Magnétique**

Présenté par :

KHELIF Samia

(Ingénieur d'Etat en Electromécanique)

Soutenu publiquement le/..../2012

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------|-----------------------|--------------|------------|
| S.M MIMOUNE | Professeur | U. de Biskra | Président |
| S.E. ZOUZOU | Professeur | U. de Biskra | Rapporteur |
| A.GOLEA | Professeur | U. de Biskra | Examineur |
| D.E KHOUDJA | Maître de Conférences | U. de M'sila | Examineur |
| A. MENACER | Maître de Conférences | U. de Biskra | Examineur |

Remerciement

*Avant tout, je remercie **Dieu** tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permis d'arriver à ce stade là.*

Je remercie mes parents d'avoir été très proches de moi tout au long de la préparation de ce diplôme.

*Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur, **Mr : ZOUZOU Salah Eddine** (Professeur à l'université de Biskra), qui n'a ménagé aucun effort et qui travaille sans relâche avec moi, sa disponibilité, son aide efficace, les précieux conseils et les réflexions avisées qu'il m'a apportées. Il restera un modèle de rigueur scientifique et un exemple d'intégrité.*

Aussi l'ensemble du personnel de laboratoire LGEB.

*Je remercie **Mr : S.M MIMOUNE** (Professeur à l'université de Biskra) d'avoir accepté de présider ma soutenance de magistère, Je remercie également **Mr : GOLEA Amar** (Professeur à l'université de Biskra), **Mr : D.E. KOUDJA** (Maitre de Conférences à Uni. M'sila) et **Mr : A. MENACER** (Maitre de Conférences à Uni. Biskra) membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Un remerciement sincère à mes amis **NABIL .Gana, LAZHAR.B, MOHAMMED AOUICHAT.***

*J'exprime vivement ma gratitude et reconnaissance à **Mr : SAHRAOUI Mohamed** et **Mr Ghouggal Adel**, dont les conseils furent un guide vers la voie de la réussite.*

Enfin, je saisis cette occasion pour témoigner ma grande reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Modélisation Des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic

Prise en Compte Adéquate du Circuit Magnétique

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

La surveillance est un moyen pour garantir le bon fonctionnement d'une installation industrielle. Le diagnostic qui est une partie de la surveillance, a pour objectif de détecter et de localiser un défaut, d'une façon précoce, avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle.

La compréhension du fonctionnement avec et sans défaut, ainsi que la vérification des algorithmes de détection des défauts, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible.

Dans cette logique, nous proposons un modèle éléments finis, ce qui permettra la prise en compte du circuit magnétique dans le modèle de la machine et pour que nous adoptons une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques, une analyse spectrale du courant statorique a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier rapide afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres.

Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT, PSH, cassure de barre.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Liste des symboles utilisés..... | |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE-I- Problématique | |
| I.1 INTRODUCTION | 3 |
| I. 2 LES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 3 |
| I.2.1 Les défauts de roulements..... | 4 |
| I.2.2 Les défauts statoriques..... | 4 |
| I.2.3 Les défauts rotoriques..... | 4 |
| I.3 PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES..... | 5 |
| I.4 METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 6 |
| 1.4.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)..... | 6 |
| 1.4.2 Méthode des réseaux de perméances..... | 6 |
| 1.4.3 Méthode des éléments finis..... | 7 |
| I.5 METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES..... | 7 |
| I.5.1 L'estimation de paramètres physiques | 7 |
| I.5.2 L'estimation d'état | 8 |
| I.5.3 Traitement de signaux | 8 |
| I.6 PARAMETRES INDICATEURS DE DEFAUT | 9 |
| 1.6.1 Le flux magnétique axial de fuite..... | 9 |
| 1.6.2 Le courant statorique..... | 10 |
| 1.6.3 Les vibrations..... | 10 |
| 1.6.4 Le couple..... | 10 |
| 1.6.5 La température..... | 11 |
| I.7 SIGNATURES SPECTRALES POUR REVELER LE DEFAUT..... | 11 |
| I.7.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone | 11 |
| I.7.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts..... | 10 |
| I.7.2.1 Les défauts statoriques | 10 |
| I.7.2.2 Les défauts des barres rotoriques | 10 |
| I.7.2.3 Les défauts d'excentricité | 11 |
| I.7.2.4 Les défauts de roulements..... | 12 |
| I.8 CONCLUSION..... | 15 |

CHAPITRE-II Modèle éléments finis de la machine asynchrone

| | |
|--|----|
| II.1 INTRODUCTION..... | 16 |
| II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS..... | 16 |
| II.2.1 Formulations..... | 16 |
| II.2.1. Le modèle employé..... | 18 |
| II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF..... | 19 |
| II.4 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D..... | 20 |
| II.5CONSTRUCTION DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 22 |
| II.5.1 Les données de la machine étudiée | 22 |
| II.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D..... | 25 |
| II.6CONCLUSION..... | 31 |

CHAPITRE III Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

| | |
|---|----|
| III.1 INTRODUCTION | 32 |
| III.2 SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN MAGNETOTRANSITOIRE AVEC UNE VITESSE CONSTANTE (IMPOSEE) | 32 |
| III.3 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A VIDE | 36 |
| III.4 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN CHARGE | 40 |
| III.5 ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE..... | 43 |
| III.5.1 L'influence de la saturation..... | 44 |
| III.5.2 L'influence de fluctuation de la vitesse..... | 45 |
| III.5.3 L'influence de pas de calcul..... | 46 |
| III.6 CONCLUSION..... | 47 |

CHAPITRE IV Simulation de la machine asynchrone en présence des défauts

| | |
|---|----|
| IV.1 INTRODUCTION..... | 48 |
| IV.2 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES PERFORMANCES DE LA MACHINE..... | 48 |
| IV.3 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE | 51 |
| IV.4 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES COURANTS ROTORIQUES | 54 |

| | |
|--|----|
| IV.5 DETECTION DES DEFAUTS ROTORIQUE PAR L'ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE..... | 56 |
| IV.6 COCLUSION..... | 64 |
| <i>COCLUSION GENERALE</i> | 65 |

Liste des Symboles

| | |
|-----------------|--|
| Ω | : Domaine surfacique. |
| Γ | : Frontière de domaine Ω . |
| A | : Potentiel magnétique. |
| μ_0 | : Perméabilité magnétique de l'air. |
| H | : Champ magnétique. |
| B | : Induction magnétique. |
| B_r | : Induction radiale dans l'entrefer. |
| E | : Champ électrique. |
| D | : Induction électrique. |
| ε | : Permittivité électrique. |
| μ | : Perméabilité magnétique. |
| J | : Densité de courant uniforme. |
| ρ | : Charges électriques. |
| σ | : conductivité électrique. |
| j | : unité imaginaire. |
| t | : Temps. |
| MRID | : Maillage de diamètre intérieur du rotor. |
| MRBOT | : Maillage de bas des barres. |
| MRTOP | : Maillage de têtes des barres. |
| MAIRGAP | : Maillage de deux limites de l'entrefer. |
| MSTOP | : Maillage de têtes des encoches. |
| MSOD | : Maillage de diamètre extérieur du stator. |
| L_a, L_b, L_c | : Inductances de fuite des têtes des bobines statorique. |
| g | : Glissement. |
| ω_s | : Pulsation statorique. |
| p | : Nombre de paires de pôles. |
| N_b | : Nombre de barres rotoriques. |
| n_{os} | : Ordre des harmoniques de temps de la FMM. |
| n_d | : Ordre de l'excentricité. |
| f_s | : Fréquence d'alimentation. |
| f_r | : Fréquence rotorique. |
| f_{he} | : Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques. |

| | |
|-------------|---|
| f_{roul} | : Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements. |
| f_v | : Fréquence caractéristique de vibration. |
| f_{bille} | : Fréquence de vibration relative aux défauts de billes. |
| $f_{b.int}$ | : Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure. |
| $f_{b.ext}$ | : Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur. |
| f_b | : Fréquence caractéristique du défaut de barres. |
| f_{ecc} | : Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité. |
| f_{mix} | : Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte. |
| f_{st} | : Fréquence caractéristique du défaut statorique. |
| n_b | : Nombre d'éléments roulant du roulement. |
| θ | : L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement. |
| Db | : Le diamètre d'un élément roulant. |
| Dc | : La distance entre les centres des billes diamétralement opposées. |
| PSH | : Principal slots harmonics (Harmoniques d'encoches principales). |
| RSH | : Rotor slots harmonics (Harmoniques d'encoches rotoriques). |
| TH | : Time harmonics (Harmoniques de temps). |

Introduction générale

Dans tous les secteurs industriels, la sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement.

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au remarquable développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements [1].

Cependant, nul système n'est à l'abri d'une défaillance, par conséquent, ceci exige la mise en œuvre de systèmes de prévoyance et de détection de défauts de manière précoce. Aussi depuis quelques années, et grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique, il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des défauts dans le processus.

Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, quoi que robustes, ces machines subissent des perturbations auxquelles elles sont sensibles. Les principaux défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator (dus aux vieillissements des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections). Le premier type de défaut peut être détecté par l'observation des paramètres électriques du stator (inductances et résistances). Pour les défauts rotoriques, le modèle est plus complexe dans le sens que le défaut doit être ramené vers ou signalé par une grandeur mesurable extérieure au rotor lui-même. D'où l'importance que revêt un modèle dédié à la détection de défauts [2].

Grâce à sa grande flexibilité, la simulation est l'outil privilégié pour évaluer les performances et le comportement des systèmes sous des conditions extrêmes ou en mode de défaillance. Il faut noter que la simulation ne peut exister sans modélisation, en effet, la simulation n'est autre que la mise en application d'un modèle bien déterminé. En outre, l'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point de modèles de simulation les plus fiables possibles, représentant le fonctionnement défaillant de la machine. L'étape de modélisation s'avère donc indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître [3].

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

L'objectif de notre travail est la modélisation de la machine asynchrone, pour la simulation de la rupture de barres. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone, leurs origines, ainsi que leurs signatures spectrales sur le courant statoriques. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts, ainsi que les approches utilisées pour la modélisation de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage, afin de simuler les ruptures de barres, objectif de notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons dans un premier temps les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, sans défauts. Dans un second temps, à fin d'adopter une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques une analyse spectrale du courant statorique sera présentée.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'analyse spectral du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide) afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres. Nous montrerons par la suite l'influence du nombre de barres cassées sur ces harmoniques et sur la carte du champ de la machine.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire, pour montrer l'état d'avancement de notre travail et les perspectives d'avenir pour répondre aux problèmes posés, afin d'accomplir notre tâche de maintenance préventive.

I.1 INTRODUCTION

Le diagnostic fait partie de la surveillance, qui a pour objectif de trouver la cause d'anomalie. Celui des machines électriques devient de plus en plus une exigence car les chaînes de production nécessitent un fonctionnement sûr [4]. Ces dernières doivent être dotées de systèmes de production fiables parce que 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 la perte de production occasionnée et peut aussi mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, à l'échelle internationale, s'emploie à élaborer des méthodes efficaces de diagnostic[5].

I.2 LES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les défauts dans les entraînements électriques se répartissent en deux catégories : les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe) et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînements à l'extérieur de la machine (défauts dans la boîte de vitesse mécanique) notre étude est restreinte aux problèmes électriques qui se développent dans la machine asynchrone [6].

Une variété d'études statistiques par différents auteurs tels que [IEEE85, Thorsen95, Thorsen99] offrent une synthèse des défauts qui peuvent affecter la machine. Ces études sont présentées par la figure I.1 [12].

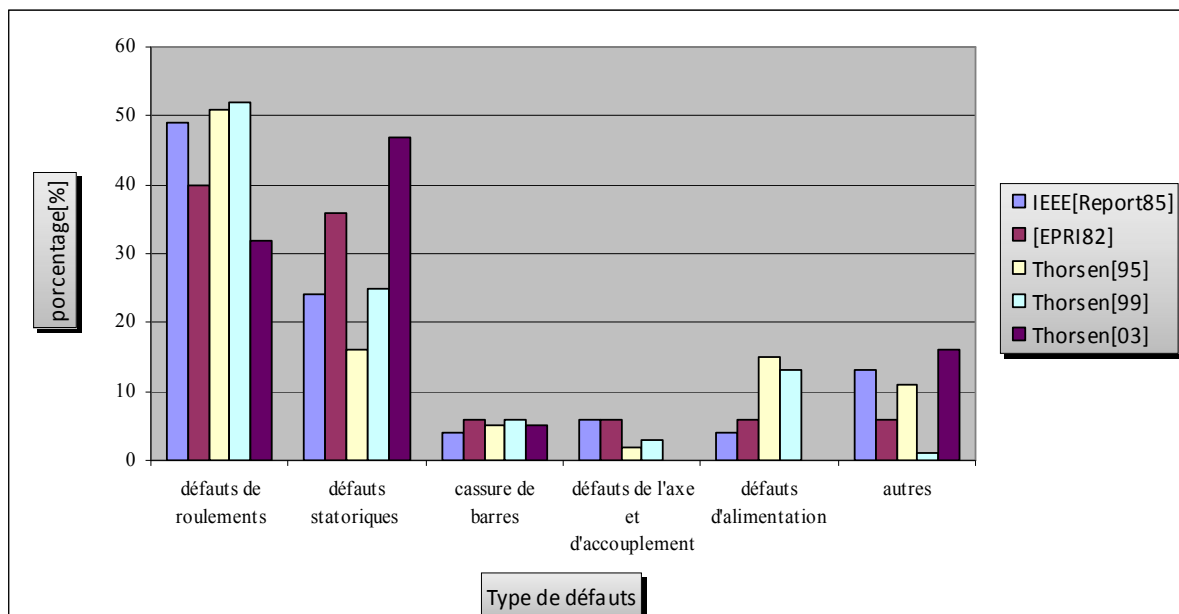


Figure I.1 statistiques des défauts de la machine asynchrone

Ces études statistiques démontrent que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres ce qui nous amène à axer notre étude sur les types de défauts les plus fréquents.

I.2.1 Les défauts de roulements

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériaux à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements, peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances.

I.2.2 Les défauts statoriques

Les courts-circuits entre spires ou bobines sont les défauts les plus nuisibles et les plus rencontrés au niveau du stator. Ils proviennent souvent d'une dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage. Le courant, dans les spires court-circuitées, atteint des valeurs énormes et l'augmentation de la température qui en suit entraîne la destruction de tous les isolants et par conséquent la défaillance complète de la machine.

I.2.3 Les défauts rotoriques

Les cassures de barres et de portion d'anneaux des cages sont très fréquentes, la détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts 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 conduisent à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse. Ce ci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [6].

I.3 PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES

Le problème du diagnostic revient essentiellement à un problème de connaissance sur le modèle déterministe entre la cause et l'effet ; plus précisément il faut trouver les variables déterministes des défauts, et puis on choisit les signatures qui indiquent « caractérisent » mieux ces défauts par le traitement du signal de ces variables. En outre, le diagnostic qu'il soit médical ou bien industriel est toujours basé sur la comparaison entre le comportement du procédé défaillant et du comportement sain (ou de son modèle) [5].

La comparaison nécessite des indicateurs, des symptômes révélateurs qui, une fois analysés, permettent d'abord de détecter le comportement défaillant, d'en déduire la fonction ou l'élément en dysfonctionnement (localiser), puis d'en déterminer la cause et enfin, si possible, d'y remédier[13].

Par ailleurs, le concept hautement stratégique de maintenance prédictive nécessite la connaissance des grandeurs significatives à mesurer pour avoir une image aussi proche que possible de l'état de la machine. Le système de suivi de la machine devrait pouvoir [14] :

- Interférer le moins possible avec le système (les grandeurs peuvent elles être mesurées en temps réel " on-line" ?, problème de sécurité, etc.) ;
- Etre capable de suivre plusieurs grandeurs ;
- Etre évolutif ;
- Etre pilotable à distance ;
- Stocker les données pour permettre une analyse tendancielle.

Quant à la stratégie générale adoptée pour le diagnostic, elle consiste à [14] :

- Recenser les défauts et les pannes pouvant se produire ;
- Trouver les grandeurs mesurables liées à ces défauts (grandeurs indicatrices) ;
- Choisir la méthode la plus proche des critères définis ci-dessus ;
- Définir les seuils "d'alarme " à partir desquels il faudra intervenir.

De ce qui précède, le problème à résoudre en terme de diagnostic consiste en la connaissance du comportement caractéristique du système en cas de défaut, au choix des méthodes de diagnostic adéquates à leur application pour le cas étudié, l'identification des valeurs indicatrices, et la conception de l'architecture du système de diagnostic et son implémentation [5].

I.4 METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

1.4.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans l'approche de modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et/ou le rotor, sont représentés par un circuit électrique équivalent, formé par une inductance en série avec une résistance [3].

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Ces inductances peuvent être calculées soit en utilisant les fonctions de bobinage, sachant que cela impose une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine, soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction dans l'entrefer. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques d'espace. Les harmoniques de temps créés par un réseau d'alimentation triphasé ou par un convertisseur statique ont été incorporés dans la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone [15].

Les hypothèses de cette approche sont : la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande devant 1), l'effet de peau est négligé, les barres rotoriques sont isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants entre-barres et leurs effets au sein même de la cage rotorique. De plus, les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligés.

1.4.2 Méthode des réseaux de perméances [3,15]

Le principe de la méthode des réseaux de perméances est la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine. Un circuit de perméances représentant la géométrie de la machine est réalisé, dont chaque perméance est calculée à partir d'un tube de flux. Ce circuit peut être assimilé à un circuit électrique habituel à la différence près que ce sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position angulaire du rotor.

C'est une représentation moins fine que les éléments finis, mais plus détaillée que la modélisation analytique. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une résolution

numérique rapide. Son inconvénient est que, si la paramétrisation des perméances des armatures statoriques et rotoriques est facile, La détermination de certaines perméances peut nécessiter une étude et un développement particulier, l'utilisation de la méthode des éléments finis par exemple, ce qui est notamment le cas des perméances d'entrefer.

1.4.3 Méthode des éléments finis [3,15]

Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation de méthode de calcul par éléments finis prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques. Dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine. A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique à savoir un échauffement local excessif dû à l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines aux barres cassées et une forte sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. De mêmes, la méthode des éléments finis sert à appréhender les impacts magnétique et thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spines dans les phases statoriques. La considération du comportement électromagnétique local permet d'avoir une modélisation plus fine du moteur. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

I.5 METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. On présente dans ce qui suit quelques unes qui concernent la détection des défauts machine plus précisément les défauts rotoriques.

I.5.1 L'estimation de paramètres physiques

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consistent à identifier les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance, puis d'extraire le paramètre physique du système à partir des lois de connaissance. Le point essentiel du diagnostic par identification paramétrique est le choix du modèle. De ce choix dépend le type de défaut que l'on

pourra détecter sur la machine. En effet pour détecter et localiser un défaut au stator ou au rotor, il faut que ce dysfonctionnement puisse être discriminé au niveau des paramètres physique estimés.

I.5.2 L'estimation d'état

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de PARK. Les techniques de détection de défauts les plus répandues en automatique reposent sur la génération de résidus à partir d'un modèle de fonctionnement sain. Différentes approches, que l'on peut classer sous le terme générique d'estimation d'état, ont été étudiées et évaluées par plusieurs méthodes :

- Banc d'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire, sur la base du modèle de Park.
- Observateur d'état à mode glissant.
- Génération de résidus par projection des équations du modèle de Park dans l'espace de parité.

En diagnostic, l'objectif est d'estimer les variables d'état du système à partir d'un modèle de comportement parallèle rebouclé de façon à s'affranchir essentiellement des problèmes d'initialisation des grandeurs d'état. Ces grandeurs estimées sont comparées aux grandeurs mesurées afin de détecter le dysfonctionnement dans le système surveillé.

I.5.3 Traitement de signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations,...etc.

En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

Toutes les méthodes de traitements de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans cinq groupes différents :

a)- Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

b)- Analyse cepstrale

Le cepstre est un anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages [15].

c)- Les méthodes de détection de fréquences connues

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition au le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

d)- Méthodes temps –fréquence

Les méthodes d'analyse temps –fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Plus généralement elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle il faut réaliser une analyse spectrale évolutive.

e)- Méthode temps-échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrées dans un signal.

I.6 PARAMETRES INDECATEURS DE DEFAUT

Parmi les signaux qui contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes du domaine et considérées comme paramètres indicateurs de défauts on a :

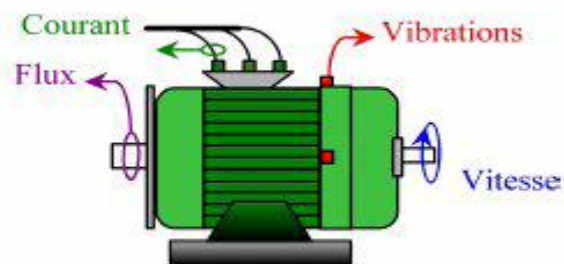


Figure I.2 les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones

1.6.1 Le flux magnétique axial de fuite

Les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés

d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques [1].

1.6.2 Le courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).

1.6.3 Les vibrations

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique [1]. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [16].

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P), la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [16].

1.6.4 Le couple

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [16].

1.6.5 La température

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. L'opérateur fait la part des choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies [1].

I.7 SIGNATURES SPECTRALES POUR REVELER LE DEFAUT

I.7.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone

Dans l'étude de la machine asynchrone, des hypothèses simplificatrices sont supposées, par exemple : la tension d'alimentation est purement sinusoïdale, l'entrefer est lisse, la perméabilité du fer est infinie et la FMM (ou bien l'induction B) dans l'entrefer est sinusoïdale...etc. Ces hypothèses simplificatrices sont acceptées pour étudier le principe de fonctionnement de la MAS, cependant, elles ne sont pas applicables pour les problèmes de diagnostic où se trouve une dissymétrie.

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoches rotoriques) ayant pour fréquences [1] :

$$f_{he} = \left[\frac{kN_b}{p} (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (I.1)$$

Avec f_s la fréquence de tension d'alimentation, ($n_{os} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), p le nombre de paires de pôles, N_b le nombre de barres rotoriques, n_{os} l'ordre des harmoniques de temps de la tension, et k un entier positif. Pour $k=1$ et $n_{os}=1$ on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoches principales' (PSH).

I.7.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts

I.7.2.1 Les défauts statoriques

Pour déceler les défauts de court-circuit, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [1,17] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \quad (\text{I.2})$$

Avec $k=1,3$ et $n=1,2,3,\dots(2p-1)$.

Le diagnostic des courts-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (I.2), du fait que cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [1,18].

Les harmoniques 150Hz, 250Hz... apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [1].

I.7.2.2 Les défauts des barres rotoriques

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence $-gf_s$ dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de $(1-2g)f_s$. Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de $(1+2g)f_s$. Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple [19], [20]. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par :

$$f_b = (1 \pm 2kg)f_s \quad (\text{I.3})$$

Avec $k=1,2,3,\dots$

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante [21] :

$$f_b = \left[\frac{k}{p/2} (1-g) \pm g \right] \cdot f_s \quad (\text{I.4})$$

Avec $\frac{k}{p/2} = 1, 3, 5, 7, \dots$

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences $2gf_s$ et $4gf_s \dots$ [19].

I.7.2.3 Les défauts d'excentricité

L'excentricité se répartit en deux catégories : statique et dynamique (voir la figure.I.3). L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique est caractérisée par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [5].

