



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Machine électrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**SAKER WALID**

Le : samedi 23 juin 2018

# Diagnostic des défauts de machine asynchrones par analyse la puissance instantanée

---

### Jury :

Mr.	Megherbi Ahmed Chaouki	MCA	Mohamed Khider de Biskra	Président
Mr.	Guedidi Salim	MCB	Mohamed Khider de Biskra	Encadreur
Mm.	Rahoua Naima	MAA	Mohamed khider de biskra	Examineur

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 de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Machine Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Diagnostic des défauts de la machine  
asynchrone par analyse la puissance  
instantanée*

Présenté par :

Saker Walid

Avis favorable de l'encadreur :

MCB. Guedidi Salim

Avis favorable du Président du Jury

MCA. Megherbi Ahmed Chaouki

Cachet et signature



# *Dédicace*

*Pour l'esprit pur de mon Père*

*A ma Mère*

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*A tout ma Famille et mes cher Amis*

## ***Remerciements.***

***La première des pages qui reste la dernière à écrire... et voilà enfin le moment d'achever ces cinq années passées à l'Université Mohammed Khaider. Et avant tout, je remercie ALLAH tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permis d'arriver à ce stade là.***

***A monsieur :Guedidi Salim, pour le soutien qui nous a apporté pendant la période de réalisation de ce modeste travail ainsi pour ses conseils précieux et surtout pour la totale confiance qui nous a accordée.***

***A monsieur : Le professeur Aloui Lotfi et le doctorant Khaled Laadjel et mon amie chellouai nacereddine mohammed***

***Pour toutes les applications qui concerne du logiciel FLUX 2D***

***Aux membres du jury, qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.***

***Et en fin nous tenons vivement à remercier tous nos ami(e)s, chacun à son nom.***

## Liste des tableaux

---

### **Chapitre II            modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain**

Tableau. II.1. Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone *étudiée*.....33

---

**Liste des figures**
**Chapitre I      Etat de l'art sur les défaillances des machines électriques**

<b>Fig. I.1 :</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	06
<b>Fig. I.2 :</b> Coupe schématique de la machine asynchrone.....	06
<b>Fig.I.3:</b> Stator d'une machine asynchrone.....	07
<b>Fig. I.4 :</b> Coupe schématique de la constitution du stator.....	07
<b>Fig. I.5 :</b> Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.....	07
<b>Fig. I.6:</b> Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance.....	08
<b>Fig. I.7 :</b> Répartition des défauts pour une machine de grande puissance.....	08
<b>Fig. I.8 :</b> Représentation schématique des différents courts-circuits au stator.....	09
<b>Fig. I.9:</b> Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.....	13
<b>Fig. I.10 :</b> Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	14
<b>Fig. I.11 :</b> Structure d'un roulement à billes.....	17
<b>Fig. I.12 :</b> différente défauts de roulement à billes.....	17
<b>Fig. I.13 :</b> Représentation temporelle vers fréquentielle.....	20

**Chapitre II      modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain**

<b>Fig. II.1 :</b> Fonction d'interpolation d'un élément.....	30
<b>Fig. II.2 :</b> L'enchaînement des programmes de Flux 2D.....	31
<b>Fig. II.3 :</b> les dimensions de la machine .....	32
<b>Fig. II.4 :</b> Bobinage statorique.....	33
<b>Fig. II.5 :</b> circuit magnétique de la MAS.....	34
<b>Fig. II.6 :</b> les points de maillage.....	36
<b>Fig. II.7 :</b> répartition du maillage.....	36
<b>Fig. II.8 :</b> la courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique.....	37
<b>Fig. II.9 :</b> le circuit électrique d'alimentation.....	38
<b>Fig. II.10 :</b> Circuit équivalent de la cage rotorique.....	38
<b>Fig. II.11 :</b> les tensions d'alimentation $V_1$ , $V_2$ et $V_3$ .....	39
<b>Fig. II.12 :</b> la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ;(b) en régime permanent.....	41
<b>Fig. II.13 :</b> l'induction B à vide(a) au démarrage ;(b) en régime permanent.....	42

<b>Fig. II.14</b> : la distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ;(b) en régime Permanent.....	43
<b>Fig. II.15</b> : l'induction B en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent.....	44
<b>Fig. II.16</b> : Forme d'onde du courant Phase V_U du moteur asynchrone à l'état sain vide.....	45
<b>Fig. II.17</b> : Vitesse de rotation du moteur asynchrone à l'état sain à vide.....	45
<b>Fig. II.18</b> : Couple électromagnétique du .moteur asynchrone à l'état sain a vide.....	45
<b>Fig. II.19</b> : Courant dans une barre rotorique1 du moteur asynchrone à l'état sain a vide.....	45
<b>Fig. II.20</b> : La puissance instantanée de la Phase V_U du moteur asynchrone à l'état sain à vide.....	45
<b>Fig. II.21</b> : Forme d'onde du courant statorique phase V_U du moteur asynchrone l'état sain en charge.....	46
<b>Fig. II.22</b> : Vitesse de rotation du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	46
<b>Fig. II.23</b> : Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	46
<b>Fig. II.24</b> : La puissance instantanée de la Phase V_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	46
<b>Fig. II.25</b> : Courant dans une barre rotorique du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	47
<b>Fig. II.26</b> : Spectre du courant statorique phase V_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	47
<b>Fig. II.27</b> : Spectre du Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain fonction en charge.....	48
<b>Fig. II.28</b> : Spectre de la puissance instantanée de la Phase V_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge.....	48

### CHAPITRE III Résultats de simulation de la MAS en état de défaut rotorique et

<b>Fig.III.1</b> : Le courant statorique phase V_U avec zoom pour : une (a) deux (b) trois barres cassées (c).....	51
<b>Fig.III.2</b> : La puissance instantanée phase V_U avec zoom pour : une (a) deux (b) trois barres cassées (c).....	52
<b>Fig.III.3</b> : La vitesse de rotation et zoom avec une barre cassée.....	53
<b>Fig.III.4</b> : La vitesse de rotation et zoom avec deux barres cassées.....	53
<b>Fig.III.5</b> : La vitesse de rotation et zoom avec trois barres cassées.....	53
<b>Fig. III.6</b> : Le couple électromagnétique et zoom avec une barre cassée.....	54
<b>Fig. III.7</b> : Le couple électromagnétique et zoom avec deux barres cassées.....	54
<b>Fig.III.8</b> : Le couple électromagnétique et zoom avec trois barres cassées.....	54



<b>Fig. III.9 :</b> Le courant dans la barre cassée (barre 1).....	55
<b>Fig.III.10 :</b> Le courant dans la barre adjacente aux barres cassées ;(a) avec une barre cassée ;(b) avec deux barres cassées ;(c) avec trois barres cassées.....	55
<b>Fig. II.11 :</b> La distribution des lignes du flux au démarrage (a) machine saine ;(b) avec une barre Cassée ;(c) avec deux barres cassées ;(d) avec trois barres cassées.....	56
<b>Fig. III.12 :</b> L'induction magnétique (a) avec une barres cassées ;(b) avec deux barres cassées (c) avec trois barres cassées.....	59
<b>Fig. III.13 :</b> Spectre de la puissance instantané état de cassure 1 barre avec déférente charge.....	60
<b>Fig.III.14 :</b> Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 1 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 15Hz).....	61
<b>Fig.III.15 :</b> Spectre de la puissance instantané état de cassure2 barre avec déférente charge.....	61
<b>Fig.III .16 :</b> Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 2 barre pour différentes Charges (Basse fréquence de 0 à 15Hz).....	62
<b>Fig. III.17 :</b> Spectre de la puissance instantané état de cassure3 barre avec déférente charge.....	62
<b>Fig.III .18 :</b> Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 3 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 16Hz).....	63
<b>Fig. III.19 :</b> Spectre de la puissance instantané état en charge (75%) avec déférente cassure de barre.....	63
<b>Fig.III .20.</b> Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 3 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 16Hz).....	64

## Liste des symboles

$\mu$  : Perméabilité magnétique (H/m).

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

$\vec{H}$  : 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 ( $\text{A}/\text{m}^2$ ).

$\nu$  : est la rélectivité magnétique.

$\omega$  : pulsation électrique.

$e$  : Numéro d'élément.

$n_e$  : Le nombre totale des éléments du domaine.

$f_e$  : La fréquence d'échantillonnage.

$T_a$  : Le temps d'acquisition.

$N_e$  : Le nombre des échantillons.

$\Delta f$  : La résolution fréquentielle.

$g$  : glissement.

$p$  : nombre de paire de pôles.

$f_s$  : fréquence de l'alimentation.

$N_e$  : nombre d'encoches rotoriques.

$f_{exc}$  : Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.

$f_{int}$  : Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.

$f_{ext}$  : Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.

$f_{bille}$  : Fréquence au défaut de bille.

$f_{cage}$  : Fréquence Défaut de cage de bille.

$d$  : diamètre des billes.

$D$  : diamètre de la cage.

$\Phi$  : angle de contact entre la bille et les bagues.

$V_U, V_V, V_W$  : Les tensions des phases du modèle de la machine étudiée.

$I_U, I_V, I_W$  : Les courants des phases du modèle de la machine étudiée.

## 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, et une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique.

A partir de la analyse spectrale de la puissance instantanée a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de cassure de barre

**Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT**

ملخص :

ينضوي هذا العمل ضمن إطار تشخيص الأخطاء في المكثات الكهربائية اللامتزامنة .حاليا تعتبر الماكثة اللامتزامنة العنصر المفتاح في اغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها وثمنها المنخفض نسبيا. بالرغم من هذه الاجابيات قد تتعرض هذه الماكثة الى اجهادات مختلفة تؤثر على ادائها و مدة حياتها الافتراضية مما يؤدي ال خسائر اقتصادية معتبرة وهذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر.