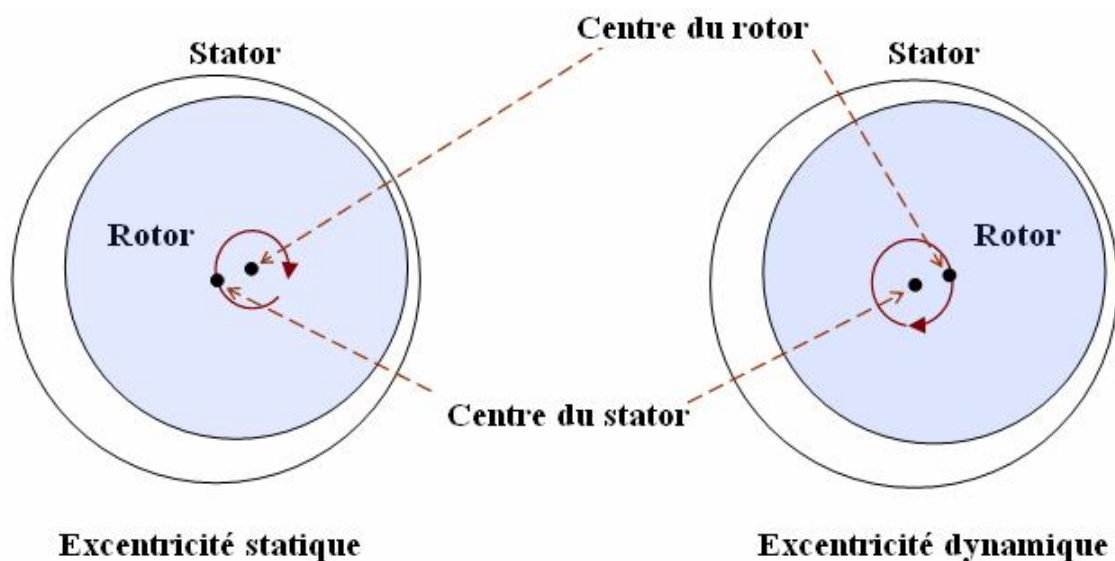


Figure I.3 Défaut de l'excentricité du rotor

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [1]. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences f_{ecc} données par [1,22]:

$$f_{ecc} = \left[\left(\frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I.5})$$

Avec k un entier et $n_{os} = 1,2,3...$ l'ordre de l'excentricité n_d est égal à 0 pour l'excentricité statique, et 1,2,3,... pour l'excentricité dynamique.

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps (excentricité mixte), apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [1,23] :

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (\text{I.6})$$

Tel que k est un entier positif. Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine tel que N_b , et c'est ce qui la rend parfois avantageuse.

Les défauts d'excentricité peuvent également être décelés par une analyse vibratoire, sachant que des composantes de hautes fréquences de vibration générées par l'excentricité sont données par une formule similaire à (I.5).

I.7.2.4 Les défauts de roulements

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [1,21] :

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (\text{I.7})$$

Avec $k=1,2,.....$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$ (figure I.4).

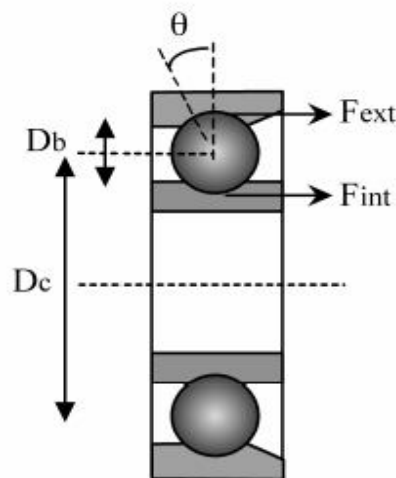


Figure I.4 Dimension du roulement à billes

a) -Défaut au niveau d'une bille :

$$f_{bille} = \frac{Dc}{Db} f_r \left[1 - \left(\frac{Db}{Dc} \cos \theta \right)^2 \right] \quad (I.8)$$

b) -Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 + \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (I.9)$$

c) -Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (I.10)$$

Tel que n_b est le nombre d'éléments roulants, Db le diamètre d'un élément roulant, Dc la distance entre les centres des billes diamétralement opposées et θ L'angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

I.8 CONCLUSION

Après quelques rappels sur les défaillances pouvant affecter la machine asynchrone dont les conséquences varient selon le type et le degré de sévérité du problème, nous nous sommes attardés sur une synthèse de différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts. En affectant à chaque défaut une signature spectrale qui lui est propre, la méthode de l'analyse des courants connue sous l'abréviation MCSA constitue un moyen performant susceptible de prévoir un défaut majeur et contribuant ainsi à promouvoir ce qui est appelé actuellement 'la maintenance prédictive' ou 'proactive'.

Il est également intéressant de remarquer que les modes de défaillances précédemment présentés impliquent toujours une modification de la topologie de la machine, pour ce faire, le développement d'un modèle dynamique, flexible et prenant en considération la topologie de la machine a dû être envisagé. Sa description fait l'objet du chapitre suivant.

II.1 INTRODUCTION

Il y a quelques années, les programmes de simulation faisaient intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court. A ce jour, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons passer de ces transformations, ce qui permet dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court circuit [15].

En effet, Pour étudier ces machines à induction et développer un modèle qui tient compte de la structure du rotor on fait appel soit à la théorie du champ électromagnétique (équations de Maxwell), ou à la théorie des circuits électriques (lois de Kirchhoff); ou bien à la méthode mixte combinant la théorie du champ électromagnétique et la théorie des circuits électriques [5].

Parmi les méthodes qui sont basées sur la théorie du champ électromagnétique on trouve la méthode des éléments finis. Cette dernière sera notre outil pour élaborer un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul d'où une grande souplesse d'utilisation[24].

II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

II.2.1 Formulations

Considérons un certain domaine (Ω) dans lequel un champ A , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [25] :

$$D(A) = F \quad (\text{II.1})$$

Où D est un opérateur différentiel et F est une fonction connue, appelée terme de source.

Pour spécifier entièrement le champ A , il faut tenir compte des conditions aux limites Γ du domaine (Ω)

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \quad (\text{II.2})$$

Dans cette équation G et H sont des fonctions connues sur les frontières Γ . Il en est donc de même de la fonction L. On peut distinguer deux cas particuliers importants :

1- Si la fonction G est nulle, on aura une condition de Dirichlet imposant la valeur du champ A sur la frontière Γ :

$$L(A) = HA \quad (\text{II.3})$$

2- Si la fonction H est nulle, on aura une condition de Neumann imposant la valeur de la dérivée du champ A par rapport à la normale extérieure à la frontière Γ :

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

La solution de l'équation (II.1) compte tenu des conditions aux limites (II.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine Ω en sous domaines élémentaire Ω_e dans lesquels le champ A est, habituellement, approximé par une fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ A dans le domaine Ω .

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré.

On les définit comme suit : [24]

- Les relations de couplage électromagnétique :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

- Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.7})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.8})$$

- la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.10})$$

- La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

Où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

\vec{B}_r : Induction rémanente des aimants (T)

\vec{J} : Densité de courant totale (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)

II.2.2 Le modèle employé

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

- **Le mode magnétostatique**

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.14})$$

La condition (II.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel \vec{A} telle que:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.15})$$

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

Par la substitution de (II.15) et (II.14) dans (II.12) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\text{rot} (\text{vrot} \vec{A}) = \vec{J} + \text{rot} (\text{v} \cdot \vec{B}_r) \quad (\text{II.16})$$

Où

$\nu = 1/\mu$: est la rélectivité magnétique.

- **Le mode magnétodynamique**

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps, Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simule en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + j\omega\sigma \vec{A} = \vec{J} \quad (\text{II.17})$$

$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique (rad.s^{-1}), j : unité imaginaire ($j^2 = -1$)

- **Le mode magnétique transitoire**

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

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{rot} \vec{B}_r + \sigma \text{grad} V = 0 \quad (\text{II.18})$$

II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF

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 assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [24].

Pour un élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II.19})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.20})$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel A_e est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine (Ω) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{II.21})$$

e : Numéro d'élément.

n_e : Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).

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 (Figure. II.1).

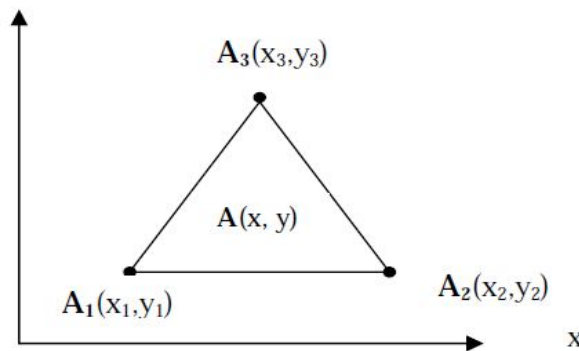


Figure II.1 fonction d'interpolation d'un élément

II.4 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D

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. 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. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

- Module **Construction (Preflux)** Il contient trois fonctions :

_ **(geometry & physics)** ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.

_ **(Circuit)** définit le schéma et les données du circuit électrique.

_ (**Materials database**) permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

- **Module Solving Process**

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

- **Module Analysis**

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

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure II.2.

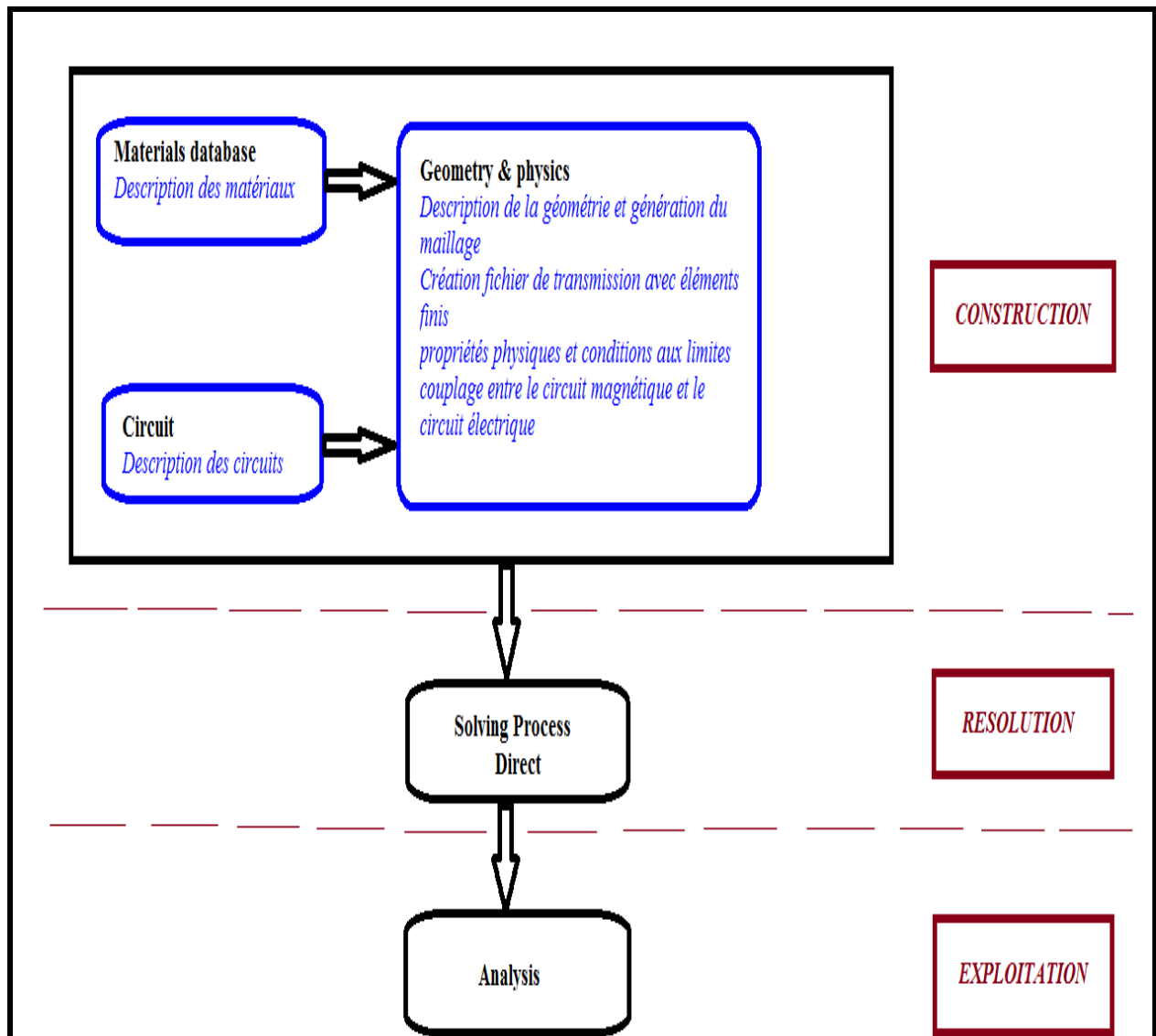


Figure II.2 l'enchaînement des programmes de Flux 2D

II.5 CONSTRUCTION DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

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 :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique.

Les autres hypothèses qu'on a considéré dans le développement de notre modèle sont :

- L'hystérésis et les pertes fer sont négligées.
- l'alimentation est purement sinusoïdale.
- Les courants entre-barres sont négligés.
- L'air autour de la machine et l'arbre ne sont pas modélisés pour cela la condition de *Dirichlet* ($A=0$) est appliqué sur les nœuds extérieurs du stator et celles intérieurs du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentes à ces deux surfaces.

II.5.1 Les données de la machine étudiée

La figure II.3 présente la géométrie de la machine étudiée et ses dimensions.

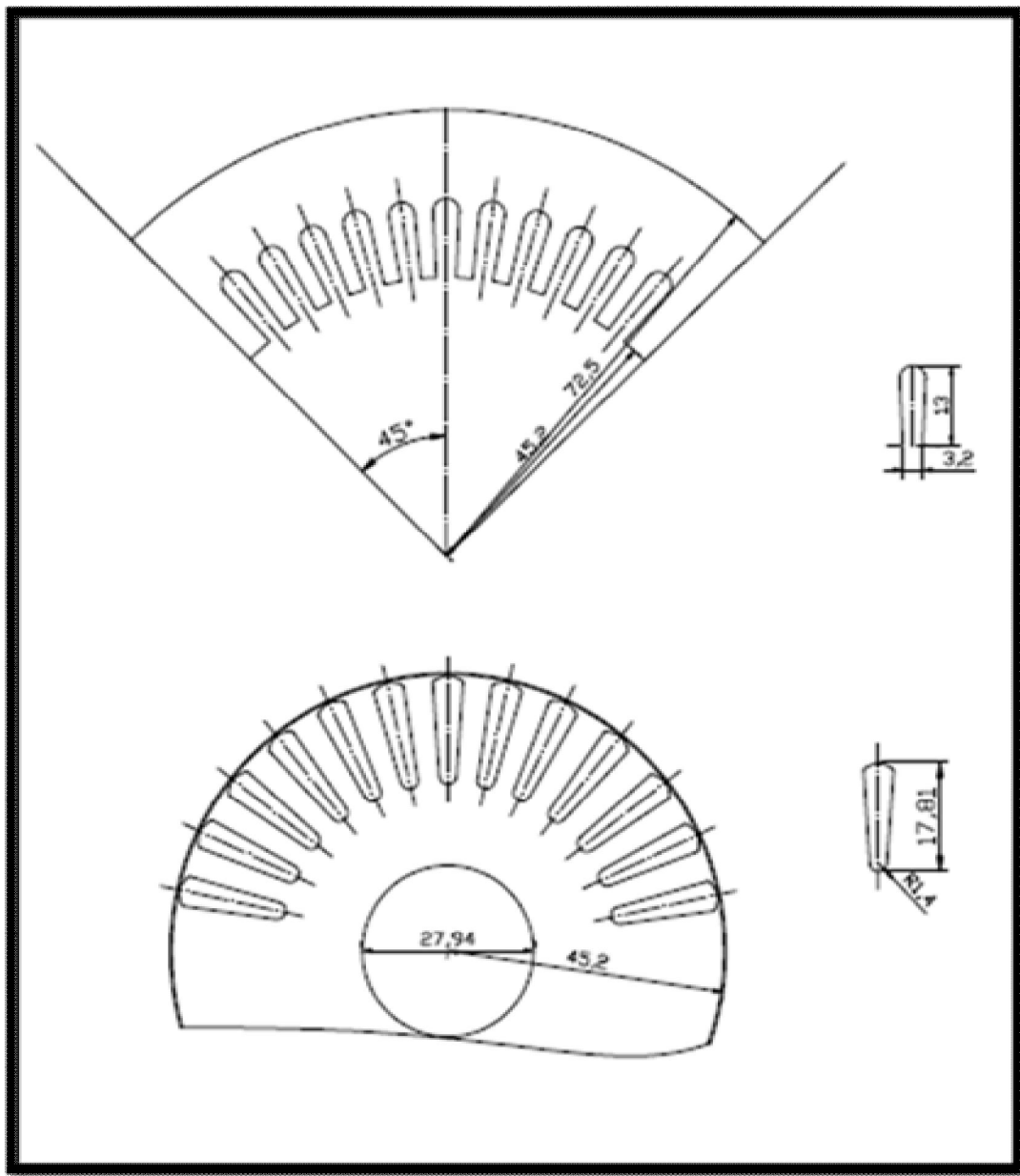


Figure II.3 les dimensions de la machine

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données au tableau II.1.

| Paramètres | | Valeurs |
|------------|-----------------------------|------------|
| MACHINE | Puissance | 1.1kW |
| | Tension | 400/230V |
| | Fréquence | 50Hz |
| | Vitesse nominale | 1425tr/min |
| | Nombre de paires de pôles | 2 |
| | Longueur du paquet de tôles | 55mm |

| | | |
|----------|----------------------------|---------|
| STATOR | Nombre d'encoches | 48 |
| | Nombre de spires par phase | 464 |
| | Connexion | Y |
| | Diamètre extérieur | 145mm |
| | Diamètre intérieur | 90.4mm |
| | Résistance par phase | 9.5Ω |
| ROTOR | Nombre d'encoches | 28 |
| | Diamètre extérieur | 89.8mm |
| | Diamètre intérieur | 27.94mm |
| ENTREFER | Epaisseur | 0.3mm |

Tableau II.1. Les caractéristiques de la machine

La figure II.4 illustre la répartition du bobinage dans les encoches statoriques, qui a $w_1=58$ tours par encoche.

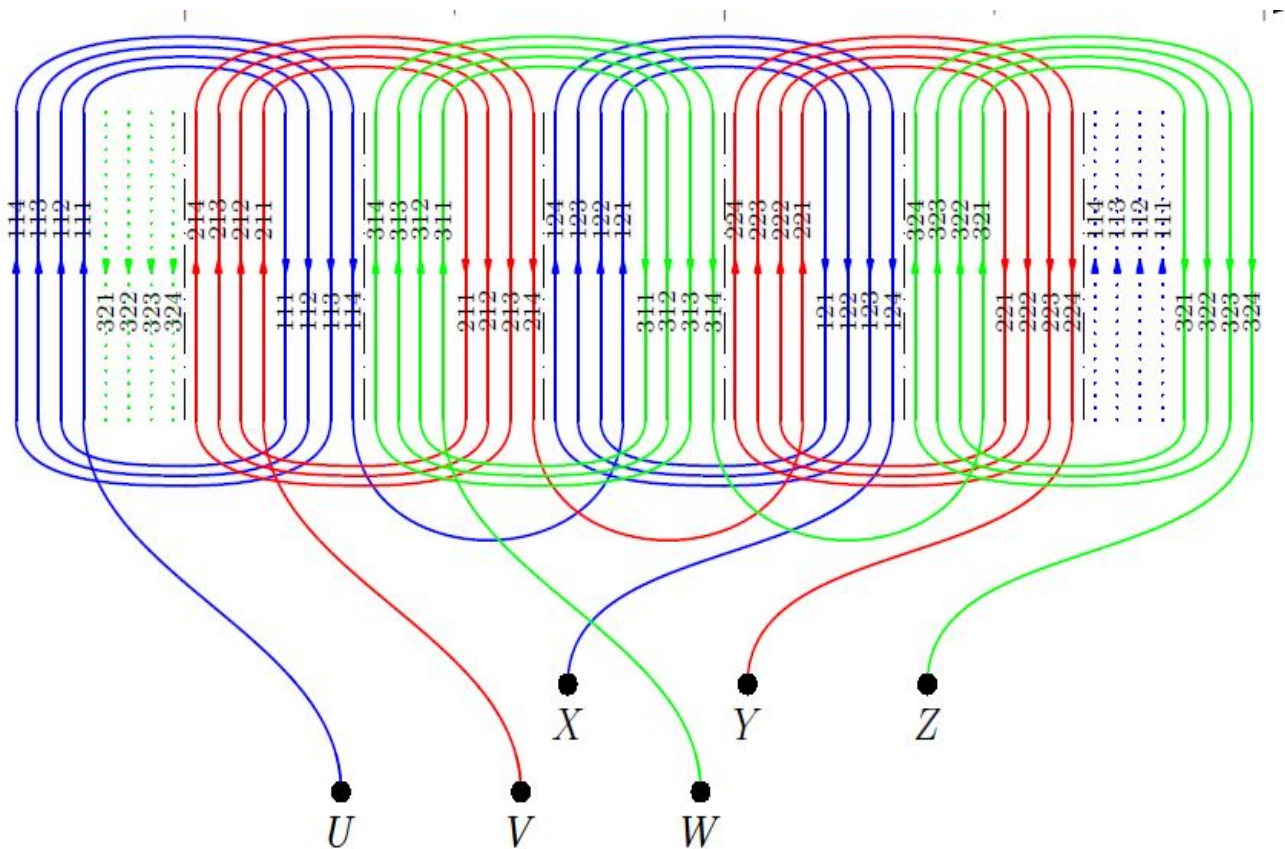


Figure II.4 Bobinage statorique

La figure II.5 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

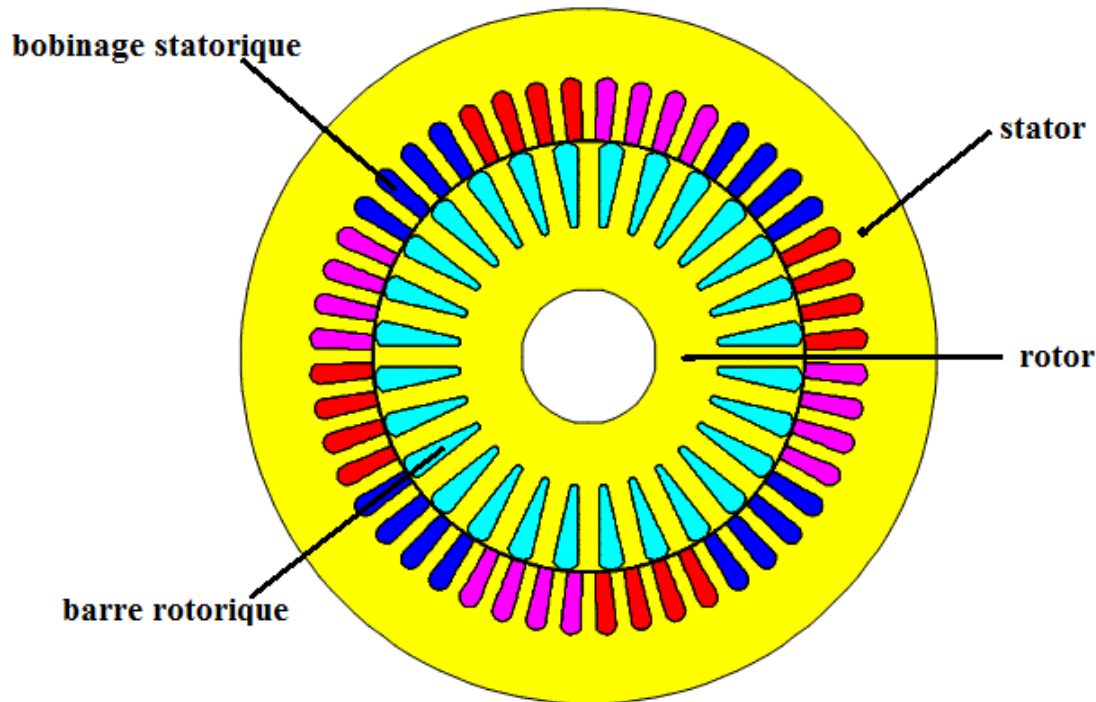


Figure II.5 circuit magnétique de la MAS

II.5.2 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 barre 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.

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.

Le tableau suivant présente la taille des éléments qu'on a choisi :

| Les points de maillage | La taille | Associés à |
|------------------------|-----------|------------------------------|
| MRID | 8mm | Diamètre intérieur du rotor |
| MRBOT | 2mm | bas des barres |
| MRTOP | 1.2mm | Têtes des barres |
| MAIRGAP | 0.5mm | Deux limites de l'entrefer |
| MSTOP | 2mm | Têtes des encoches |
| MSOD | 8mm | Diamètre extérieur du stator |

Tableau II.2 la taille des éléments du maillage

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 égale à $360/28$. 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 27 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 47fois 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 ci dessous présente la géométrie avec les points du maillage.

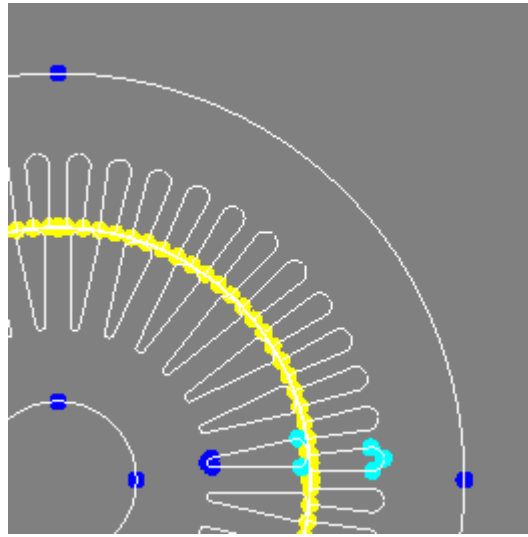


Figure II.6 les points de maillage

Jusqu'au 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 II.7 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

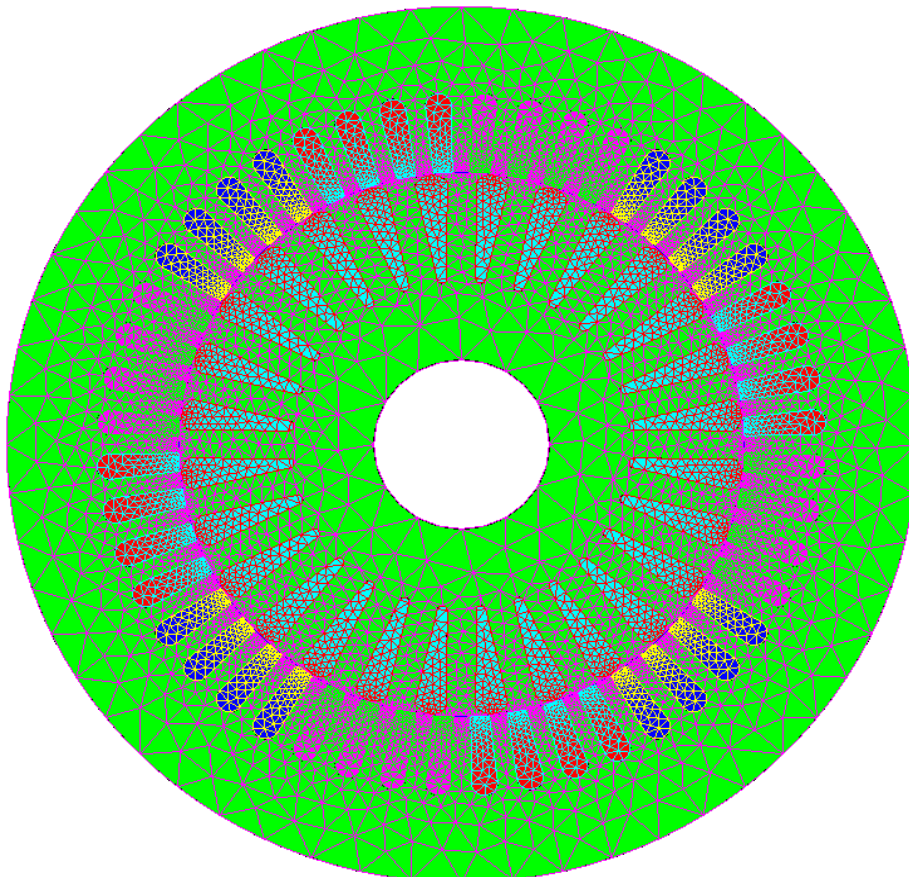


Figure II.7 répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [24].

Création des matériaux

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : IRON (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).

Le matériau ferromagnétique IRON est caractérisé par la courbe d'aimantation $B(H)$, qui est non linéaire, pour tenir en compte de la saturation du circuit magnétique.

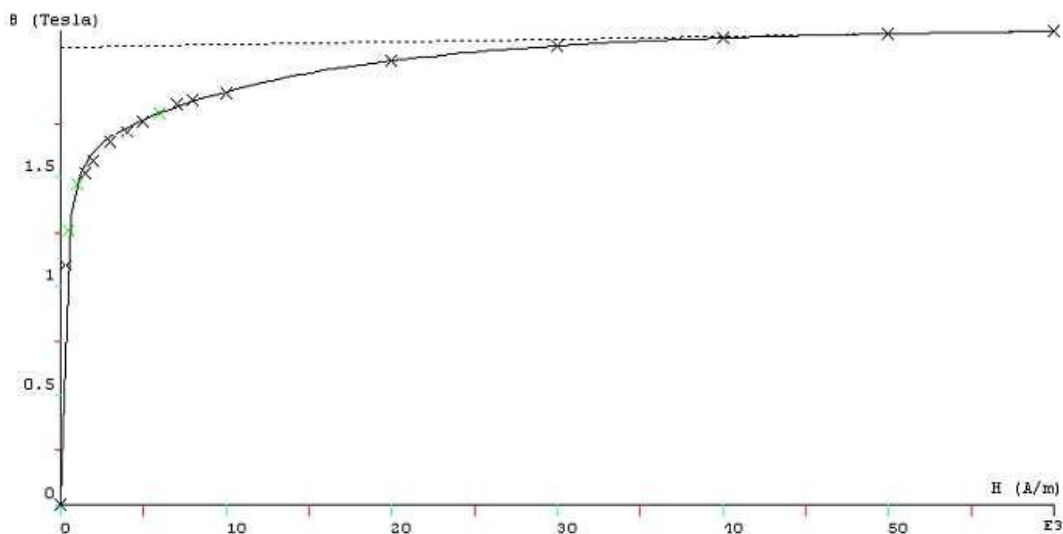


Figure II.8 la courbe d'aimantation $B(H)$ du matériau ferromagnétique

Le circuit électrique

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court circuit), figure II.9.

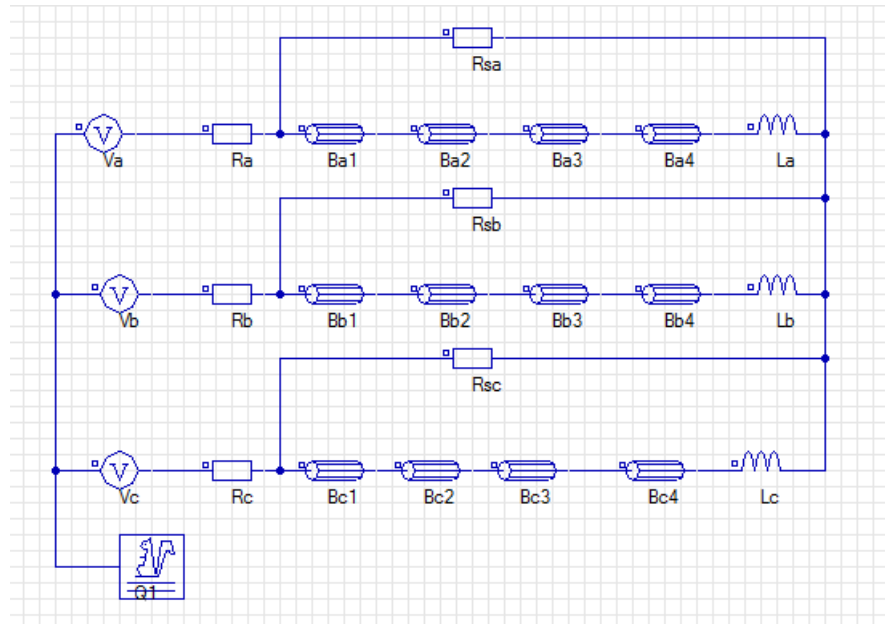


Figure II.9 le circuit électrique d'alimentation

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), figure II.10. V_a , V_b et V_c sont les sources de tension d'alimentation (voir figure II.11). Ba1, Ba2,Bc4 représentant le bobinage statorique. Ra, Rb, et Rc sont les résistances de chute de tension dans le réseau. Rsa, Rsb, et Rsc représentent les résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statoriques. La, Lb et Lc sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

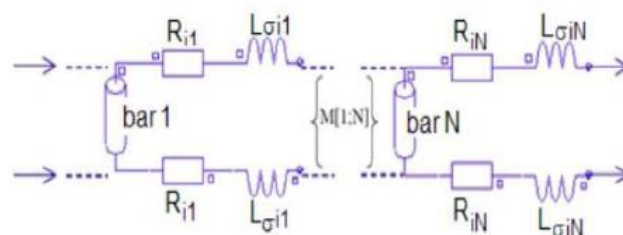


Figure II.10 Circuit équivalent de la cage rotorique

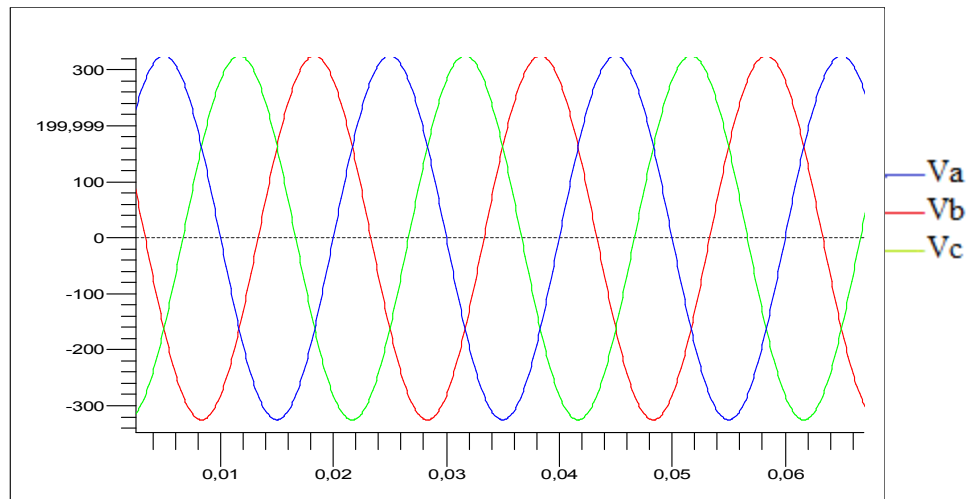


Figure II.11 les tensions d'alimentation V_a , V_b et V_c

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 définie 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 remaillée 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.

II.6 CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé.

A la fin de ce chapitre on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré au traitement du fonctionnement de la machine asynchrone à cage dans son état sain. Le mode qu'on a utilisé est le magnétotransitoire (pas à pas dans le temps), Avec ce mode de simulation, le mouvement du rotor par rapport au stator est pris en considération. Premièrement, on va présenter la simulation du régime transitoire électrique de la machine asynchrone à une vitesse constante, puis nous introduisons l'équation mécanique pour calculer les régimes transitoires mécaniques à vide et en charge.

Dans la suite du chapitre, nous présentons l'analyse spectrale du courant statorique à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT).

III.2 SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN MAGNETOTRANSITOIRE AVEC UNE VITESSE CONSTANTE (IMPOSEE)

Nous considérons que l'entraînement électrique a une inertie suffisamment grande pour que la vitesse de rotation reste constante et égale à 1442tr/mn. La machine à l'état initial n'étant pas magnétisée mais ayant une vitesse nominale de rotation, la simulation passe par un régime transitoire de 0.1s. Nous pouvons voir les courbes du courant statorique, du courant rotorique, du couple électromagnétique, ainsi que la distribution des lignes de flux et de l'induction B dans la machine.

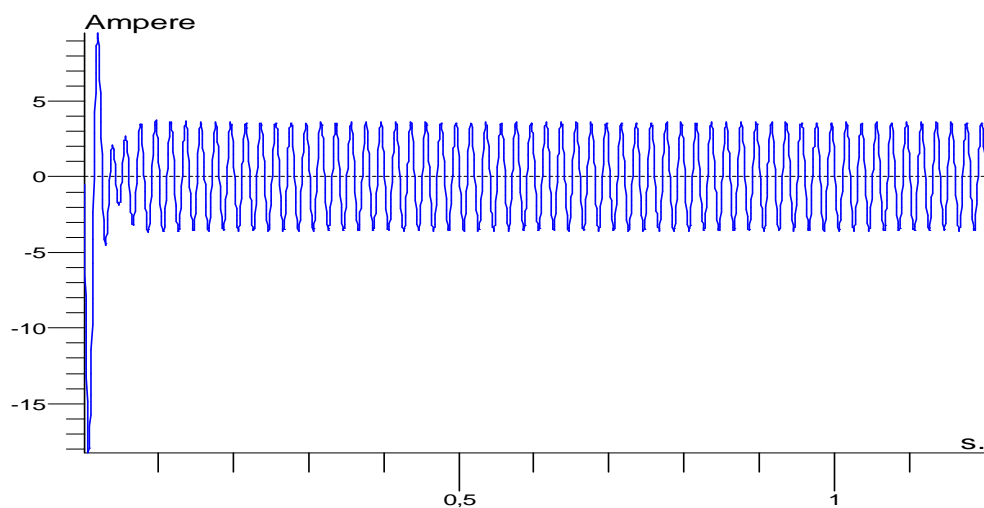


Figure III.1 Le courant dans la phase A lors de la magnétisation de la machine

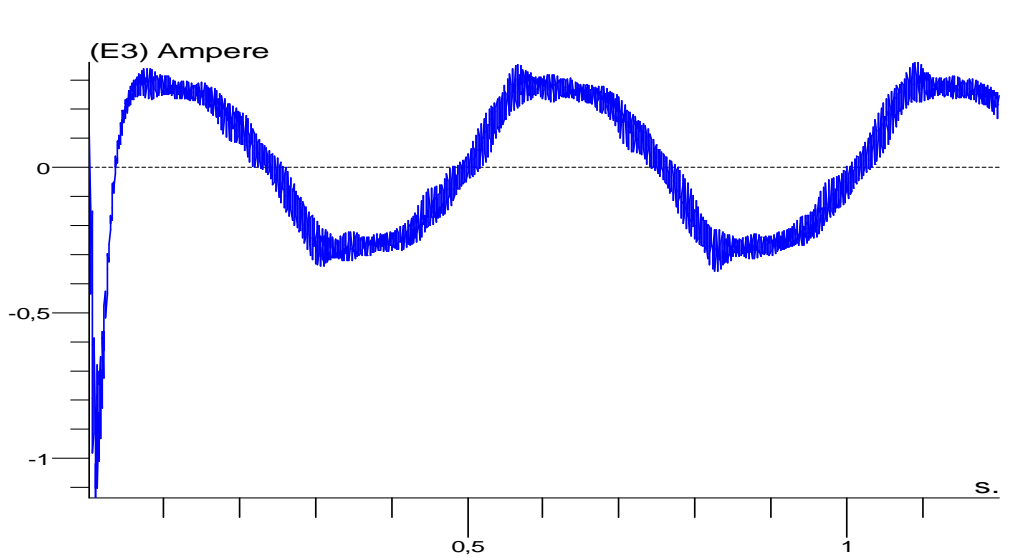


Figure III.2 courant dans la barre 1 lors de la magnétisation de la machine

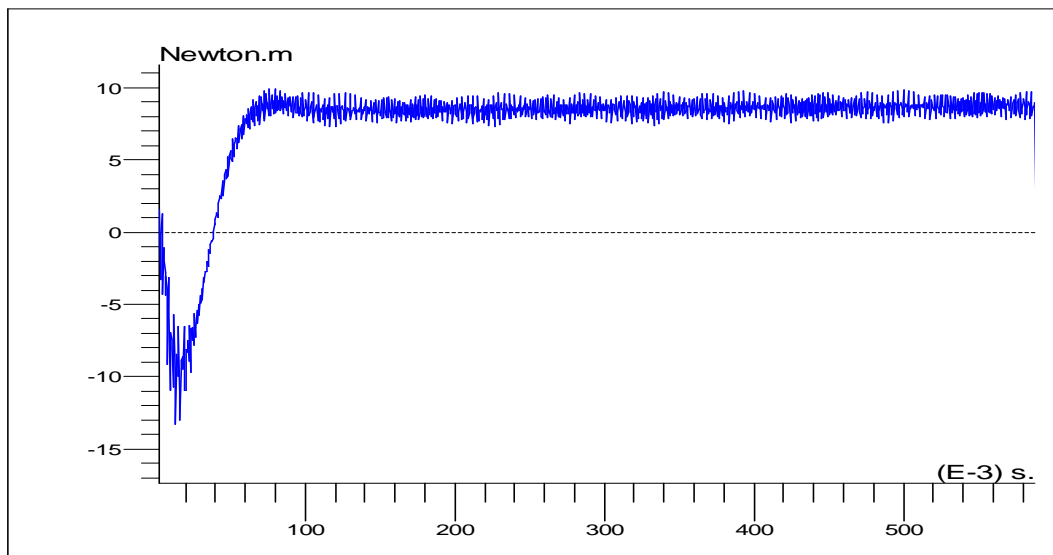
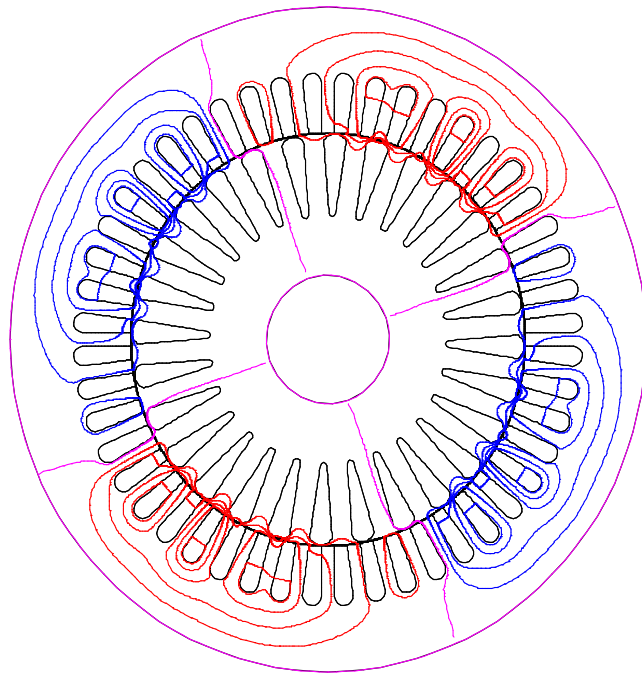


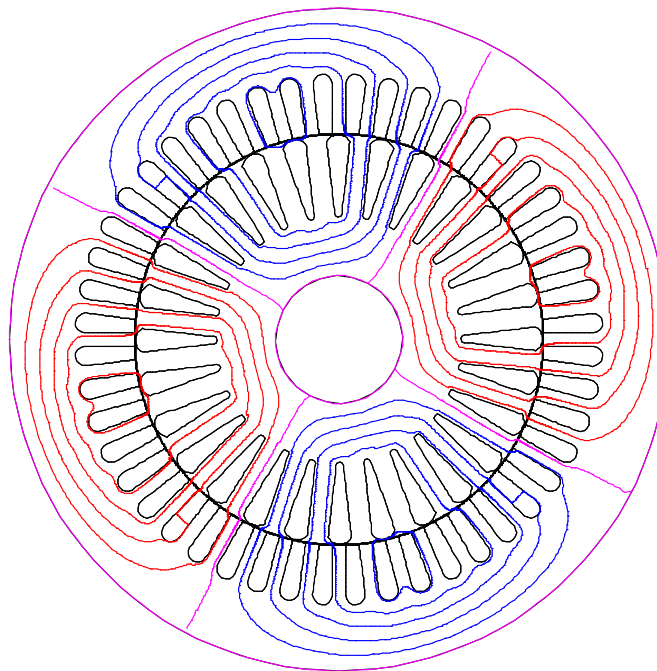
Figure III.3 le couple électromagnétique lors de la magnétisation de la machine

Pendant le régime transitoire, le couple part de zéro et arrive à sa valeur nominale de 7.4N.m. Dans le régime permanent le couple se stabilise autour de la valeur nominale avec des harmoniques de faibles amplitudes. les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 2.6A mais à une forme d'onde qui n'est pas tout à fait sinusoïdale due à l'effet de la saturation de la machine



(a)

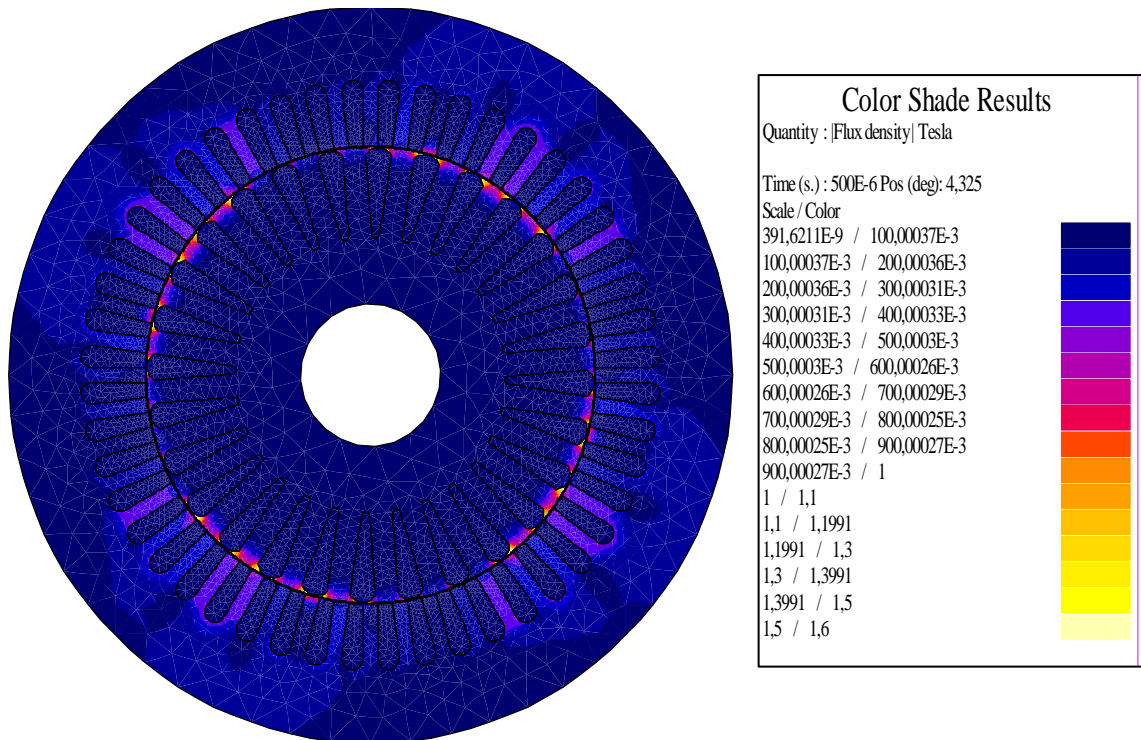
| Isovalues Results | |
|-------------------------------------|---------------|
| Quantity : Equi flux Weber | |
| Time (s.) : 500E-6 Pos (deg): 4,325 | |
| Line / Value | |
| 1 / | -122,13096E-6 |
| 2 / | -97,70428E-6 |
| 3 / | -73,2776E-6 |
| 4 / | -48,8509E-6 |
| 5 / | -24,42421E-6 |
| 6 / | 0 |
| 7 / | 24,42916E-6 |
| 8 / | 48,85585E-6 |
| 9 / | 73,28254E-6 |
| 10 / | 97,70923E-6 |
| 11 / | 122,13591E-6 |