المراقبة هي وسيلة لضمان السير الحسن التجهيزات الصناعية والتشخيص يمثل جزءا منها الغاية منه اكتشاف وتحديد الخطا قبل ان يؤدي ال عطل السلسلة الانتاجية كليا لاجل هذا كان لزاما إيجاد تمثيل يصف اداء الماكثة بادق شكل ممكن.

في هذا العمل نقترح تميل الماكثة بطريقة العناصر المنتهية و اجراء مقارنة للماكثة في الحالة العادية و في حالة وجود الأعطال وهذا من خلال التحليل الطيفي لتيار الجزء المخرض في الماكثة و ذلك بمساعدة تحويل فورييه و الذي يبين وجود الشوائب و التشوهات من عدمه و معرفة ماهية العطل

الكلمات المفتاحية: تحويل فورييه , التشخيص. التحليل الطيفي , طريقة العناصر المنتهية , الماكثة اللامتزامنة



---

**Sommaire**

<b>CHAPITRE I</b>	<b>état de l'art de la machine asynchrone</b>
I.1 introduction.....	03
I.2 définition de quelques termes liés au diagnostic.....	03
I.3 constitution de la machine asynchrone.....	05
I.3.1 stator.....	06
I.3.2 rotor.....	07
I.3.3 les paliers.....	08
I.4 l'étude statistique des défauts.....	08
I.5 types des défauts de la machine asynchrone.....	09
I.5.1 défaillances au stator.....	09
I.5.1.1 défauts d'isolant dans un enroulement.....	09
I.5.1.2 court-circuit entre spires.....	10
I.5.1.3 court-circuit entre phases.....	11
I.5.1.4 court-circuit phase/bâti.....	11
I.5.1.5 défauts du circuit magnétique.....	12
I.5.2 défaillances au rotor.....	12
I.5.2.1 rupture de barres rotoriques.....	12
I.5.2.2 rupture de portion d'anneau.....	13
I.5.2.3 excentricité.....	14
I.5.3 défaillances d'ordre mécanique.....	16
I.5.3.1 défauts des roulements.....	16
I.5.3.2 défauts de l'arbre moteur.....	18

---

I.5.3.3 défauts créés par les flasques.....	18
I.6 méthodes de détection des défauts dans les machines électriques.....	19
I.6.1 méthode de diagnostic sans modèle.....	19
I.6.1.1 méthode par traitement de signal .....	19
I.6.1.1.1 transformée en série de fourier.....	20
I.6.1.1.2 les techniques de types non stationnaires.....	20
I.6.1.2 diagnostic par mesure des vibrations mécaniques.....	21
I.6.1.3 diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	22
I.6.1.4 diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites.....	22
I.6.1.5 diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	22
I.6.1.6 diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	22
I.6.1.7 diagnostic par mesure du courant statorique.....	23
I.6.1.8 diagnostic par analyse du vecteur de park.....	23
I.6.1.9 diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (ai).....	23
I.6.2 méthode de diagnostic avec modèle.....	24
I.7 conclusion.....	24
<b>CHAPITRE II           modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain</b>	
II.1 introduction.....	25
II.2 la méthode des éléments finis.....	25
II.2.1 formulations.....	26
II.2.2 le modèle employé.....	27
II.3 le principe de la MEF.....	29
II.4 présentation du logiciel flux2d.....	30
II.5 construction du modèle de la machine asynchrone.....	31

---

---

II.5.1 les donnés de la machine étudiée.....	32
II.5.2 procédure de construction du modèle par flux2d.....	35
II.6 simulations de la machine asynchrone à l'état sain.....	40
II.6.1 résultat de simulation.....	40
II.7 conclusion.....	49
<b>CHAPITRE III            résultats de simulation de la MAS en état de défaut rotorique et diagnostic</b>	
III.1 introduction.....	50
III.2 effet du nombre de barres cassées sur les performances de la machine.....	51
III.2.1 grandeur courant.....	51
III.2.2 grandeur puissance instantanée.....	52
III.2.3 grandeur vitesse.....	53
III.2.4 grandeur couple.....	54
III.3 effet de la barre casse sur les barres adjacentes.....	55
III.4 effet du nombre de barres cassées sur la carte du champ de la machine.....	56
III.5 détection des défauts rotoriques (défaut cassure de barre) par l'analyse spectrale de la puissance instantanée.....	60
III.6 conclusion .....	64
Conclusion générale.....	65
Bibliographie.....	66

## **INTRODUCTION GENERALE**

La machine asynchrone spécialement le moteur asynchrone joue un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation, du temps minime d'entretien, de sa robustesse et de son faible coût d'achat. Mais la machine est soumise de plus en plus à des perturbations auxquelles elle est devenue sensible, ce qui provoque à la machine des défaillances.

La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et économique. Le diagnostic nécessite la connaissance d'une terminologie variée comme par exemple, la sûreté de fonctionnement qui peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisée par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. Multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées.