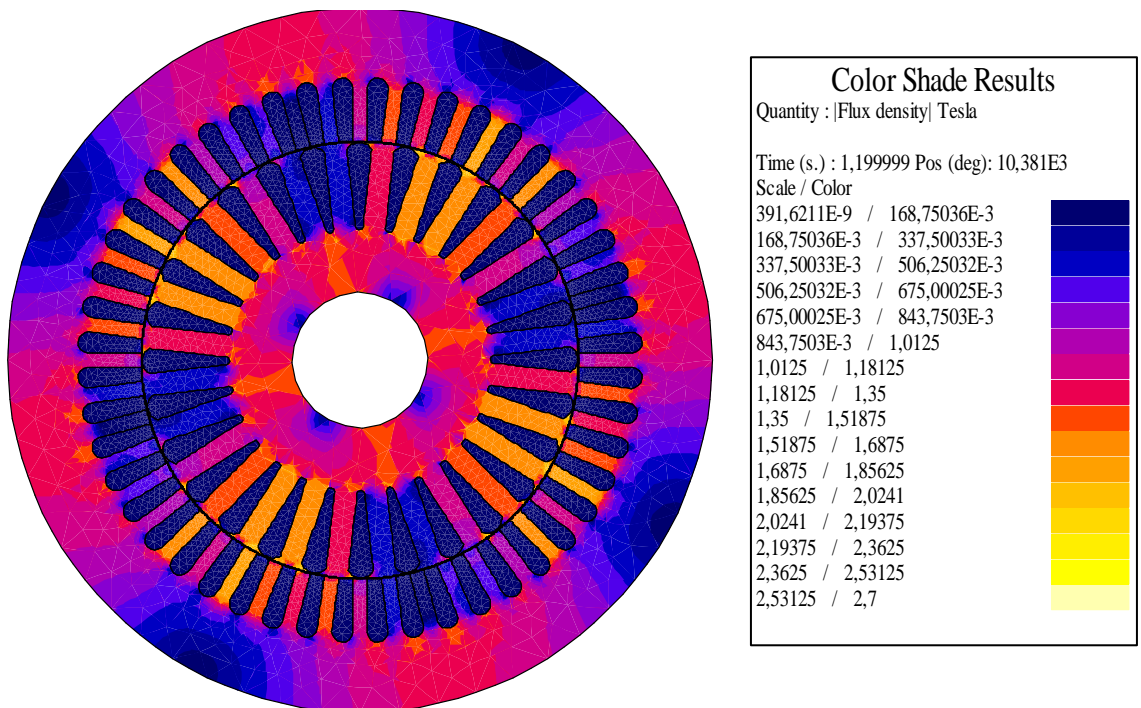
(b)

| Isovalues Results | |
|--|---------------|
| Quantity : Equi flux Weber | |
| Time (s.) : 1,199999 Pos (deg): 10,381E3 | |
| Line / Value | |
| 1 / | -1,00807E-3 |
| 2 / | -806,42756E-6 |
| 3 / | -604,78557E-6 |
| 4 / | -403,14364E-6 |
| 5 / | -201,50168E-6 |
| 6 / | 0 |
| 7 / | 201,78224E-6 |
| 8 / | 403,4242E-6 |
| 9 / | 605,06613E-6 |
| 10 / | 806,70812E-6 |
| 11 / | 1,00835E-3 |

Figure III.4 la distribution des lignes de flux (a) lors de la magnétisation de machine ; (b) en régime permanent



(a)



(b)

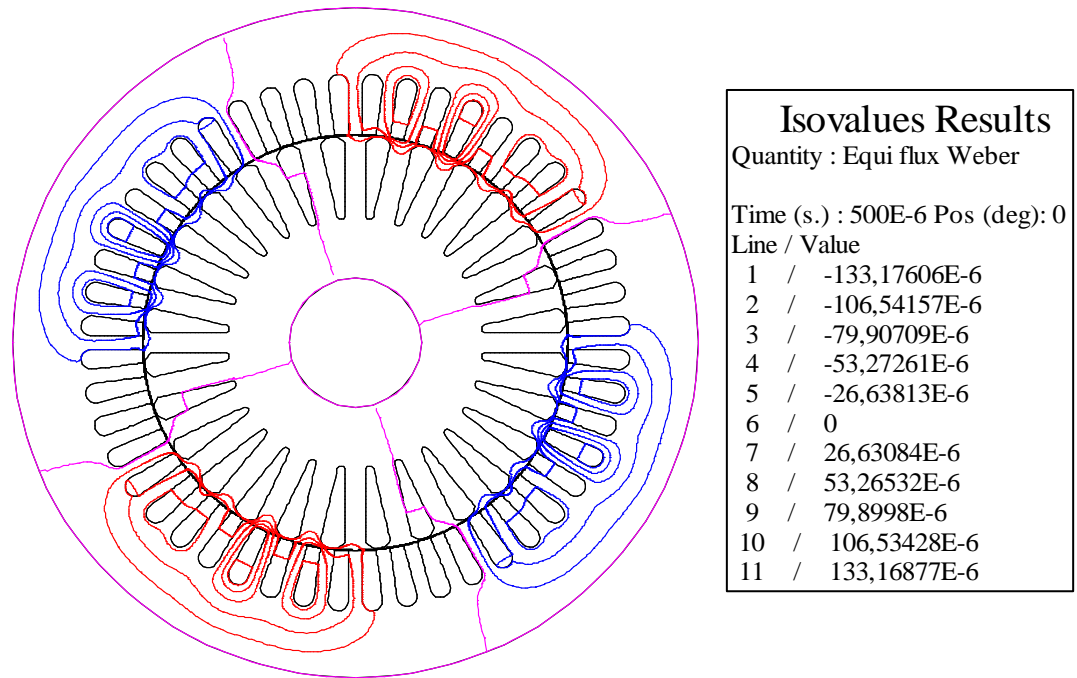
Figure III.5 l'induction B (a) lors de la magnétisation de machine ; (b) en régime permanent

Les figures III.4 et III.5 représentent la répartition des lignes équiflux et l'induction dans le circuit magnétique. Nous remarquons bien la présence de deux paires de pôles. La distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes de flux entre le stator

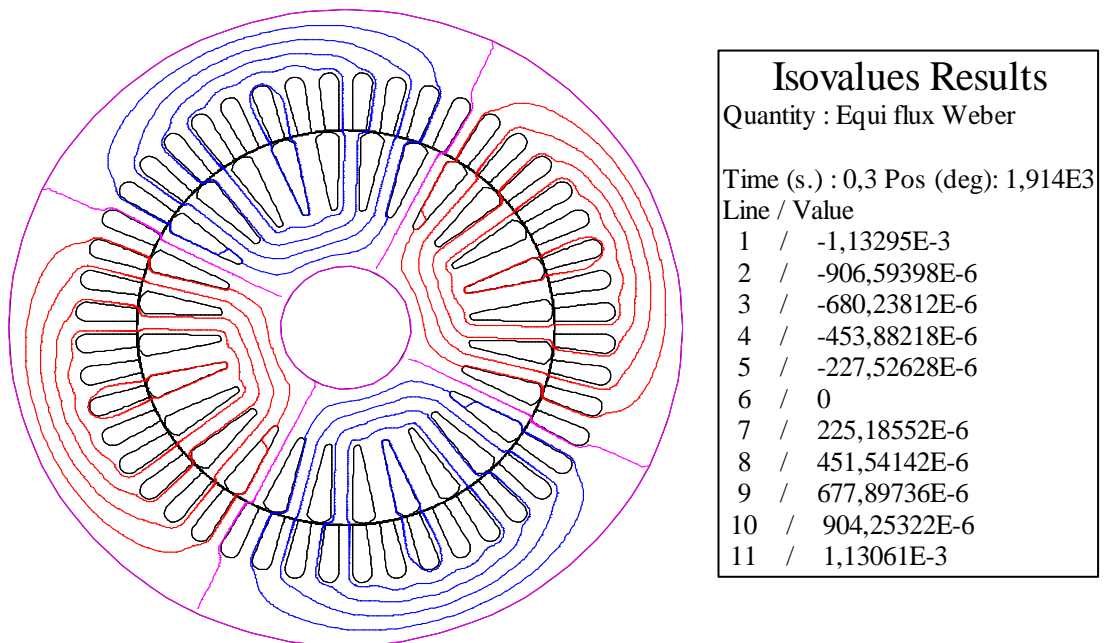
et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est aussi quasi-symétrique.

III.3. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A VIDE

A vide, sous la tension nominale de 230 V, nous avons présenté sur les Figures. III. 6 à II.11, l'évolution des grandeurs locales (les lignes des équiflux, l'induction électromagnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse).

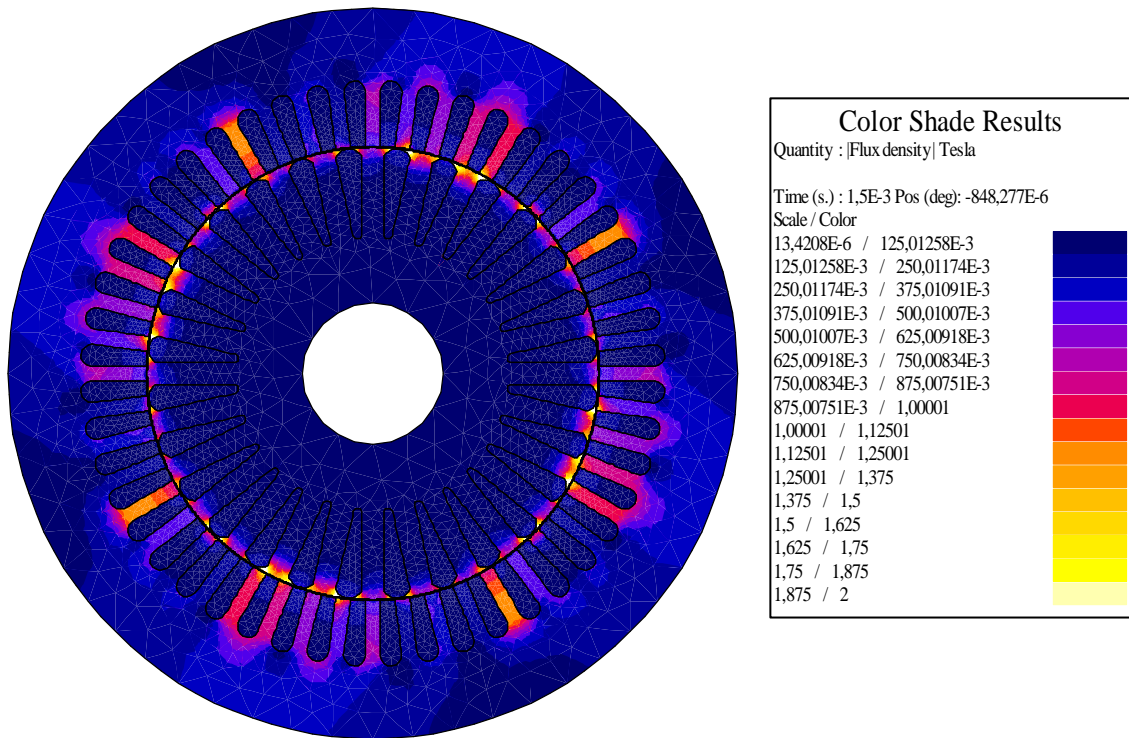


(a)

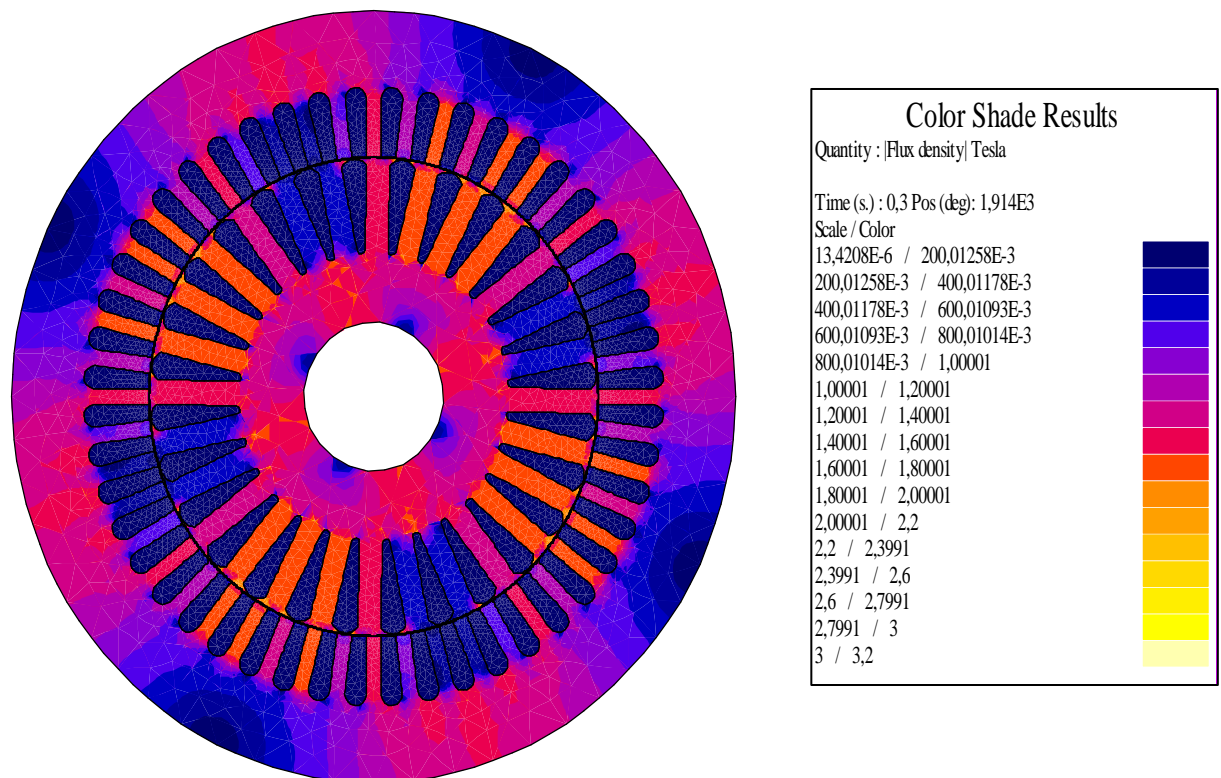


(b)

Figure III.6 la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent



(a)



(b)

Figure III.7 l'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

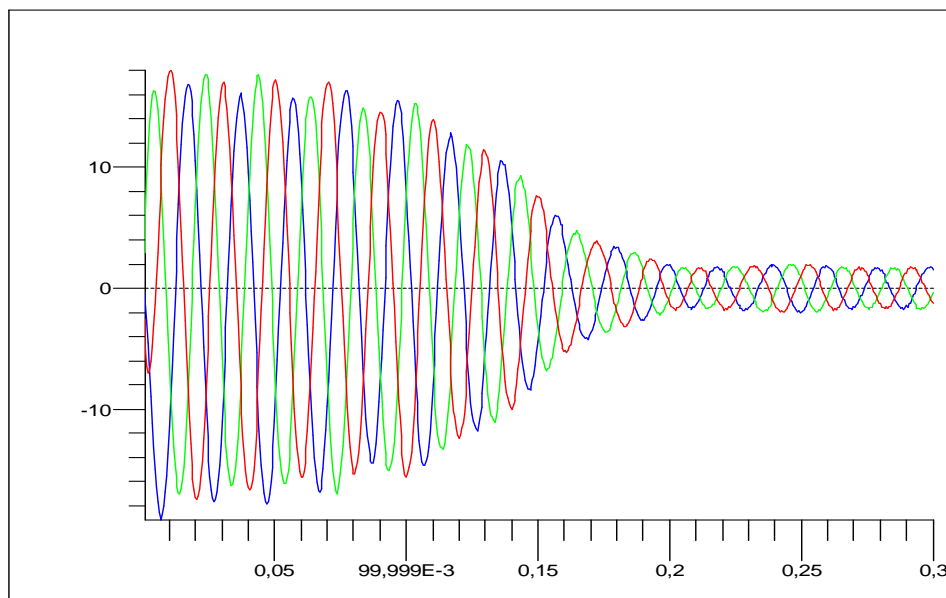


Figure III.8 les courants statoriques à vide

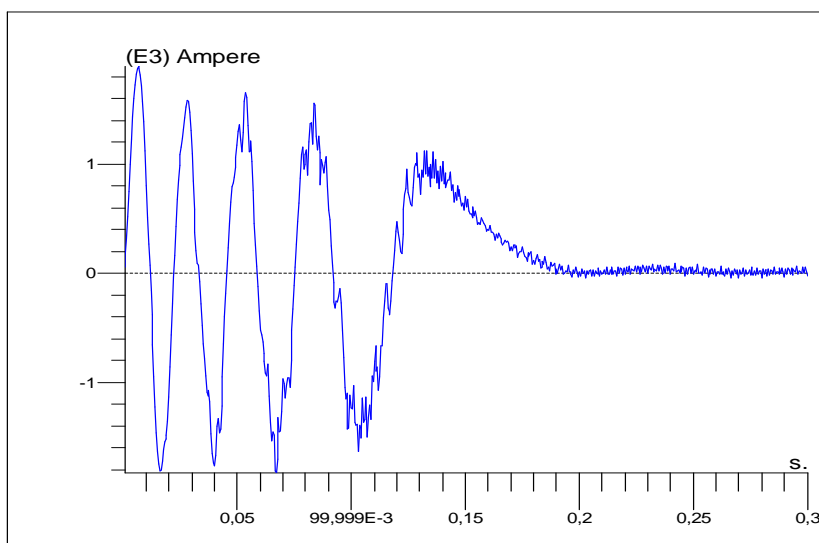


Figure III.9 le courant dans la barre rotorique 1 à vide

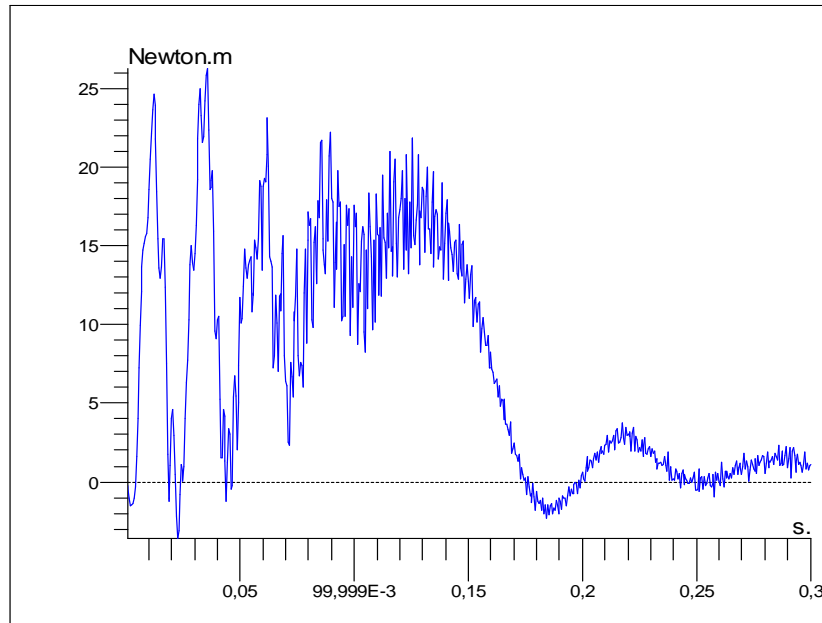


Figure III.10 le couple électromagnétique à vide

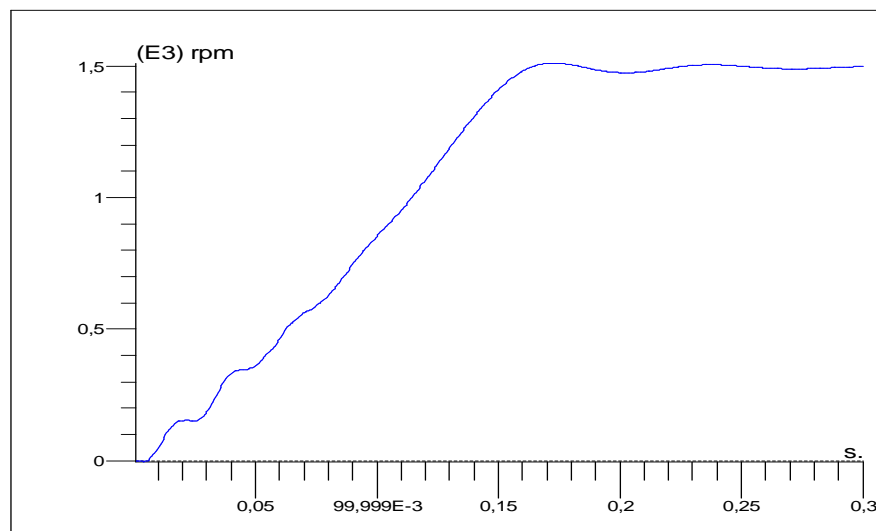
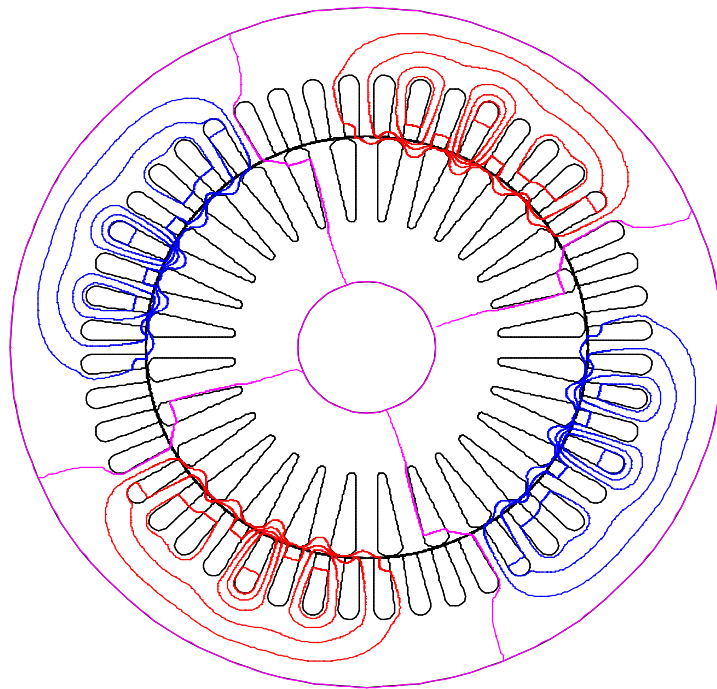


Figure III.11 vitesse de rotation à vide

Après un régime transitoire d'environ 0.2s durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 1.3A. Les trois courants de phase sont bien déphasés entre eux de 120° électriques, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine, Mais à une forme d'onde qui n'est pas tout à fait sinusoïdale. Cela est dû essentiellement à l'effet de la saturation de la machine. Le couple électromagnétique, à vide, est pratiquement nul en régime permanent. La vitesse atteint une valeur de 1497 tr/mn donc la machine fonctionne avec un glissement très faible qui égale à 0.2%.