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 rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage, et leurs origines. Puis, nous présenterons les différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage. Nous montrerons dans un premier temps les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, sans défauts. afin de simuler les ruptures de barres, objectif de notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé la machine asynchrone dans les états défaillants d'une, de deux et de trois barres cassées et sous plusieurs charges. Les résultats sont



conformes à ceux de la littérature. Nous présenterons l'analyse spectrale de la puissance instantanée (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 ainsi que la charge sur ces harmoniques et sur la carte du champ de la machine.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

## I.1 INTRODUCTION

Bien que la machine asynchrone soit réputée par ses qualités de robustesses et de faible coût de construction, il arrive néanmoins que celle-ci présente une panne électrique ou mécanique, la responsabilité de garantir la disponibilité des systèmes repose sur la maintenance et pour accomplir ces fonctions, la maintenance nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes, la surveillance donne une réponse aux besoins de ces d'informations.

Le but de ce premier chapitre est, de présenter un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones triphasées à cage. Nous présentons dans un premier temps quelques définitions liées au diagnostic, puis les constitutions de la machine asynchrone et les différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone et provoquer des pannes. Ensuite, nous décrivons les méthodes les plus couramment rencontrées pour le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone.

## I.2 DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC

### ✓ **Défaillance**

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal, le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

### ✓ **Défaut**

Est une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport à un comportement usuel, nominal ou acceptable.

### ✓ **Diagnostic**

Ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé, on détermine par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus (ou un raisonnement logique) le degré de défaillance du système, l'origine de ses défaillances et leurs causes.

### ✓ **Disponibilité**

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire et chaque fois qu'on le sollicite; on assure ainsi une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévoir tout vieillissement ou défaillance.

**✓ Fiabilité**

Capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne, elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.

**✓ La Maintenance**

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise ». [CHEL2017] Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- ✓ Maintenance corrective.
- ✓ Maintenance préventive : - systématique.- conditionnelle.

**➤ Maintenance corrective**

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité. [SAH. 10]

**➤ Maintenance préventive**

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...). Les buts de la maintenance préventive, sont [SAH 10]:

- ✓ Augmenter la durée de vie des équipements.
- ✓ Diminuer le budget de la maintenance.
- ✓ Supprimer les causes des accidents graves.

**- Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système.

Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont

le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...).

#### **-Maintenance préventive conditionnelle**

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...).

##### ✓ **Maintenabilité**

La maintenabilité caractérise la facilité de maintenance du procédé, elle peut être largement augmentée par la mise en œuvre d'un système de diagnostic.

##### ✓ **Sécurité**

Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel.

##### ✓ **Sûreté**

La sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système ; elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

### **I.3 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

La machine asynchrone à cage ou MAS est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique. Les parties constitutives de la machine asynchrone sont:

- le stator: partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les Enroulements chargés de magnétiser l'entrefer,
- le rotor: c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur L'arbre de la machine portant un enroulement injecté,
- les organes mécaniques: permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [BES.16].

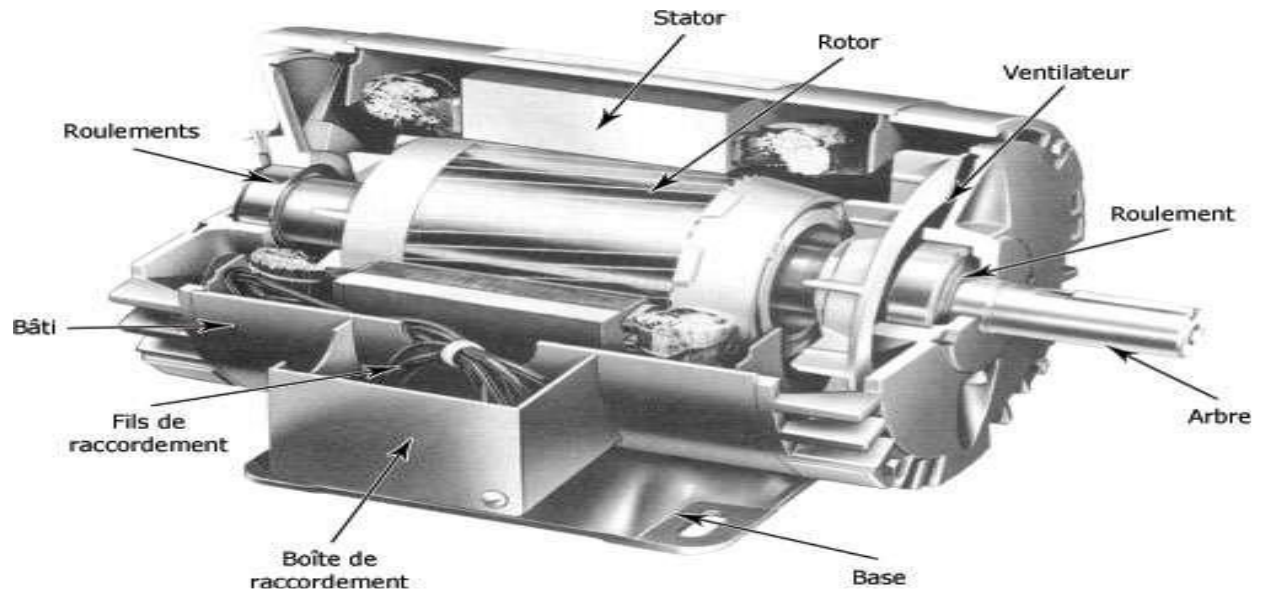


Fig. I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

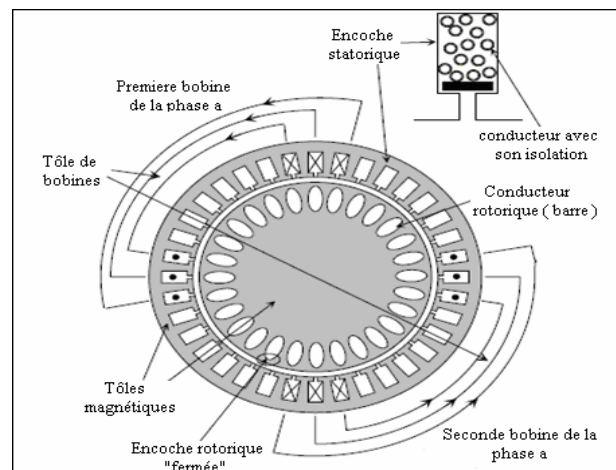


Fig. I.2. Coupe schématique de la machine asynchrone.

### I.3.1 Stator

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant

d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [HAL2015].

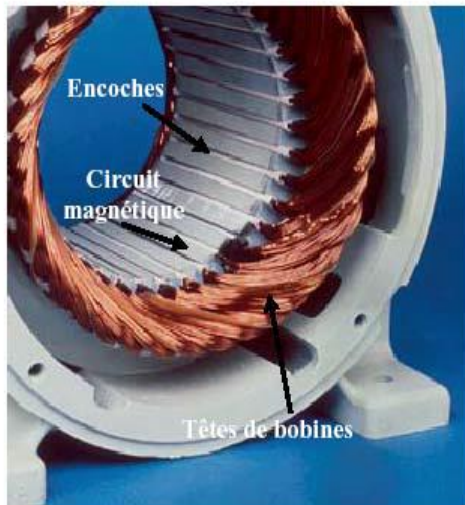


Fig. I.3. Stator d'une machine asynchrone.

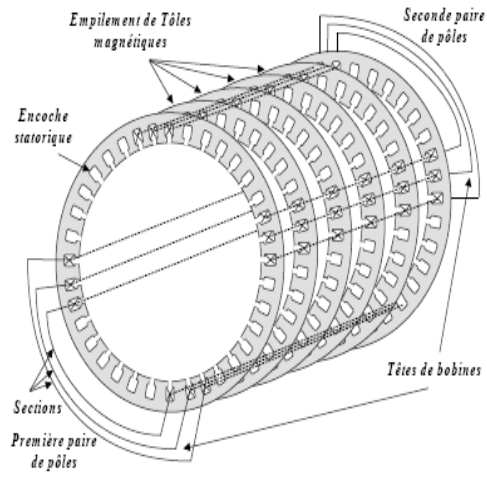


Fig. I.4. Coupe schématique de la constitution du stator

### I.3.2 Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres Rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [HAL2015].

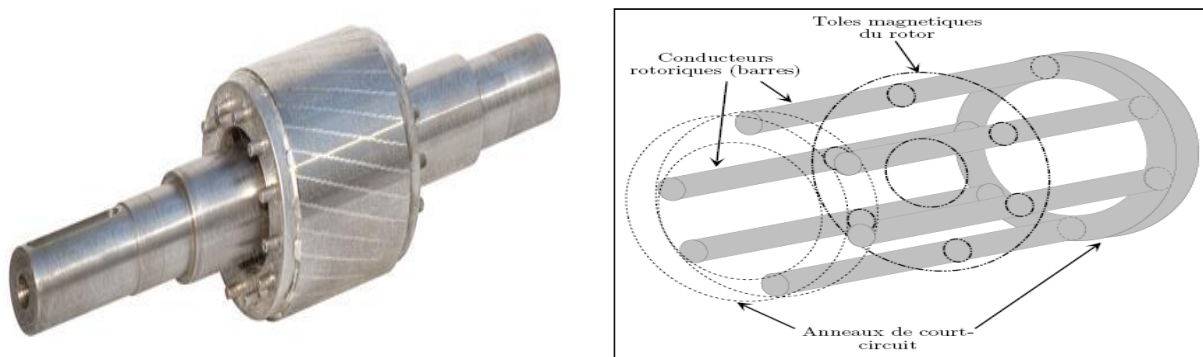


Fig. I.5. Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.