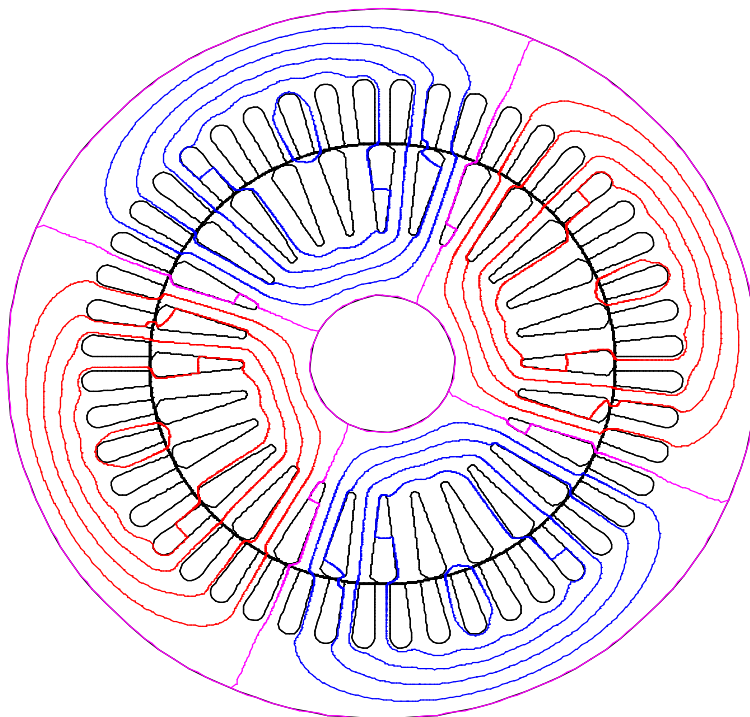
III.4. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MAS EN CHARGE

Sous la même tension 230V, nous avons présenté sur les figures III.12 à III.17 les grandeurs locales et globales de la machine en charge.



| Isovalues Results | |
|---------------------------------|---------------|
| Quantity : Equi flux Weber | |
| Time (s.) : 500E-6 Pos (deg): 0 | |
| Line / Value | |
| 1 / | -134,89461E-6 |
| 2 / | -107,91658E-6 |
| 3 / | -80,93855E-6 |
| 4 / | -53,96053E-6 |
| 5 / | -26,9825E-6 |
| 6 / | 0 |
| 7 / | 26,97355E-6 |
| 8 / | 53,95158E-6 |
| 9 / | 80,9296E-6 |
| 10 / | 107,90763E-6 |
| 11 / | 134,88566E-6 |

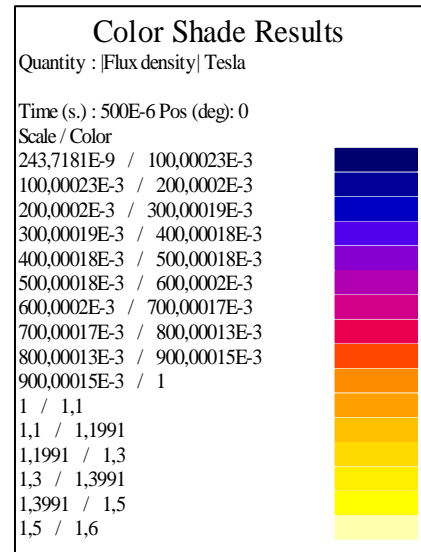
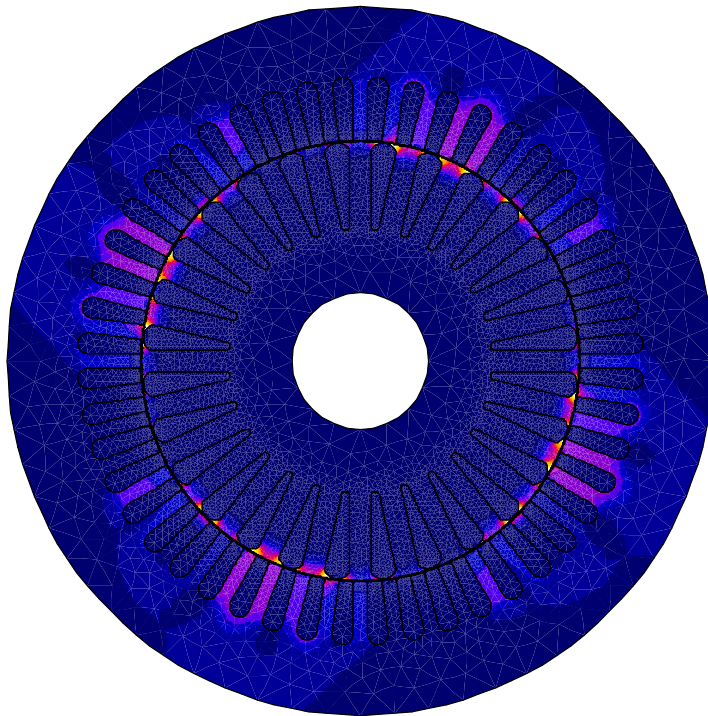
(a)



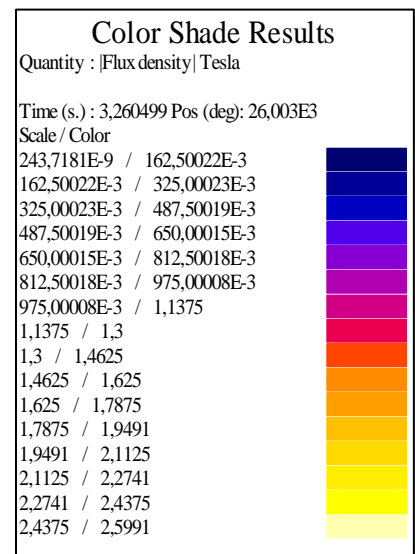
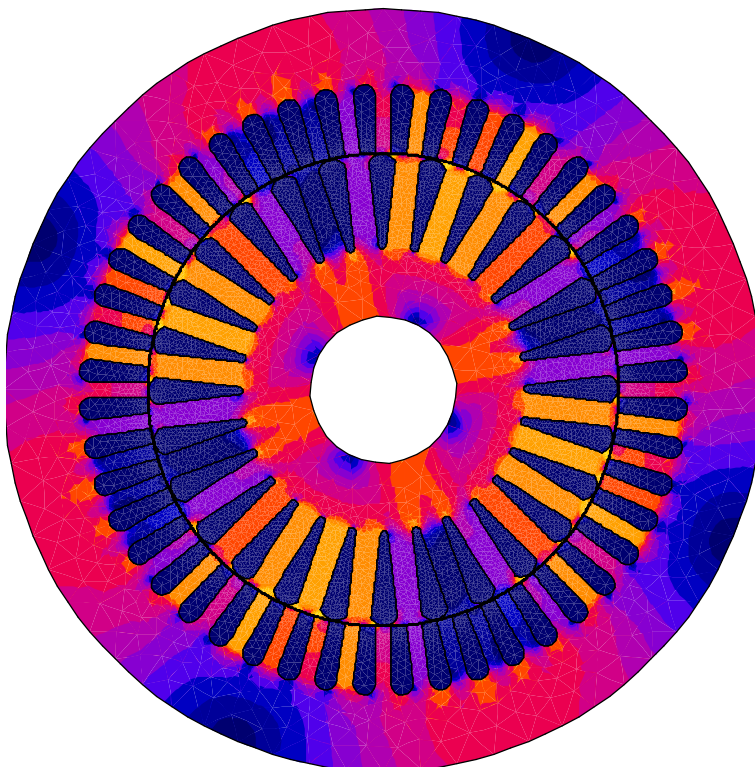
| Isovalues Results | |
|--|---------------|
| Quantity : Equi flux Weber | |
| Time (s.) : 3,260499 Pos (deg): 26,003E3 | |
| Line / Value | |
| 1 / | -995,46765E-6 |
| 2 / | -796,3609E-6 |
| 3 / | -597,25408E-6 |
| 4 / | -398,1473E-6 |
| 5 / | -199,0405E-6 |
| 6 / | 0 |
| 7 / | 199,1731E-6 |
| 8 / | 398,2799E-6 |
| 9 / | 597,38668E-6 |
| 10 / | 796,49349E-6 |
| 11 / | 995,60025E-6 |

(b)

Figure III.12 la distribution des lignes du flux en charge au (a) démarrage ; (b) en régime permanent



(a)



(b)

Figure III.13 L'induction B en charge au démarrage (a) et en régime permanent (b)

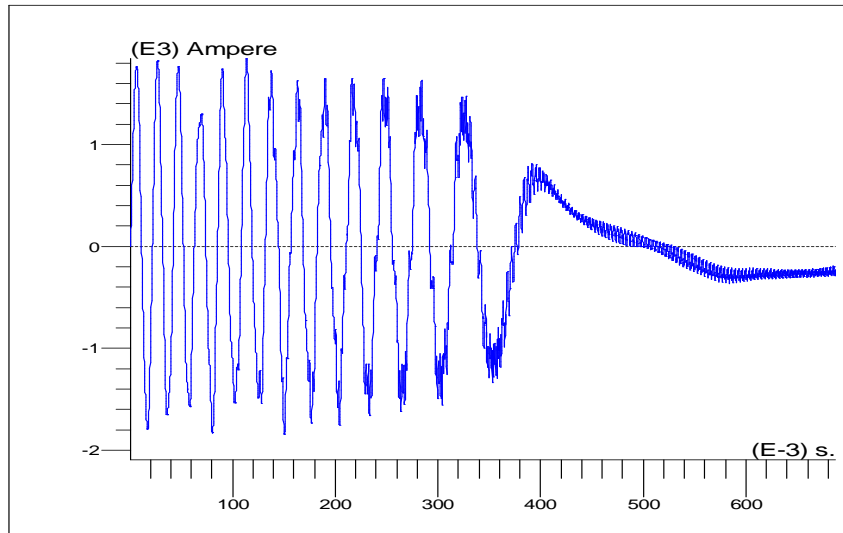


Figure III.14 le courant dans la barre 1 rotorique

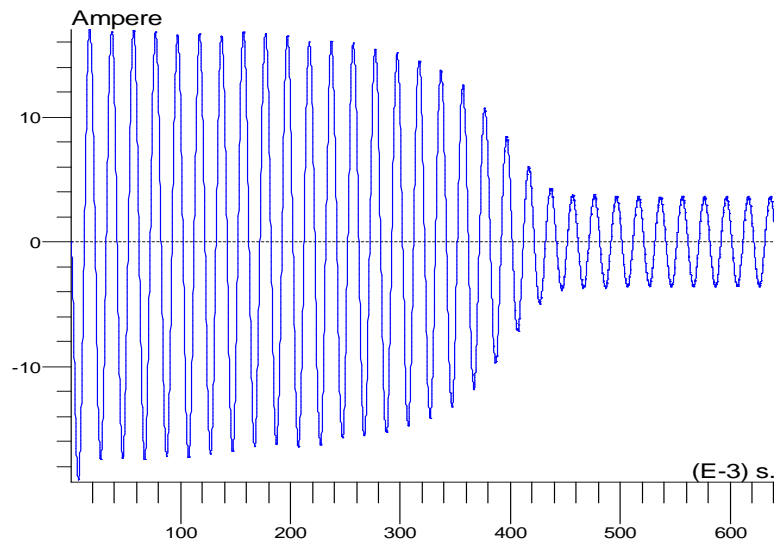


Figure III.15 le courant statorique de la phase A en charge

Après un régime transitoire d'environ 0.45s durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 2.6 A, le couple électromagnétique atteint sa valeur nominale de 7.4N.m avec des harmoniques de faibles amplitudes.

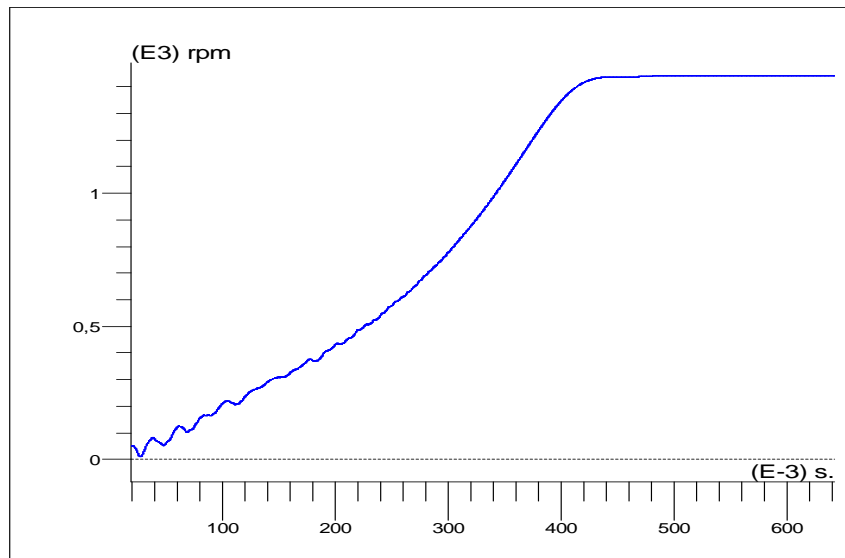


Figure III.16 la vitesse de rotation en charge

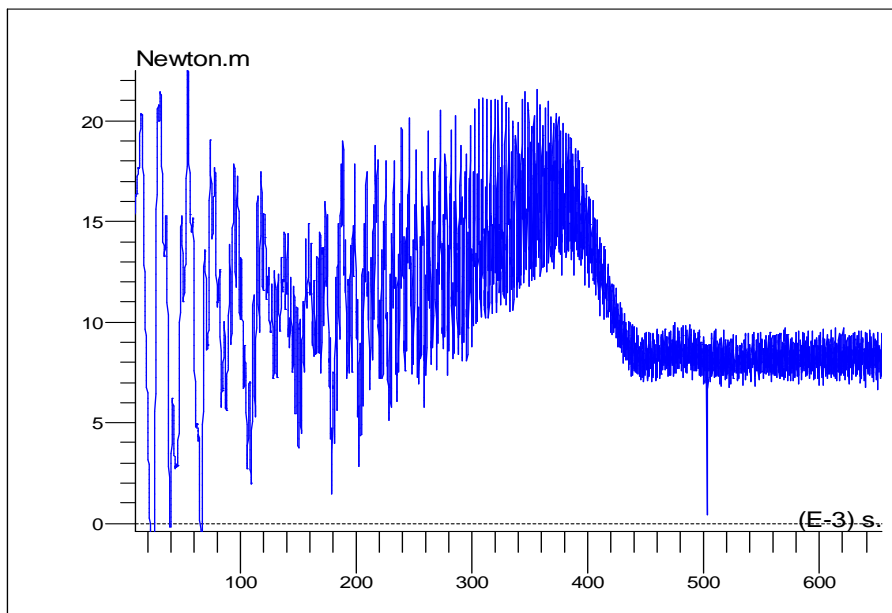


Figure III.17 le couple électromagnétique en charge

III.5 ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Il est bien connu que dans une machine asynchrone, on ne peut avoir directement accès aux mesures des grandeurs rotoriques. Ceci a conduit naturellement les chercheurs à mettre au point des méthodes consistant à isoler, analyser et si possible quantifier, l'influence des défauts rotoriques sur des grandeurs observables et mesurables de l'extérieur. Ces méthodes sont

essentiellement au nombre de trois, qui concernent l'observation des harmoniques, de courants statoriques, de puissance consommée, ou encore de couple.

Seule la représentation fréquentielle du signal, donne des renseignements précieux sur sa composition. Pour mieux discerner les bandes latérales, il faudrait que l'acquisition du signal ainsi que son analyse, soient faite sous certaines conditions qui sont nécessaires. La résolution fréquentielle souhaitée est déterminée par la fréquence d'échantillonnage F_e ainsi que la durée de

l'acquisition (nombre des points N) $\Delta f = \frac{F_e}{N}$.

Nous citons ici l'influence de quelques paramètres sur le spectre du courant statorique de la machine étudiée à l'état sain.

III.5.1 L'influence de la saturation

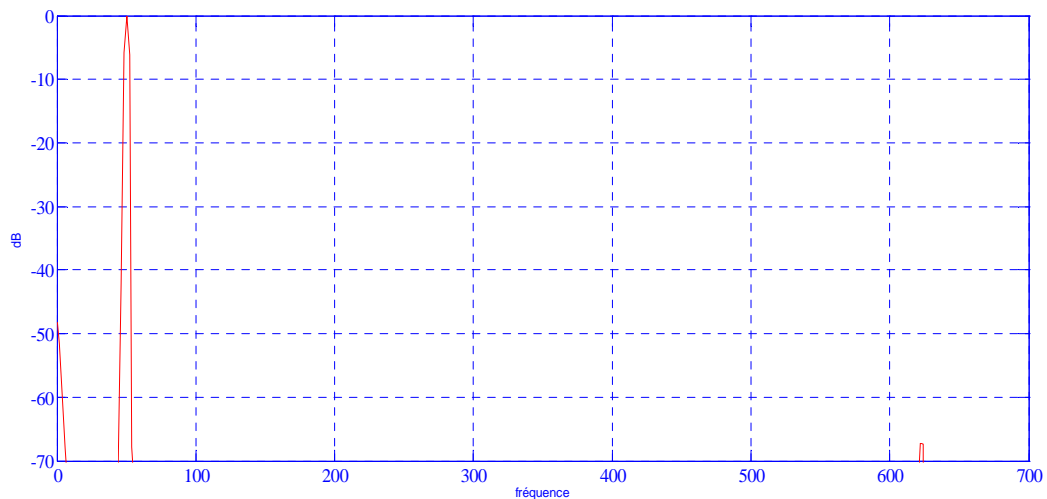


Figure III.18 spectre du courant statorique dans le cas linéaire

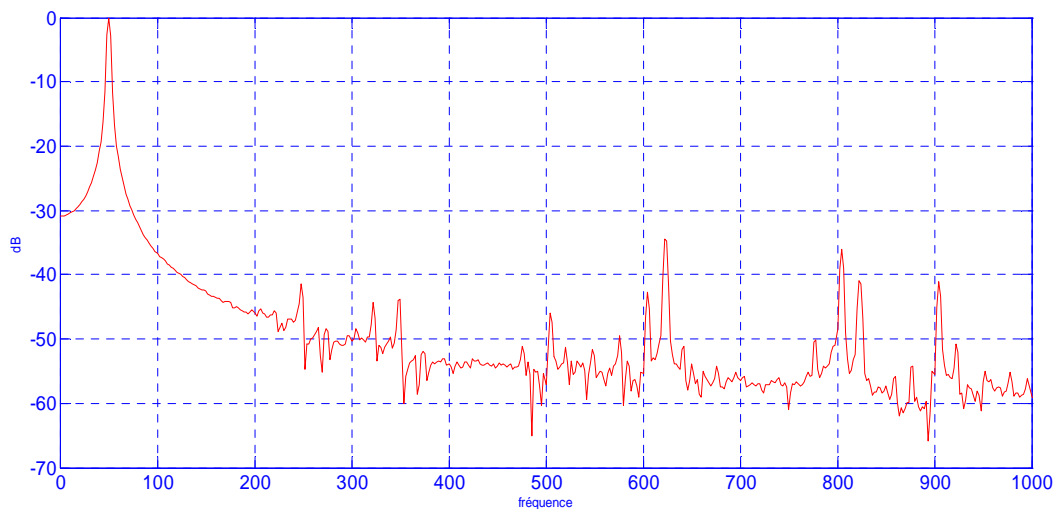
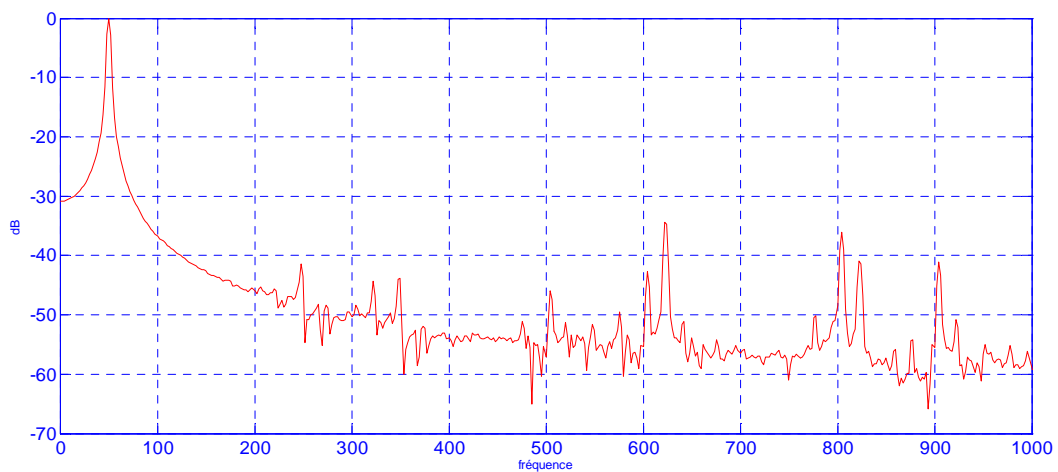


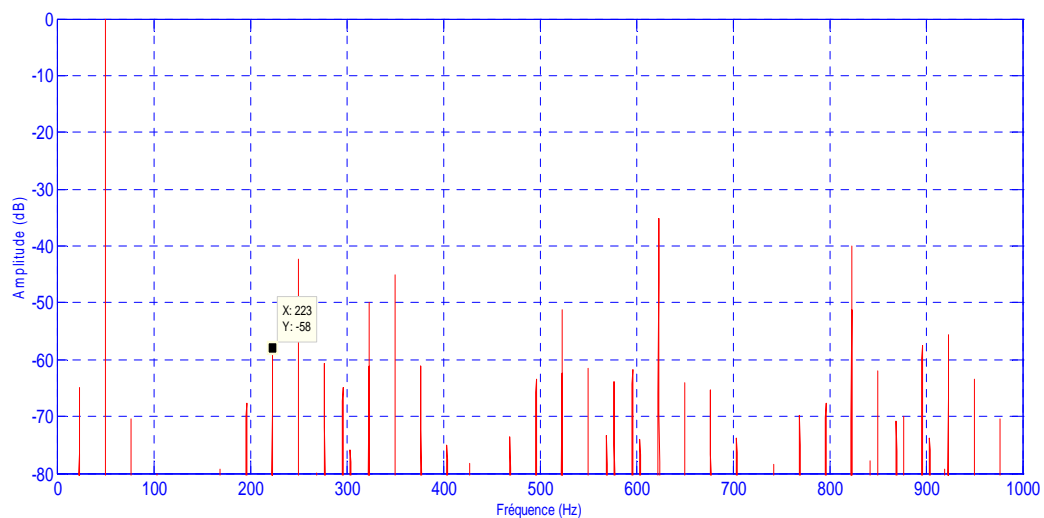
Figure III.19 spectre du courant statorique avec saturation

Si on néglige la saturation du circuit magnétique, nous aurons le spectre du courant de la première phase donné par la figure III.18. On constate qu'il ne contient que la fondamentale 50Hz et quelques harmoniques d'espace se manifestent avec de très petites amplitudes. Cependant, lors que nous prenons en considération la saturation du circuit magnétique, nous aurons le spectre du courant illustré par la figure III.19 il est possible de remarquer que les harmoniques d'espace deviennent plus importantes en amplitudes avec l'apparition des composantes 250Hz et 350Hz.

III.5.2 L'influence de fluctuation de la vitesse



(a)

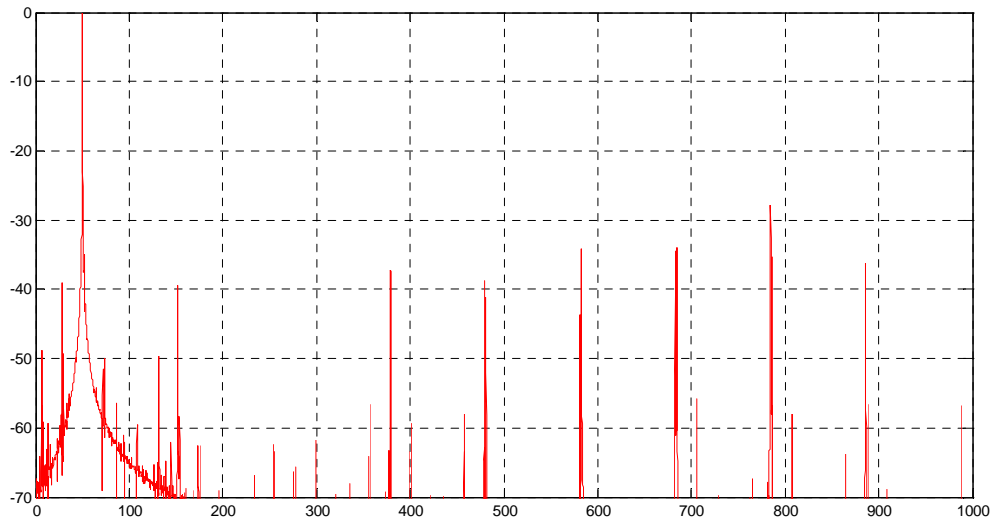


(b)

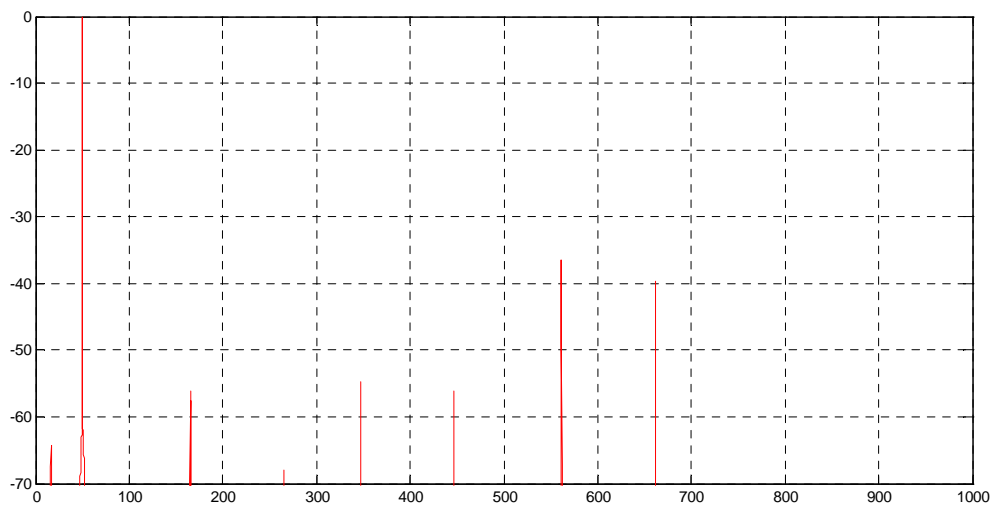
Figure III.20 spectre du courant statorique (a) avec une vitesse constante (imposée) ;(b) avec fluctuation de vitesse

Avec la fluctuation de la vitesse de rotation, plus des harmoniques se manifestent dans le spectre du courant statorique. Ces harmoniques appartiennent à la famille des harmoniques d'espace décrite par (I.1) avec $n_{\omega_s} = 3, 5, 7, \dots$.