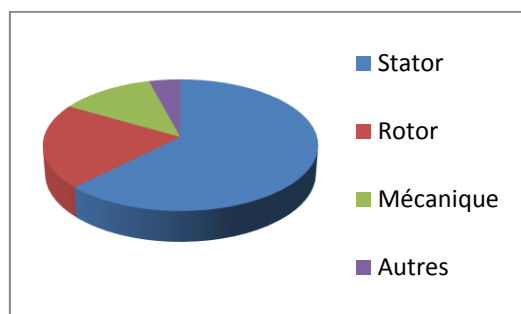
### I.3.3 les paliers:

Sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants: les flasques et les roulements à billes. [BES 16]

### I.4 L'ETUDE STATISTIQUE DES DEFAUTS

Une étude statistique est effectuée en 1998, par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50KW à 200KW) a donne les résultats suivantes [CHEL2017] :

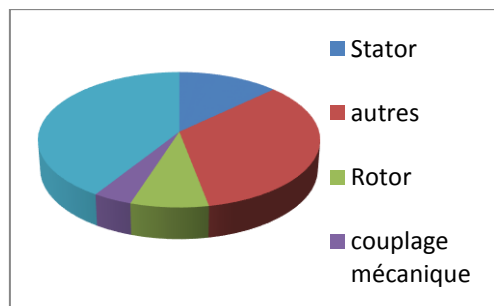
- Stator : 60%
- Rotor : 20%
- Mécanique : 18%
- Autres : 12%



**Fig. I.6.** Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance

Une autre étude statistique a été faite sur les machines de grande puissance (de 100KW à 1MW) a donne les résultats suivantes :

- 1-Stator :13%
- 2-Autres : 34%
- 3-Rotor : 08%
- 4-couplage mécanique : 04%
- 5-Roulement : 41%



**Fig. I.7.** Répartition des défauts pour une machine de grande puissance

## I.5 TYPES DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE [BED16]

Quoique robuste, la machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiés comme suit :

1. Les défauts du stator qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques ;
2. Défauts rotoriques : une barre cassée, rupture de l'anneau ou d'un court-circuit dans les enroulements rotoriques;
3. Défaillances d'ordre mécanique.

### I.5.1 Défaillances au stator

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit:

- Défaut d'isolant,
- Court-circuit entre phases,
- Court-circuit phase/bâti,
- Court-circuit entre spires,

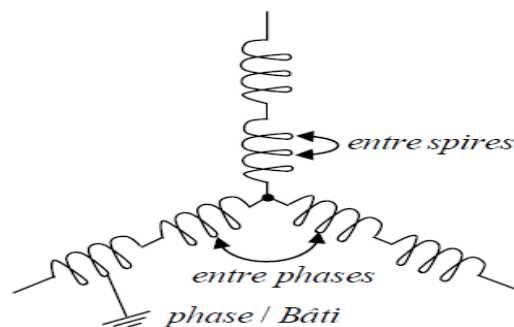


Fig. I.8. Représentation schématique des différents courts-circuits au stator

- Déséquilibre d'alimentation,
- Défaut du circuit magnétique

#### I.5.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement

Les différentes causes pour ce type de défaut sont :



- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée, même Dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase-masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La Détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts.

### **I.5.1.2 Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Les études montrent qu'en présence d'un court-circuit entre spires de la même phase, le moteur peut continuer à fonctionner.

Cependant, ce défaut provoque une augmentation des courants statoriques de la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, une modification du facteur de puissance, une amplification des courants dans le circuit rotorique, une augmentation de la température dans l'enroulement, ce qui peut provoquer la dégradation accélérée des isolants et l'apparition d'un 2<sup>ème</sup> court-circuit, une augmentation des oscillations du couple électromagnétique en gardant une valeur moyenne sensiblement identique à celle sans défaut.

### I.5.1.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants Statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

### I.5.1.4 Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

Les fréquences des composantes caractéristiques de défaut de court circuit peuvent être détectées dans le spectre du flux axial à des fréquences données par l'expression suivante:

$$f_{cc} = \left[ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right], k=1,3 \text{ et } n=1,2,3,\dots,(2p-1) \quad (I.1)$$

g : glissement;

p : nombre de paire de pôles;

f<sub>s</sub> : fréquence de l'alimentation.

### **I.5.1.5 Défauts du circuit magnétique**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, des surtension, d'élévation importante du courant, etc.. .

### **I.5.2 Défaillances au rotor**

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème:

- Thermique (surcharge,...),
- Electromagnétique,
- Résiduel (déformation,...),
- Dynamique (arbre de transmission,...),
- Mécanique (roulement,...),
- Environnemental (agression,...).

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit:

- Rupture de barres rotoriques,
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit,
- Excentricité statique et dynamique du rotor.

#### **I.5.2.1 Rupture de barres rotoriques**

La rupture des barres du rotor est un problème de grande importance pour les systèmes D'entraînement à base de moteurs à induction.