III.5. 3 L'influence du pas de calcul



(a)



(b)

Figure III.21 spectre du courant statorique (a) avec un pas $\Delta t = 0.0005$; (b) avec un pas $\Delta t = 0.0001$

Nous remarquons dans la figure (III.21) que le pas de calcul influe beaucoup sur la résolution spectrale. On constate que avec un pas de 0.0005s on perd beaucoup d'informations sur le signal à analyser, ce qui résulte à un spectre riche en harmoniques inconnues.

III.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons simulé le modèle éléments finis de la machine asynchrone, créé précédemment, sous l'environnement Flux 2D® en 2 dimensions (2D). Et nous avons visualisé la répartition des lignes équiflux et l'induction électromagnétique. Egalement nous avons simulé la machine en formulation magnétotransitoire à vitesse constante, Par la suite, nous avons passé à la simulation en régime transitoire avec l'introduction de l'équation mécanique, où nous avons abordé la simulation des comportements dynamiques de la machine (simulation de fonctionnement à vide et en charge).

A la fin de ce chapitre nous avons effectué l'analyse spectrale d'une grandeur mesurable qui est le courant des phases statoriques en représentant l'influence de la saturation, du pas du calcul et de la fluctuation de vitesse rotorique sur le spectre. Cette analyse spectrale sera notre outil pour la détection des défauts dans le chapitre suivant.

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de la machine asynchrone, en prenant en considération les défauts rotoriques. Le modèle élaboré précédemment dans le deuxième chapitre sera utilisé pour la modélisation des défauts considérés.

La technique de détection des défauts par l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est utilisée, parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, où la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère.

La rupture de la barre peut être effectuée par deux méthodes différentes :

- La première consiste à augmenter la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.
- La seconde consiste à supprimer le conducteur associé à la barre dans le circuit électrique et la surface correspondante dans la géométrie est remplie par l'air.

Dans notre travail, nous avons utilisé cette dernière méthode qui présente la cassure totale de la barre rotorique.

IV.2 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES PERFORMANCES DE LA MACHINE

Les figures de IV.1 à IV.7 illustrent le démarrage de la machine en pleine charge sans et avec défauts de barres

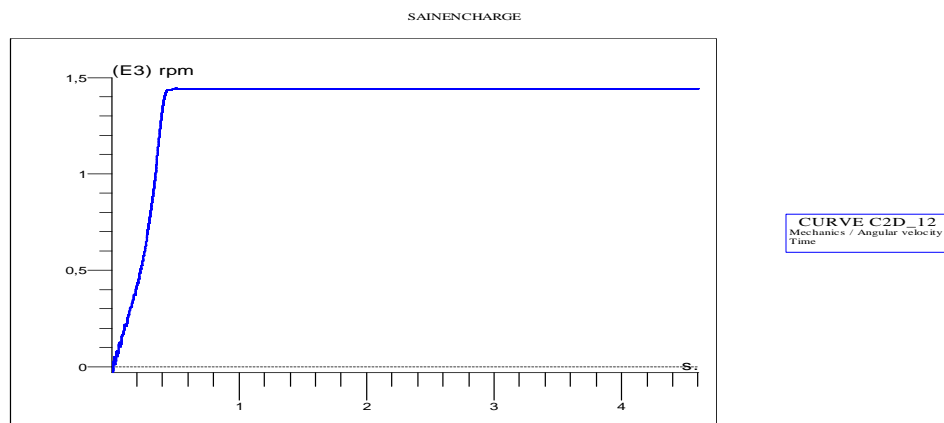


Figure IV.1 la vitesse de rotation à l'état sain

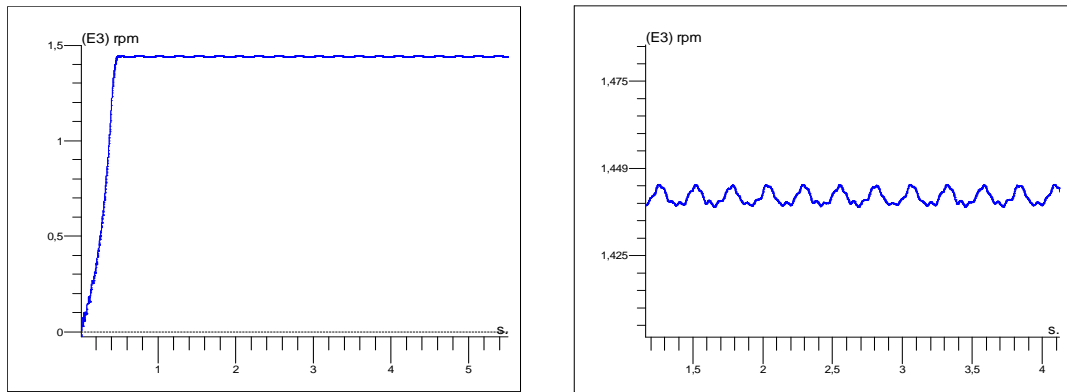


Figure IV.2 la vitesse de rotation et zoom avec une barre cassée

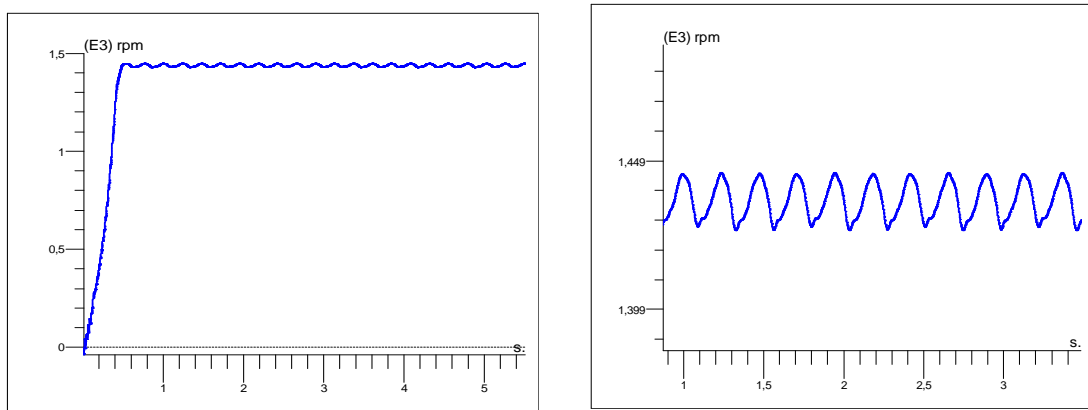


Figure IV.3 la vitesse de rotation et zoom avec trois barres cassées

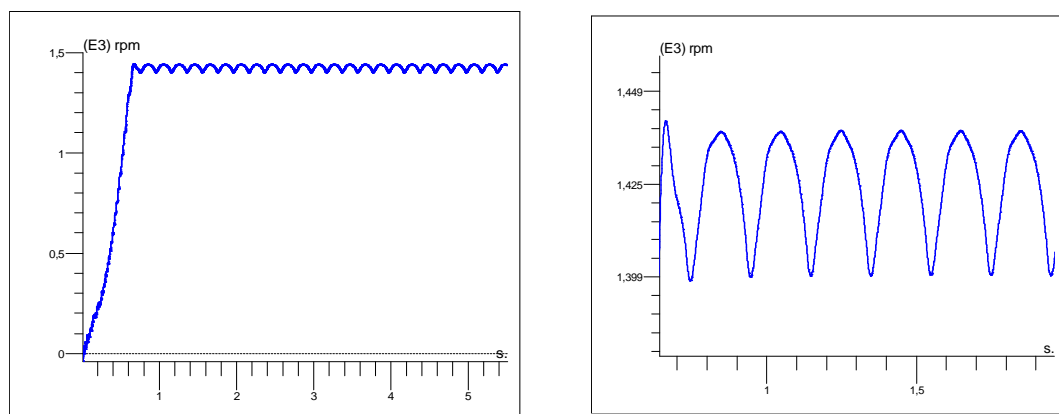


Figure IV.4 la vitesse de rotation et zoom avec cinq barres cassées

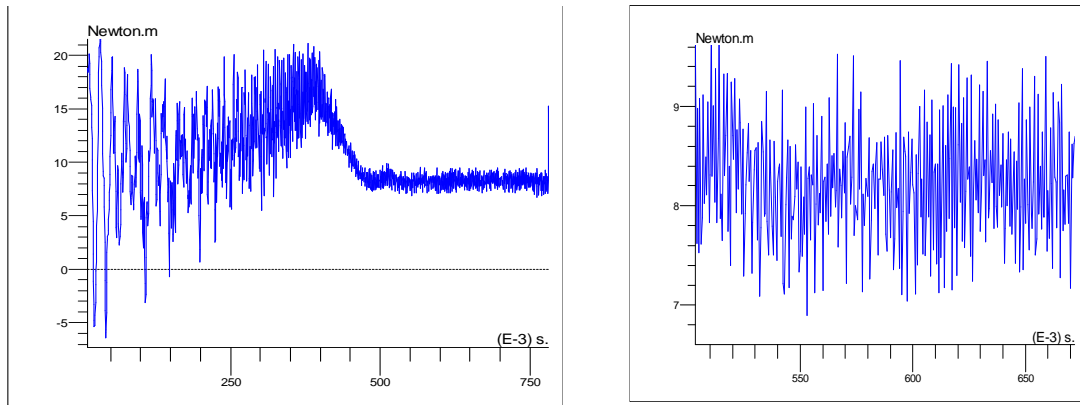


Figure IV.5 le couple électromagnétique et zoom avec une barre cassée

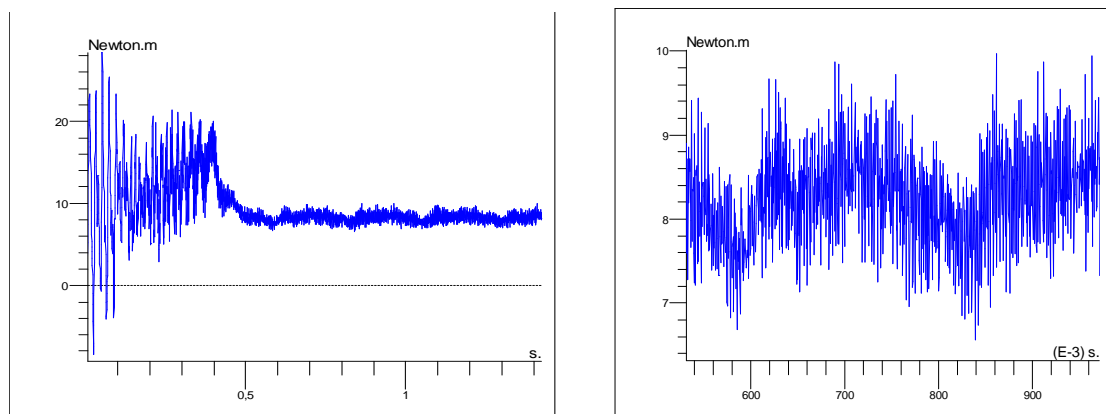


Figure IV.6 le couple électromagnétique et zoom avec trois barres cassées

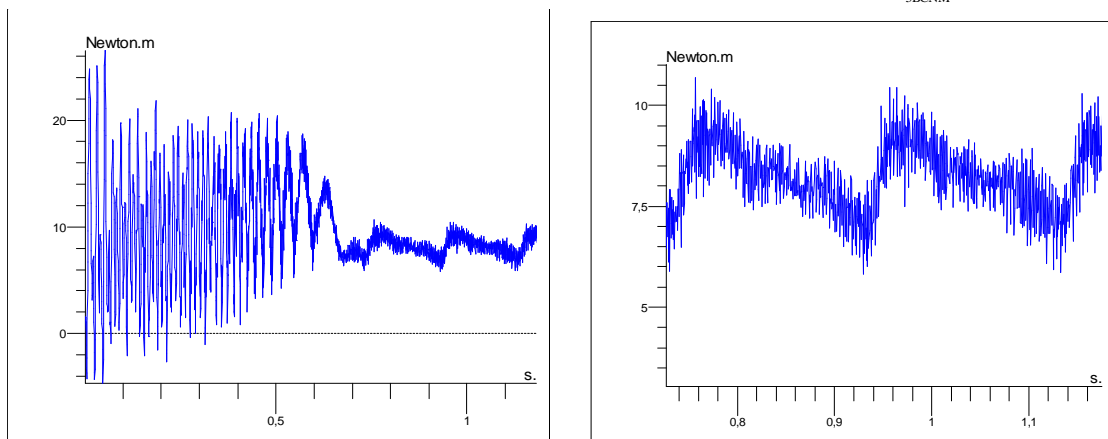


Figure IV.7 le couple électromagnétique et zoom avec cinq barres cassées

Les figures citées précédemment montrent l'influence du nombre des barres cassées sur la durée du régime transitoire de la vitesse. On remarque nettement que la durée pour atteindre la vitesse nominale augmente avec le nombre de barres rompues. On note également l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans l'allure du couple et dans celle de la vitesse avec l'augmentation du nombre des barres cassées. La détérioration des barres réduit la valeur

moyenne du couple électromagnétique, ce qui résulte à une chute de vitesse en régime permanent.

IV.3 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE

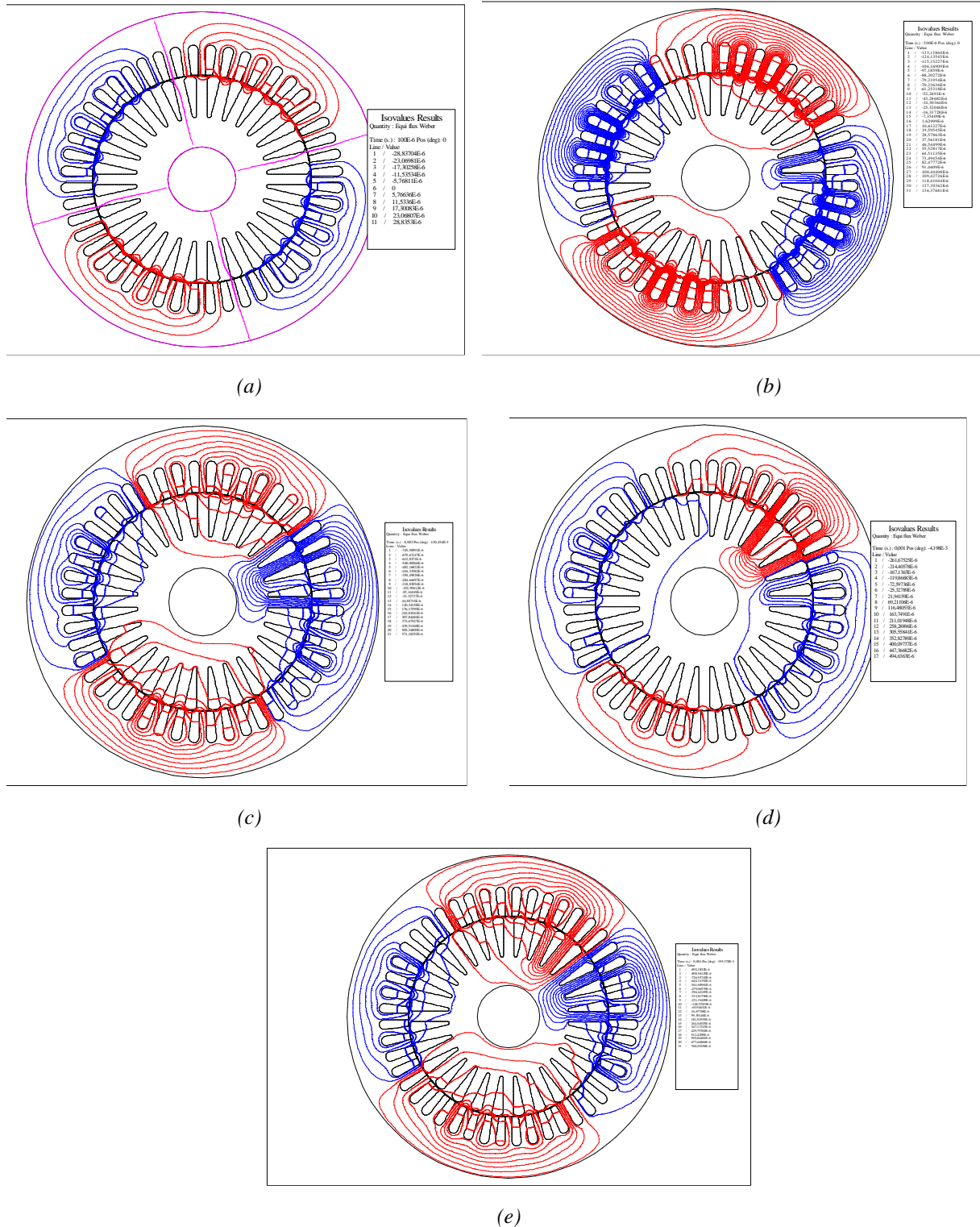
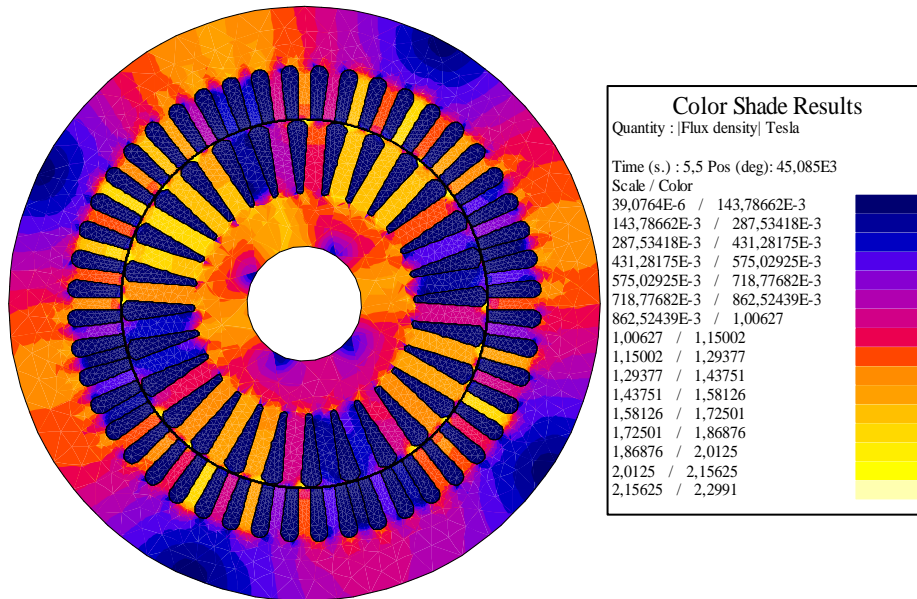
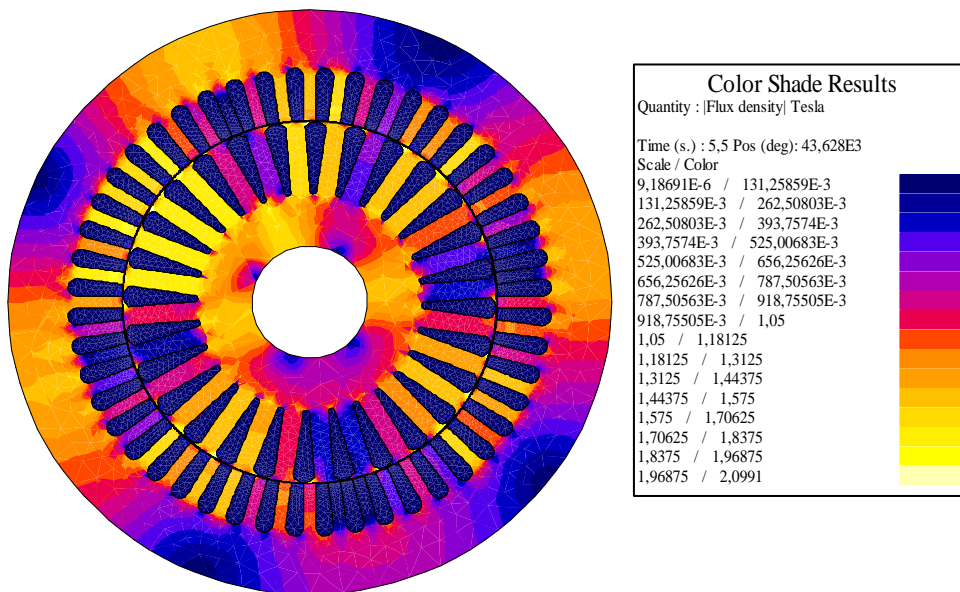


Figure IV.8 la distribution des lignes du flux au démarrage (a) machine saine ;(b) avec une barre cassée ;(c) avec trois barres cassées ;(d) avec quatre barres cassées ;(e) avec cinq barres cassées

La figure IV.8 représente la distribution des lignes de flux dans la machine qui fait apparaître le déséquilibre provoqué par la rupture de barres. Pour un moteur sain, les courants dans les barres entraînent une répartition symétrique des lignes de flux autour de chaque pôle. L'absence des courants dans les barres cassées annule leurs participations à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres. On remarque aussi, le déséquilibre de répartition des lignes de flux augmente en fonction du nombre des barres cassées.



(a)



(b)

Figure IV.9 l'induction magnétique (a) avec trois barres cassées ;(b) avec cinq barres cassées

Les distributions de l'induction montrant aussi l'accentuation de déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Nous remarquons qu'autour du défaut, l'induction est relativement élevée, ainsi que la saturation des dents autour des barres cassées faite à l'absence de la réaction magnétique démagnétisante, due à l'absence du courant induit dans les barres cassées. Ce qui provoque des pertes fer dans le stator et le rotor, localisées autour des barres cassées. Au stator, l'induction est totalement déséquilibrée entre les pôles de la machine.