C'est un des défauts les plus fréquents au rotor (fig. I.9 (a)). La rupture peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. Les fragments de barres cassés, projetés à grande vitesse heurtent les enroulements du stator, ce qui cause de sérieux dégâts mécaniques à l'isolation des enroulements et provoque leur défaillance. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple

diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale  $f_s$  telles que:

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2k.g), k = 1,2,3 \quad (.I.2)$$

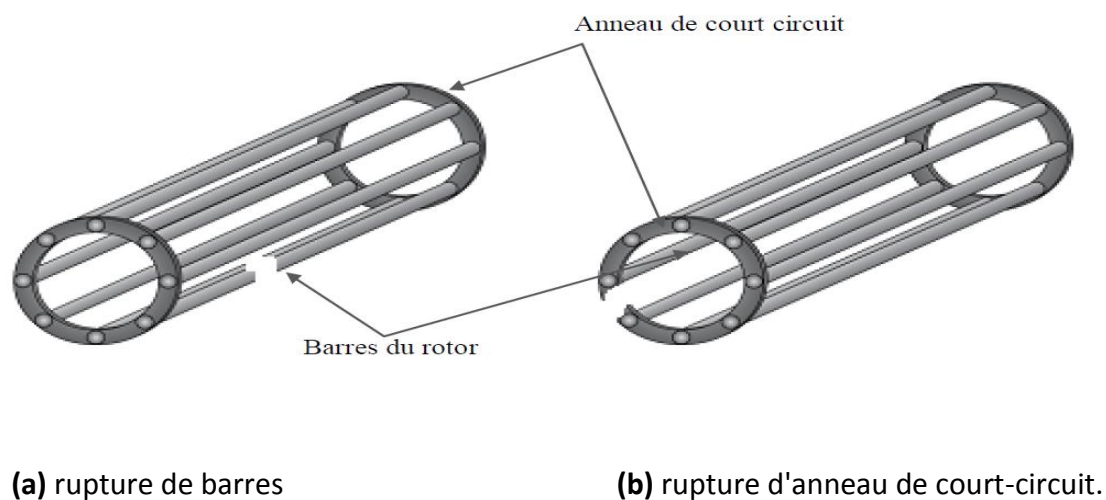
$g$  : glissement,

$f_s$ : fréquence d'alimentation statorique.

### I.5.2.2 Rupture de portion d'anneau

La rupture de portion d'anneau (fig. I.9(b)) est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres.

Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres Rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.



**Fig. I.9.** Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.

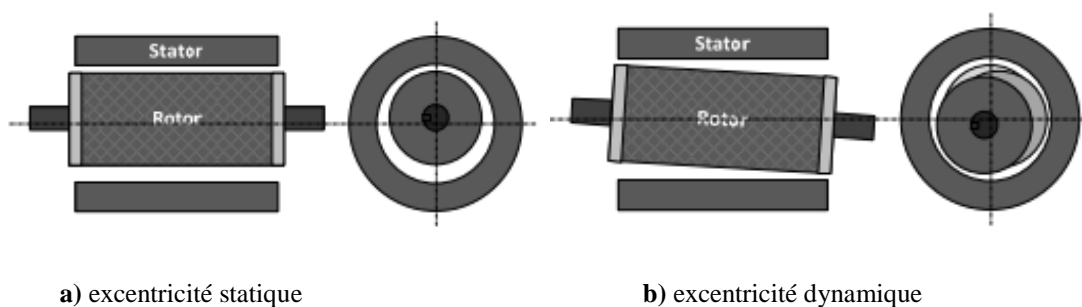
### I.5.2.3 Excentricité

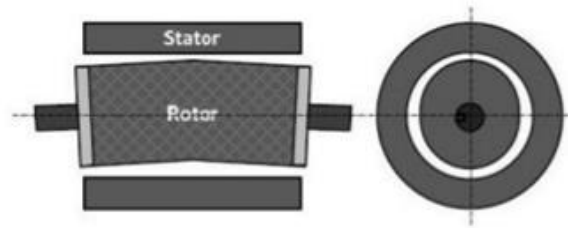
Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator. L'excentricité dans une machine est définie comme un entrefer non symétrique entre le stator et le rotor. La présence d'un certain niveau d'excentricité est fréquente dans les machines électriques.

L'excentricité de l'entrefer peut survenir sous formes: statique (fig. (I.10.a)), dynamique (fig. (I.10.b)) ou mixte (statique et dynamique (fig. (I.10.c))). Dans le cas d'une excentricité statique, la position de la longueur radiale minimale de l'entrefer est fixée dans l'espace. Les causes typiques de l'excentricité statique comprennent l'ovalité du stator ou le positionnement incorrect du rotor ou du stator à l'étape de mise en service. Ce type de défaillances peut provoquer un décentrement du rotor se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). La première forme est l'excentricité statique où la position radiale de l'entrefer est minimale et fixe.