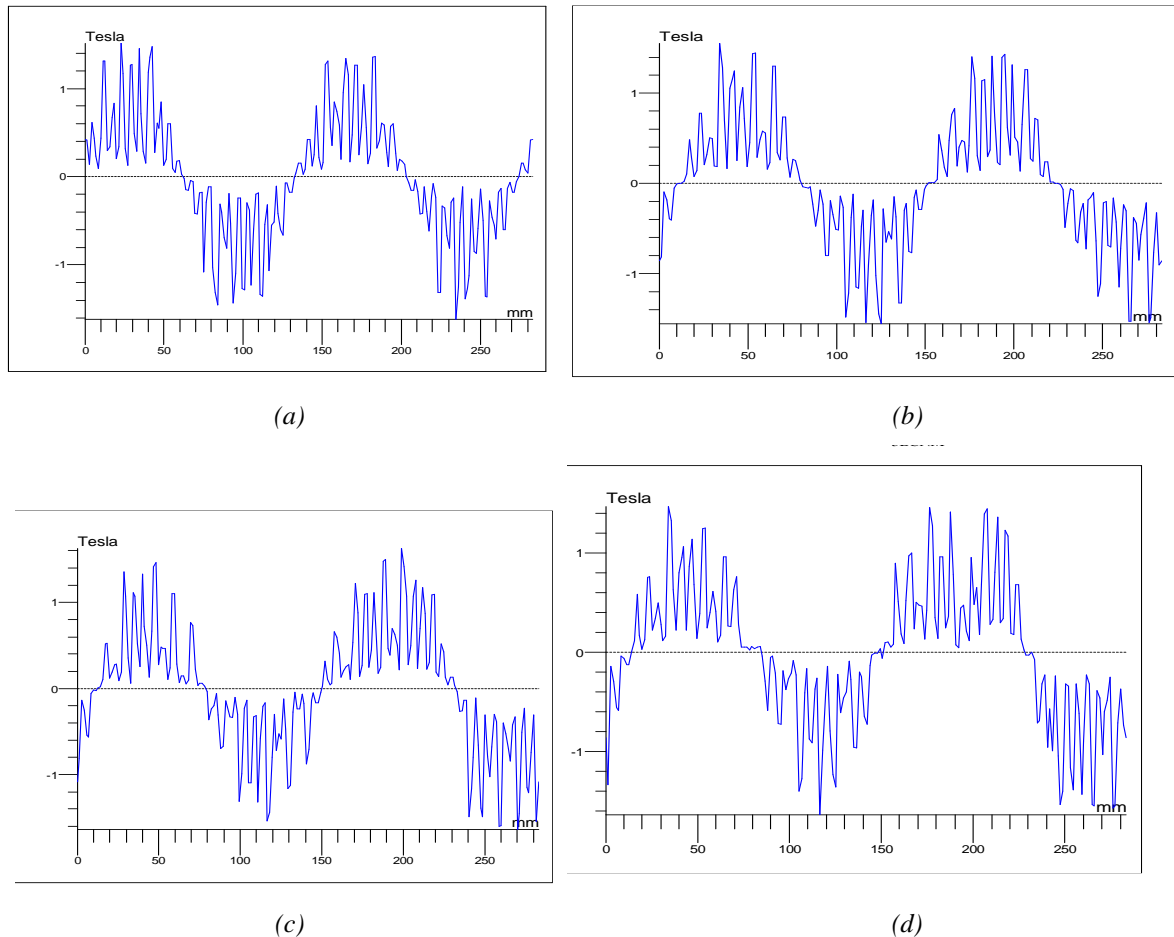


Figure IV.10 l'induction radiale B_r dans l'entrefer (a) machine saine ;(b) avec une barre cassée ;(c) avec quatre barres cassées ;(d) avec cinq barres cassées

Nous avons relevé l'induction radiale dans l'entrefer de la machine le long d'un contour circulaire (la composante normale en fonction de la position). La machine saine présente une induction radiale équilibrée sous les différents pôles ; il y a évidemment des harmoniques de rang élevés dus à la denture et à la discrétisation numérique (éléments du maillage). Il est visible que le taux des harmoniques est relativement bas pour la machine saine. Dans le cas de machine avec défaut, l'allure de l'induction est perturbée et on constate qu'elle est visiblement moins sinusoïdale dans les cas des défauts, ce qui traduit un déséquilibre entre les deux paires de pôles.

IV.4 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES COURANTS ROTORIQUES

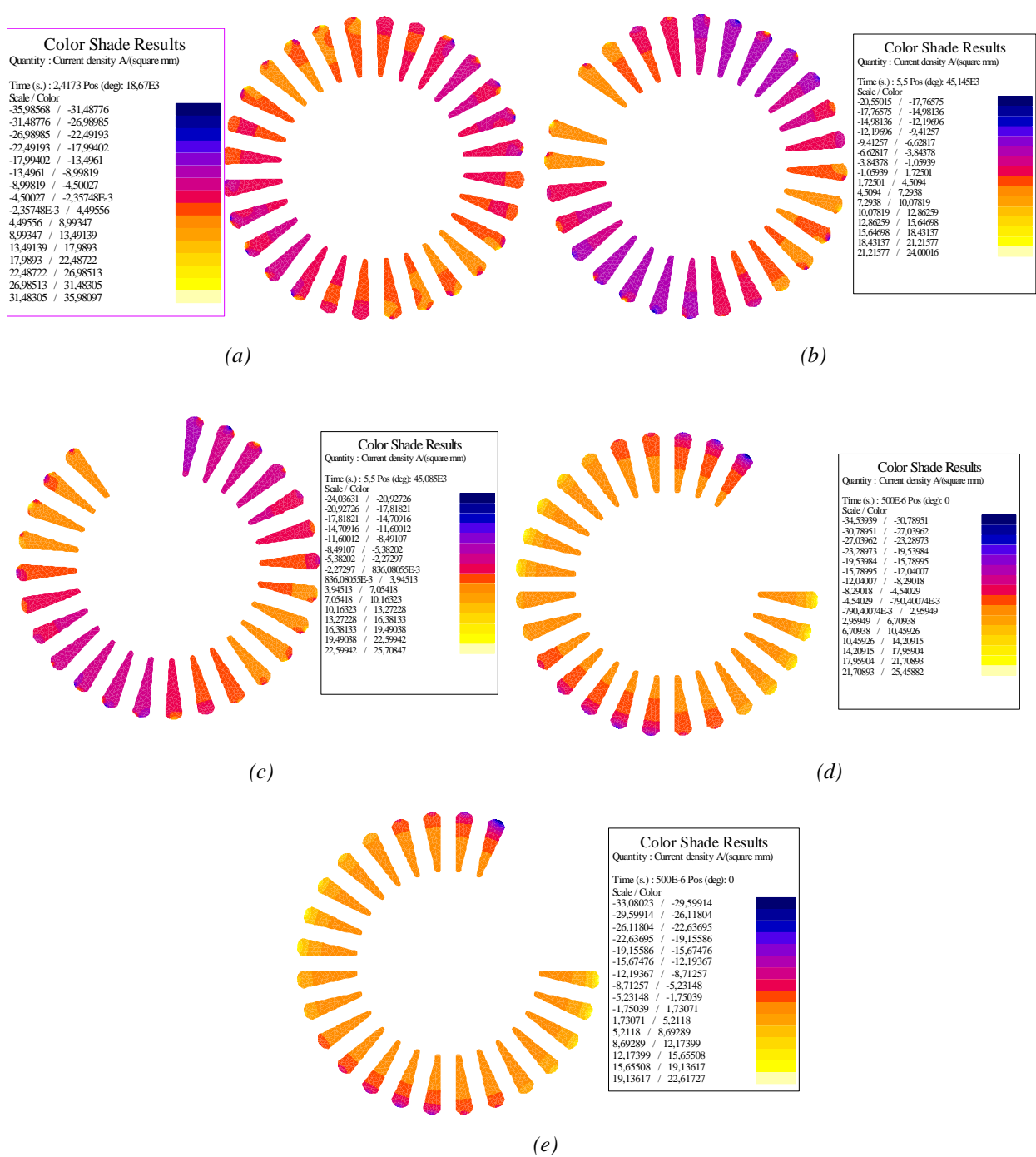


Figure IV.11 la densité du courant dans les barres rotoriques (a) machine saine ;(b) avec une barre cassée ;(c) avec trois barres cassées ;(d) avec quatre barres cassées ;(e) avec cinq barres cassées

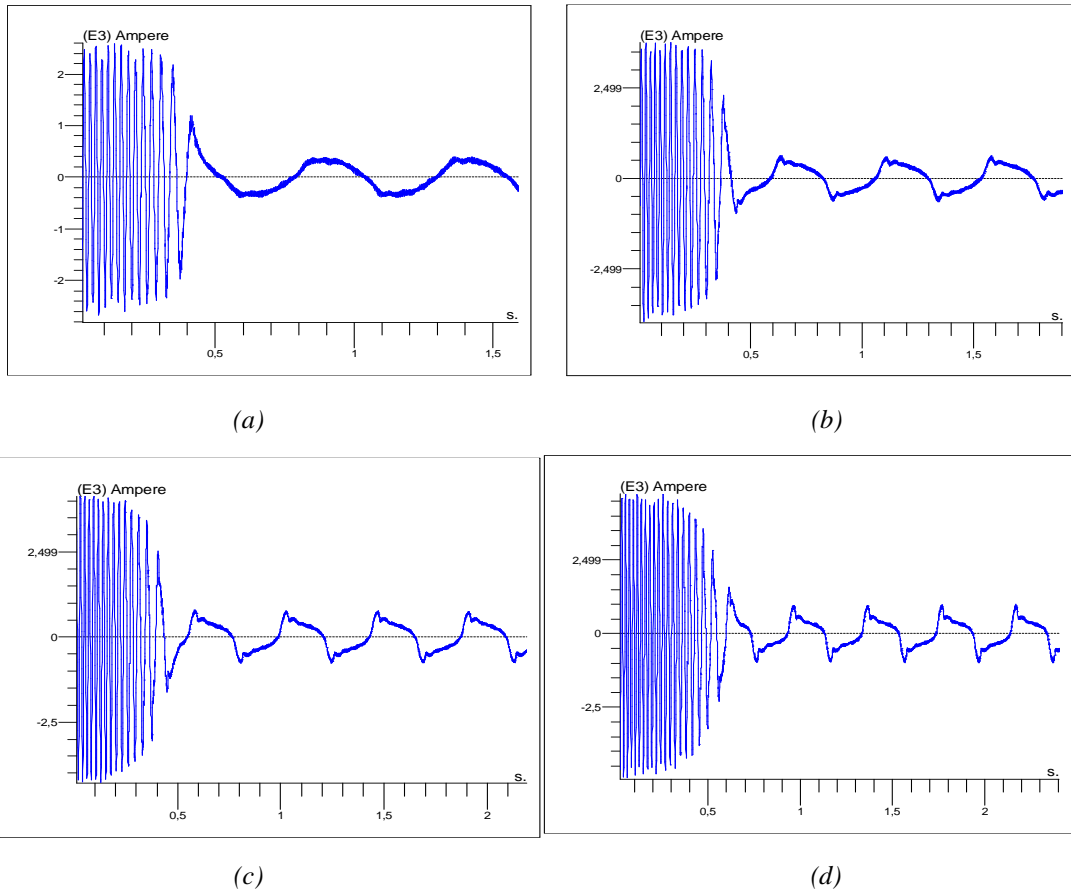


Figure IV.12 le courant dans la barre adjacente aux barres cassées ;(a) avec une barre cassée ;(b) avec trois barres cassées ;(c) avec quatre barres cassées ;(d) avec cinq barres cassées

La rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor et une augmentation de l'amplitude du courant dans la barre adjacente aux barres cassées, Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées, ce qui peut être constaté visiblement dans la répartition de la densité du courant dans les barres rotoriques. Notons que l'amplitude des oscillations est proportionnelle aussi au nombre de barres cassées.

IV.5 DETECTION DES DEFAUTS ROTORIQUES PAR L'ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Les courants des phases statoriques sont beaucoup plus intéressants à étudier car ils sont l'une des grandeurs aisément accessible à la mesure dans la machine asynchrone [8].

Dans ce qui suit, la charge est fixée à 100% de la charge nominale. La vitesse moyenne s'établit alors autour de 1442 tr/mn, soit un glissement de 3.8%.

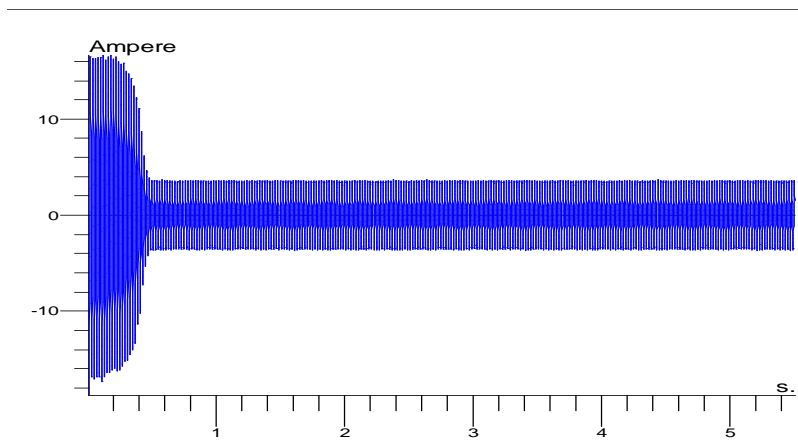


Figure IV.13 le courant statorique dans le cas d'une barre cassée

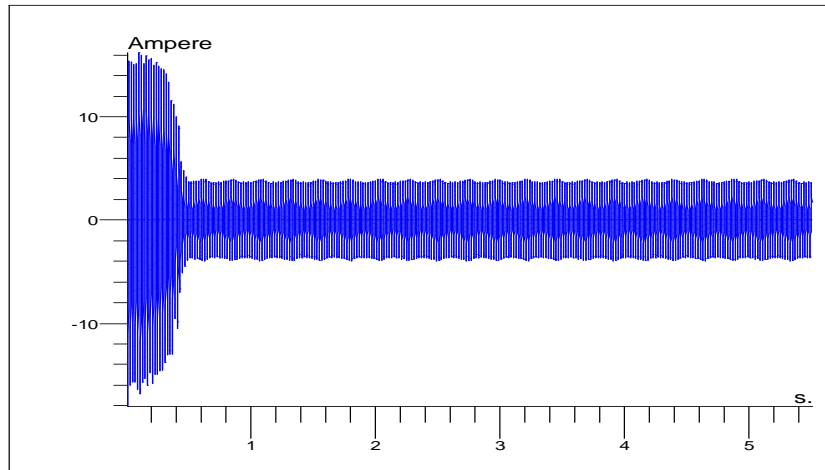


Figure IV.14 le courant statorique dans le cas de trois barres cassées

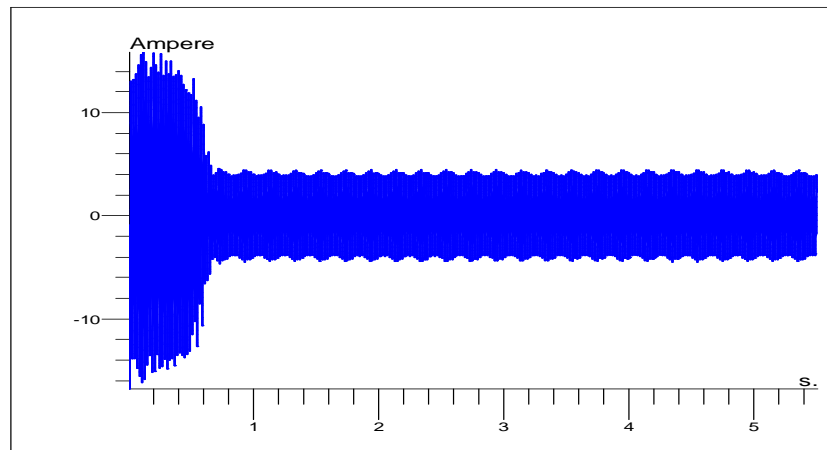


Figure IV.15 le courant statorique dans le cas de cinq barres cassées

D'après les figures IV.13, IV.14 et IV.15, on constate qu'il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Car, il est clair que l'ordre des grandeurs de la modulation est relativement faible. Seule la représentation fréquentielle du signal du courant statorique, donne des renseignements précieux sur sa composition.

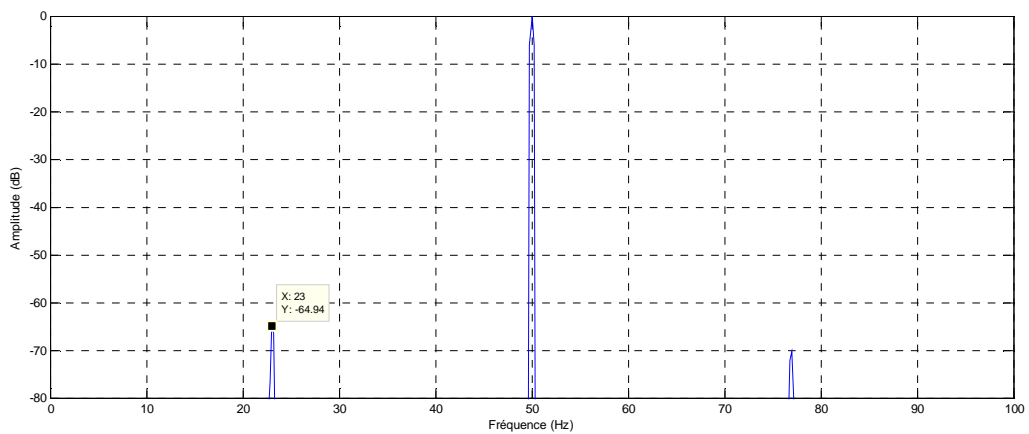


Figure IV.16 spectre du courant statorique à l'état sain (de 0 à 100Hz)

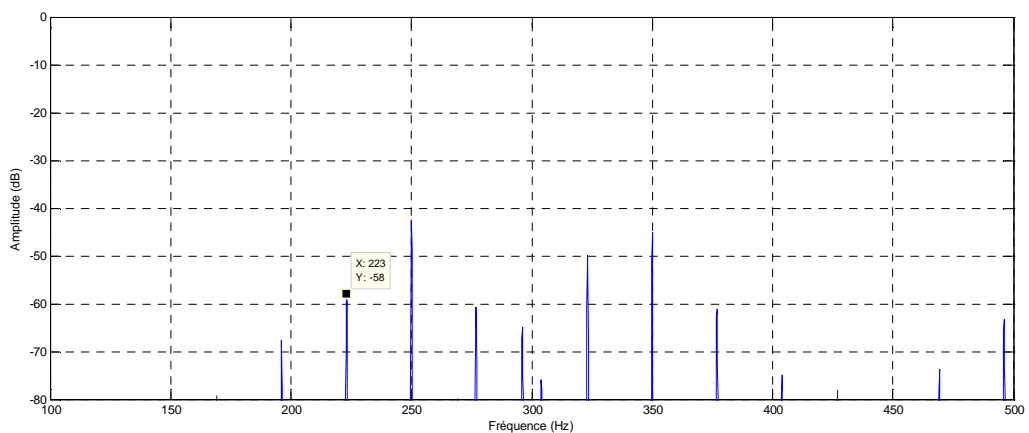


Figure IV.17 spectre du courant statorique à l'état sain (de 100 à 500Hz)

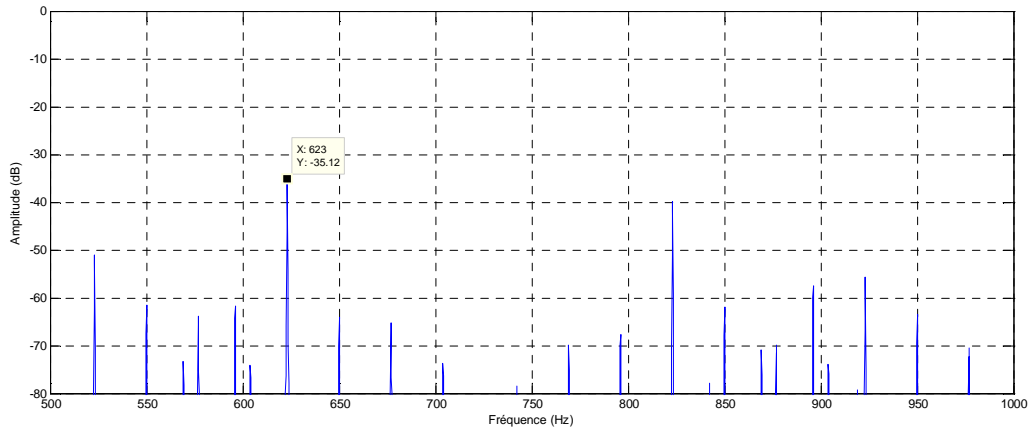


Figure IV.18 spectre du courant statorique à l'état sain (de 500 à 1000Hz)

Il est clairement visible que ce spectre est très riche en harmoniques. Pour ne pas se perdre dans l'interprétation du spectre, rappelons ici que notre objectif primaire est de vérifier la présence des harmoniques PSH dont les fréquences sont données par l'expression (I.1) et les harmoniques de temps TH ($\omega_{ns} \cdot f_s$). Afin d'améliorer la représentation, on a tracé les spectres du courant dans trois bandes fréquentielles (0—100Hz, 100—500Hz, 500—1000Hz) et on ne considérant que les amplitudes supérieures à (-80dB). La figure II.18 montre nettement l'existence des harmoniques PSH ce qui est en bonne concordance avec notre étude théorique.

$$f_{psh2} = (14(1-g)-1)f_s = 623\text{Hz}$$

D'autre part, on remarque que le contenu spectral du courant statorique ne se limite pas aux harmoniques TH et RSH. En effet, si nous portons notre attention autour des TH (50Hz, 150Hz, 250Hz,...) on observe l'existence des composantes spectrales qui contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal [9].

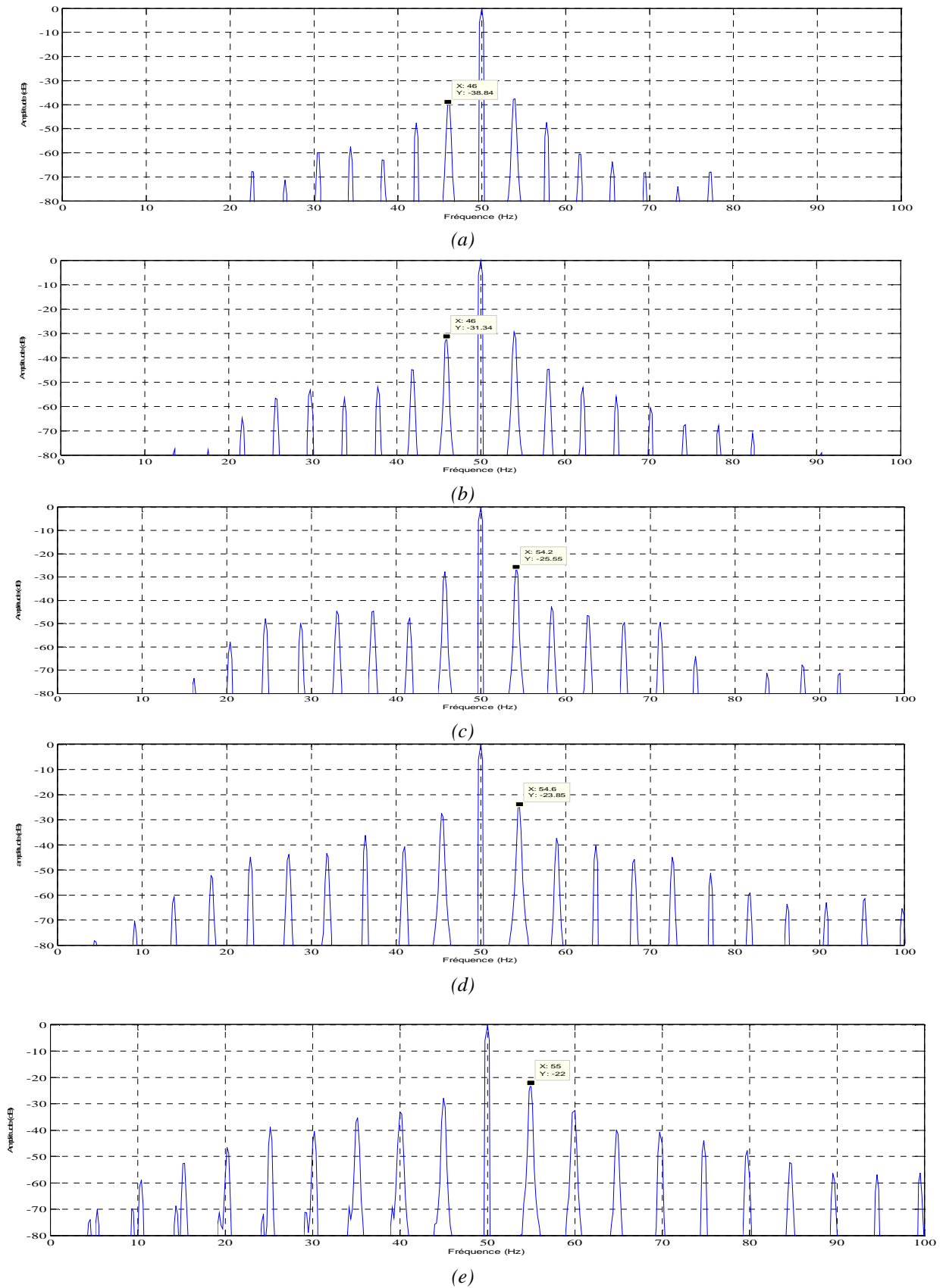


Figure IV.19 Spectre du courant statorique pour une marge de 0 à 100Hz (a) avec une barre cassée ; (b) avec deux barres cassées ; (c) avec trois barres cassées ; (d) avec quatre barres cassées ; (e) avec cinq barres cassées

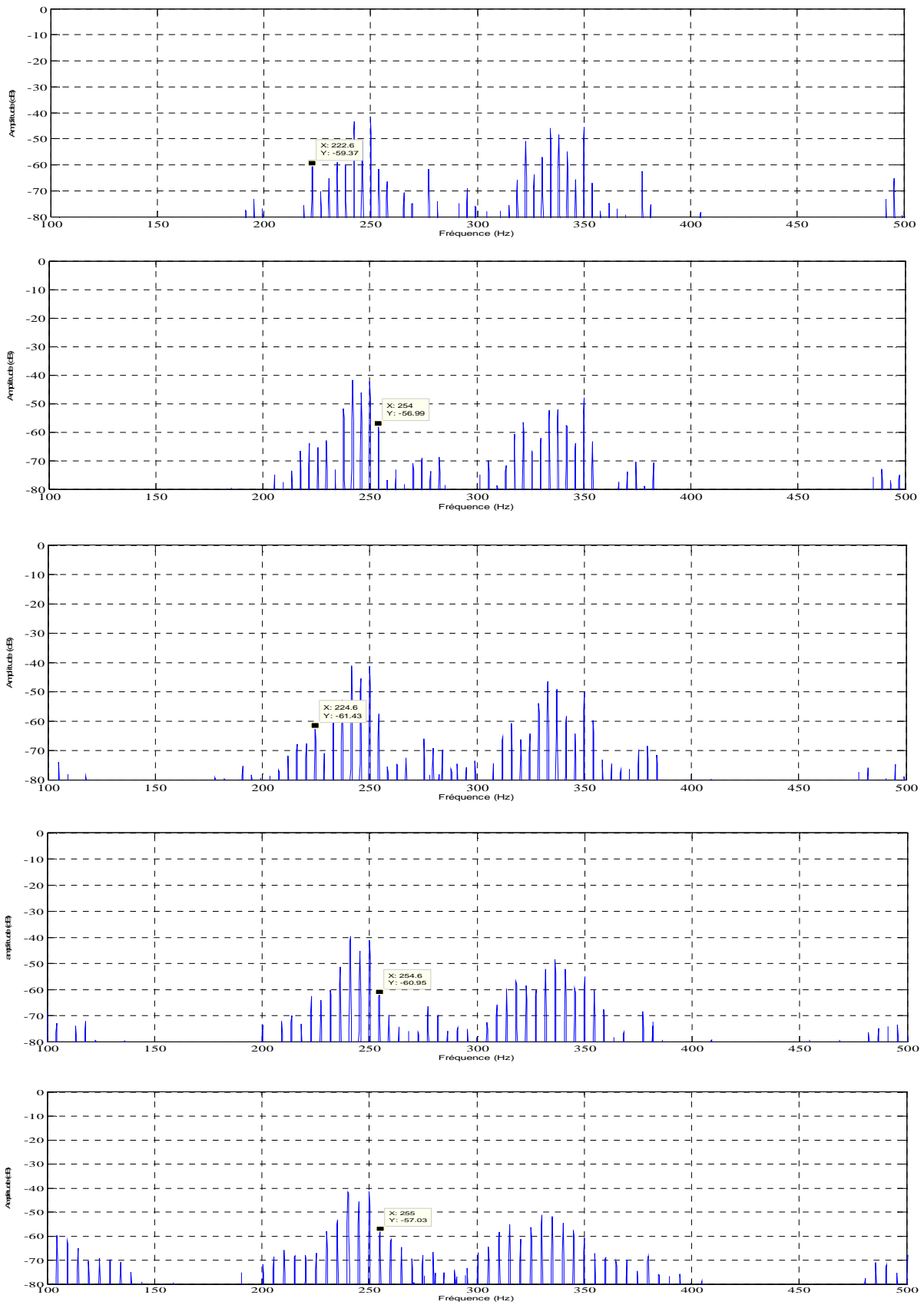
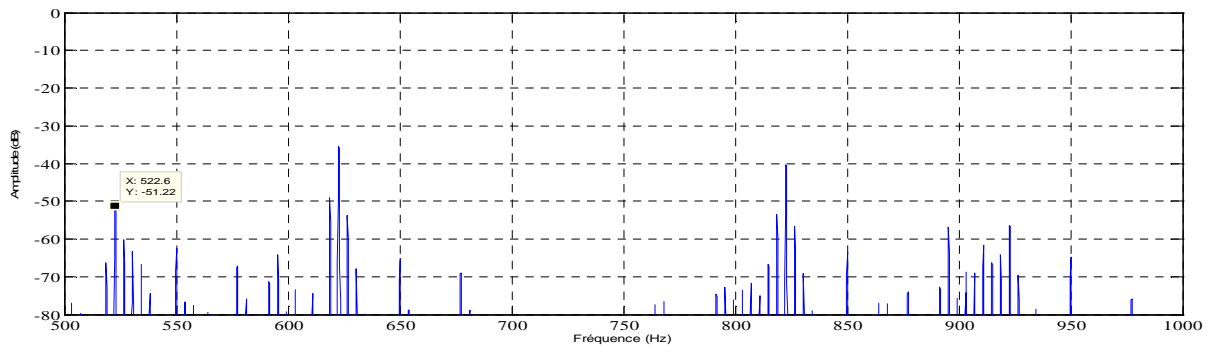
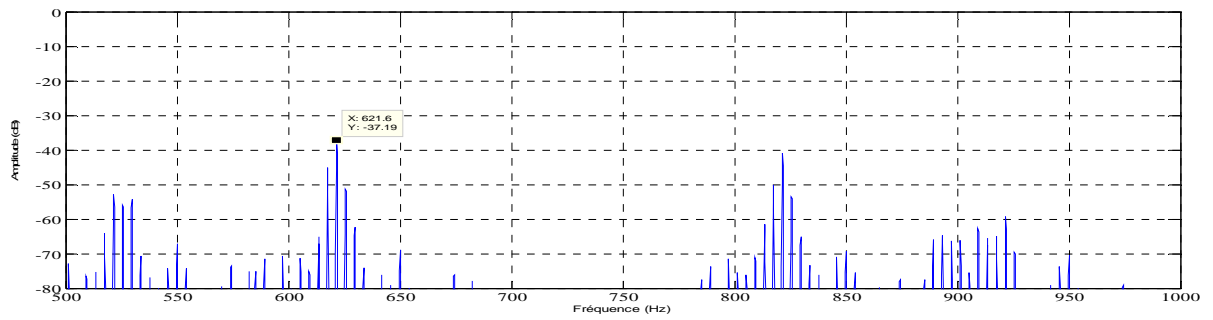


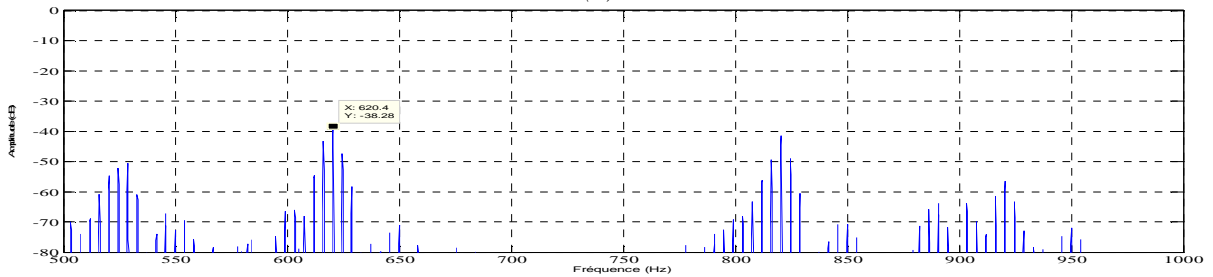
Figure IV.20 Spectre du courant statorique pour une marge de 100 à 500Hz (a) avec une barre cassée ; (b) avec deux barres cassées ; (c) avec trois barres cassées ; (d) avec quatre barres cassées ; (e) avec cinq barres cassées



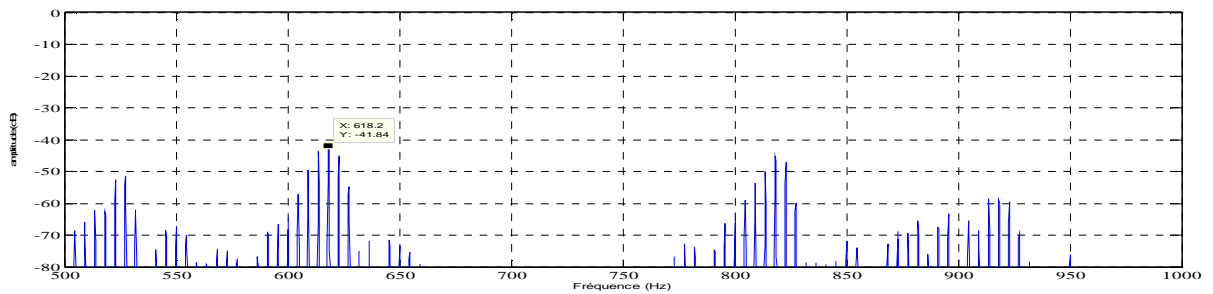
(a)



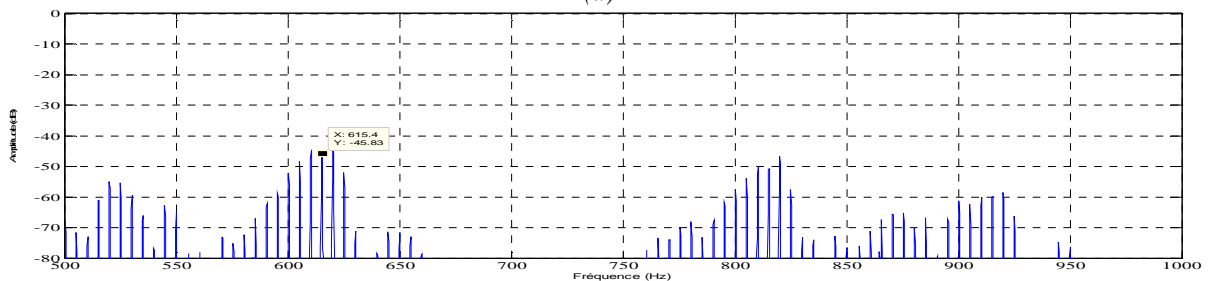
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV.21 Spectre du courant statorique pour une marge de 500 à 1000Hz (a) avec une barre cassée ; (b) avec deux barres cassées ; (c) avec trois barres cassées ; (d) avec quatre barres cassées ; (e) avec cinq barres cassées

D'après ces spectres, on remarque que l'apparition des raies $(1\pm 2g)$ croit avec le nombre de barres cassées ainsi que leurs amplitudes deviennent de plus en plus significatives. Cependant, l'amplitude de l'harmonique PSH diminue avec l'augmentation de nombre des barres cassées.

Le tableau ci-dessous regroupe les modules des raies caractérisant le défaut pour un nombre de barres cassées allant de 1 jusqu'à 5.

A la base de ces résultats s'obtiennent les tracés des courbes relatives aux lois de variation correspondantes figures IV.22 et IV.23.

| | 1barre cassée | 2barres cassées | 3barres cassées | 4barres cassées | 5barres cassées |
|-------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $(1-2g)f_s$ | -38.84 | -31.34 | -27.81 | -27.41 | -28.03 |
| $(1+2g)f_s$ | -37.66 | -29.53 | -25.55 | -23.85 | -22 |
| $(1-4g)f_s$ | -47.62 | -45.06 | -47.59 | -40.89 | -33.23 |
| $(1+4g)f_s$ | -47.42 | -44.76 | -42.84 | -37.45 | -32.66 |
| PSH | -35.56 | -37.19 | -38.28 | -41.84 | -45.83 |

Tableau IV.1 L'évaluation des raies $(1\pm 2g)f_s$ et PSH en fonction du nombre de barres cassées.

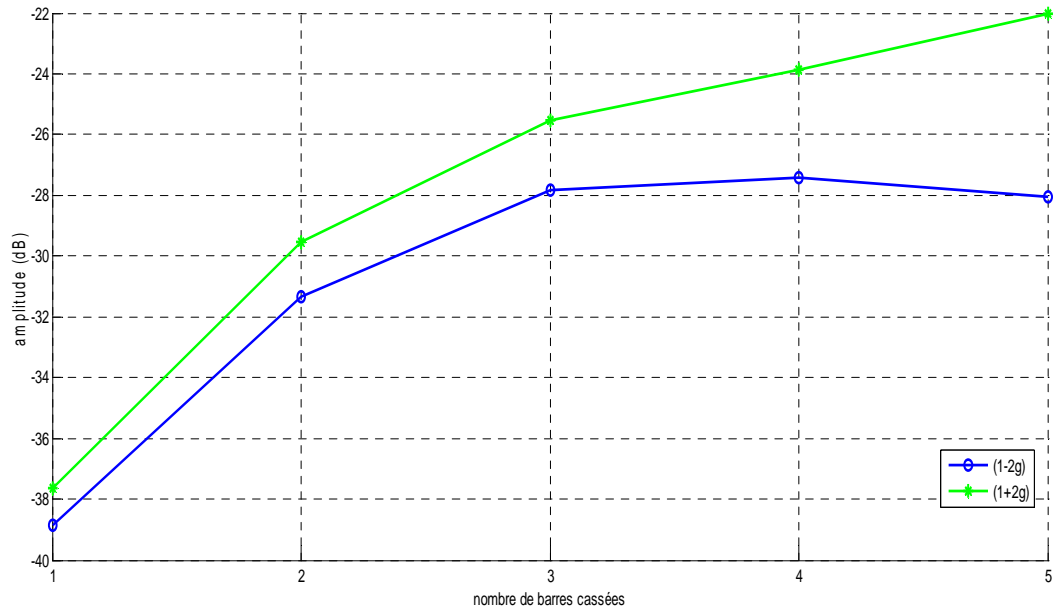


Figure IV.22 Evolution des raies $(1\pm 2g)f_s$ en fonction du nombre de barres cassées.

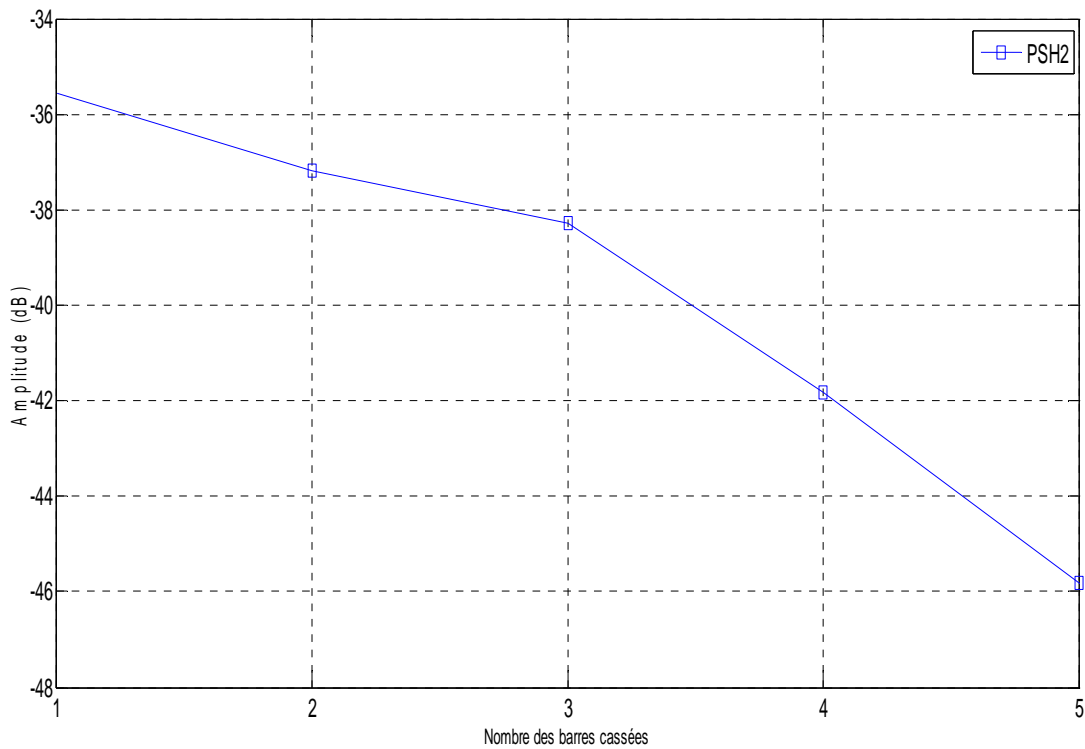


Figure IV.23 Evolution des amplitudes des PSH en fonction du nombre de barres cassées

A partir des courbes des figures IV.22 et IV.23 on constate que les amplitudes des raies évoluent avec l'évolution du degré de sévérité du défaut, ce qui paraît normal. En revanche, la loi de variation des amplitudes de PSH est inversement proportionnelle au degré de sévérité du défaut.

IV.6 CONCLUSION

Nous avons développé dans ce chapitre un modèle à base de la méthode des éléments finis où nous pouvons inclure les défauts au rotor. La simulation nous a permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique.

Nous avons montré aussi, en régime transitoire, le fonctionnement du moteur asynchrone devient fortement altéré à partir de la rupture de trois barres consécutives au rotor. Ce défaut connaît un effet cumulatif lors de la rupture des barres. Les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément. La cassure des barres fait apparaître des oscillations sur les courants, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.

Une analyse harmonique des courants statoriques permet de voir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques $(1\pm 2g)f_s$.

Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts rotorique sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor. Par contre, le seul inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long. Un seul cas d'étude dure 3 jours par un ordinateur de 24G de RAM et μp . Intel i7 de 2.3GHz. A noter aussi que la mémoire à réserver dans le disque dur doit être très grande (100Go pour une solution de 6 secondes avec un pas de 0.0001s).

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en vue du diagnostic des défauts rotoriques. La rupture des barres a été l'objet de notre étude.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter cette technique.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle éléments finis qui tient compte de la topologie et de dimensions de la machine. Ce modèle présente l'avantage qu'il pris en considération le circuit magnétique de fer cela conduit à introduire la courbe B(H) avec saturation dans les calculs.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes $(1\pm 2k)f_s$ caractérisant le défaut de barres rotoriques. En suite, nous avons montré l'influence du nombre de barres cassées sur ces composantes et sur les PSH. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces harmoniques augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut. Cependant, que l'amplitude de PSH subit une diminution lors que le nombre de barres cassées croit.

De plus que l'analyse spectrale du courant des phases statoriques, notre modèle qui prend en compte des harmoniques d'espace de la saturation des matériaux magnétiques et de l'effet de peau dans les barres rotoriques, permet d'étudier d'autres types des défauts (excentricité statique, dynamique ou mixte, court-circuit statorique et cassure d'anneaux de court-circuit...etc) et de donner plus d'informations sur la répartition des lignes du champ, de l'induction et de densité du courant dans la machine. Il appréhende aussi les impacts magnétiques et thermiques locaux de ces défauts. L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long.

En perspective, nous proposons à court terme d'étudier l'impact de déséquilibre de tension d'alimentation et les oscillations de la charge sur le diagnostic des ruptures de barres. Enfin, il nous semble intéressant d'avoir une analyse continue du courant afin de surveiller le fonctionnement de la machine en ligne, et d'assurer ainsi une maintenance préventive.

Bibliographie :

- [1] A. Ghouggal, «*Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts*» mémoire de magister, Université de Batna 2005.
- [2] N. Halem, «*Modélisation des Machines Asynchrones en vue du Diagnostic Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Eléments Finis*» mémoire de magister, Centre universitaire d'El-Oued 2010.
- [3] S.Bazine, «*Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défauts*» thèse de doctorat, Université de Poitiers 2009.
- [4] R. Casimir, «*Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes*», Thèse de doctorat, l'école doctorale d'électronique, d'électrotechnique et d'automatique de Lyon, Décembre 2003.
- [5] D.E. Khoudja, «*Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction*» thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
- [6] 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.
- [7] IEEEComitee. «*Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I and Part II*». IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, no. 4, pages 853 - 872, July - Aug. 1985.
- [8] EPRI. Improved motors for utility applications industry assessment study, volume 1. EPRI EL-2678, Oct. 1982.
- [9] O. V. Thorsen & M Dalva. "A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 5, pages 1186 - 1196, Sept. - Oct. 1995.
- [10] O. V. Thorsen & M. Dalva. "Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry". IEEE Transactions on Industry

Applications, vol. 35, no. 4, pages 810 {818, July - Aug. 1999.

- [11] G. Houdouin, «*Contribution à la Modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts rotoriques*» thèse de doctorat, Université de Havre 2004.
- [12] J.Sprooten, «*Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques*» thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles 2007.
- [13] G.Rostaing, «*Diagnostic de défauts dans les entraînements électriques*», Thèse de Doctorat, laboratoire d'électrotechnique de Grenoble, 1997.
- [14] G.Zwinngelsten, «*Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels* », Ed. Hermès Paris. 1995.
- [15] G.Dedier, «*Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*» thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
- [16] M. Sahraoui, «*Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*» thèse de doctorat, Université de Biskra 2010.
- [17] J. Penman, J. Sedding, H.G. Lloyed, B.A. Fink, «*Detection and localisation of interturn short circuits in the stator winding of operating motors*» *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, December 1994, pp. 652-658.
- [18] W.T. Thomson, «*On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure*» in *Proceeding of IEMDC 2001*.
- [19] W.T. Thomson, M. Fenger, «*Current signature analysis to detect induction motor faults*» *IEEE Industry Applications Magazine*, july/August 2001, pp. 26-34.
- [20] D.G. Dorrell, N.C. Paterson, and J.F. Watson, «*The causes and contification of sideband currents for use in rotor fault detection systems for cage induction motors*» in *Proceeding of ICEM*, vol.2, Vigo-Spain, 1996, pp. 414-119.
- [21] M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, «*Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques*» *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 14, no. 1, January 1999, pp. 14-22.

- [22] J.R. Cameron ,W.T. Thomson and A.B. Dow, «*Vibration and current monitoring for detecting air-gap eccentricity in large induction motors*» *IEE* ,vol 133, Pt. B, no. 3, May 1986, pp 155-163.
- [23] D.G. Dorrell, W.T. Thomson and S.Roach, «*Analyse of air-gap flux, current, and vibration signals as function of combination static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors*» *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 33, no. 1, January /February 1997, pp. 24-34.
- [24] A. Zorig, «*Identification des Machines Asynchrones en Vue de leur Diagnostic*», mémoire de magister, Université de Setif 2010.
- [25] M. Feliachi, «*Contribution au Calcul du Champ Electromagnétique par la Méthode des Eléments Finis en Vue d'une Modélisation Dynamique de Machines Electriques*», thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, France 1981.

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

La surveillance est un moyen pour garantir le bon fonctionnement d'une installation industrielle. Le diagnostic qui est une partie de la surveillance, a pour objectif de détecter et de localiser un défaut, d'une façon précoce, avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle.

La compréhension du fonctionnement avec et sans défaut, ainsi que la vérification des algorithmes de détection des défauts, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible.

Dans cette logique, nous proposons un modèle éléments finis, ce qui permettra la prise en compte du circuit magnétique dans le modèle de la machine et pour que nous adoptons une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques, une analyse spectrale du courant statorique a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier rapide afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres.

Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT, PSH cassure de barre.

ملخص:

ينصوي هذا العمل تحت إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة. حالياً، تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر المفتاح في أغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها و ثمنها المنخفض نسبياً. بالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلى إجهادات مختلفة تؤثر على أدائها و مدة حياتها الافتراضية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة، و هذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر.

المراقبة هي وسيلة لضمان السير الحسن للتجهيزات الصناعية و التشخيص يمثل جزءاً منها، الغاية منه اكتشاف و تحديد الخطأ قبل أن يؤدي إلى عطل السلسلة الإنتاجية كلية. لأجل هذا كان لزاماً إيجاد تمثيل يصف أداء الماكينة بأدق شكل ممكن. في هذا العمل نقترح تمثيل الماكينة بطريقة العناصر المنتهية التي تتيح لنا أن نأخذ بعين الاعتبار الدارة المغناطيسية للماكينة. و كذا تبني التيار الكهربائي في الأطوار الثلاثة كوسيلة لاكتشاف الأخطاء من خلال مراقبة مختلف التواترات المتواجدة فيه و المعيرة عن الأخطاء.

الكلمات المفتاحية: الماكينة اللامتزامنة، طريقة العناصر المنتهية، التشخيص،