La deuxième forme est l'excentricité dynamique qui se produit quand le centre du rotor n'est pas sur l'axe de rotation. Un entrefer minimum tourne alors avec le rotor. Cela signifie que l'excentricité dynamique est une fonction de l'espace et du temps. Les causes typiques d'une excentricité dynamique sont les arbres pliés, les résonances mécaniques à vitesses critiques, et l'usure des roulements. L'excentricité dynamique augmente les vibrations et le niveau des bruits de manière très significative.

L'excentricité mixte (Fig. I.10(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant





c) excentricité mixte

**Fig. I.10.** Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

Ce défaut entraîne une modification du comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales de la fréquence d'alimentation  $f_s$

$$f_{exc} = f_s \left[ 1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right]. \quad (I.3)$$

avec :  $k=1, 2, 3, \dots$ ,  $p$ : nombre de paires de pôles,  $g$ : glissement

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoques du courant et certaines de leurs composantes spectrales. Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoques rotoriques  $N_e$ .

$$f_{enc+exc} = f_s \left[ (kN_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right]. \quad (I.4)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots$  et  $n_w = 1, 3, 5, 7, \dots$

$N_e$ : nombre d'encoques rotoriques,

$p$ : nombre de paires de pôles,

$g$ : glissement,

$n_d = 0$ , dans le cas d'une excentricité statique,

$n_d=1$ , dans le cas d'une excentricité dynamique.

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoques du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales.

### I.5.3 Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que Compte la machine asynchrone. Les défauts qui sont les plus récurrents d'ordre mécanique peuvent être définis comme suit :

- Défauts des roulements à billes.
- Défauts de l'arbre moteur.
- Défauts créés par les flasques.

Ces différents problèmes sont traités d'une manière complète dans les ouvrages.

#### I.5.3.1 Défauts des roulements

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un Mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux.

Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux Roulements. Le roulement est composé des éléments suivants:

- deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants);
- des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal ;
- une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine). On distingue deux types de roulements : le roulement à billes, où le contact bille-chemin est théoriquement ponctuel et le roulement à rouleaux où le contact rouleau-chemin est théoriquement linéaire. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix.

La fig. (I.11) montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact.

Les défauts de roulement peuvent se produire lors d'une fatigue des matériaux sous des conditions normales de fonctionnement. Au début, des fissures vont apparaître sur les pistes et sur les billes.

Ensuite, des écaillages et des arrachements de matière peuvent accélérer rapidement l'usure d'un roulement. Ces phénomènes seront accompagnés par des niveaux de bruit et de vibrations croissants.

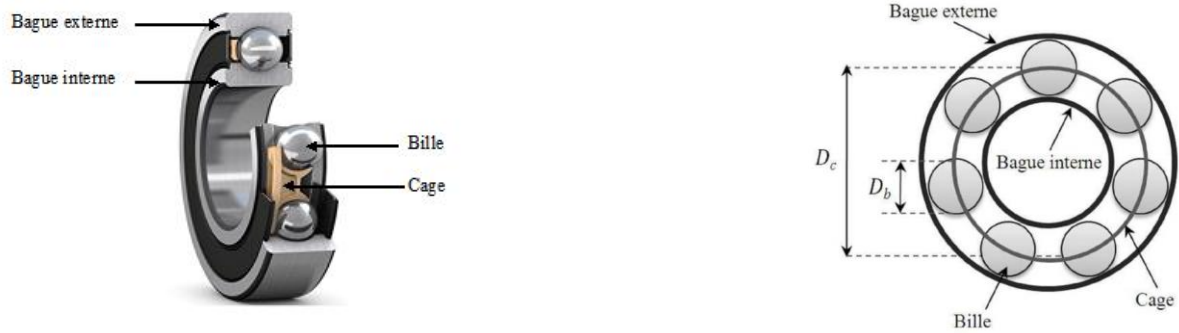


Fig. I.11. Structure d'un roulement à billes.

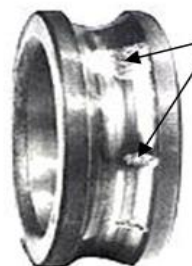
Les roulements peuvent être endommagés par des causes externe comme :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- Mauvais alignement du rotor,
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques,
- Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement. Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :
- Défaut de bague extérieure,
- Défaut de bague intérieure,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage.

Cassure dans la cage



Trous et corrosion  
Dans les gorges



Vieillessement  
des billes

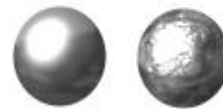


Fig. I.12. Différents défauts de roulement à billes

Pour les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits par l'expression suivante:

$$f_{roul} = |f_s \pm k f_v|. \quad (I.5)$$



Où :  $k=1, 2, \dots$ , et  $f_v$  est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

$$\text{Défaut de la bague externe: } f_{ext} = \frac{n_b}{2} \cdot f_{rot} \cdot \left[ 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \Phi \right] \quad (\text{I.6})$$

$$\text{Défaut de la bague interne: } f_{int} = \frac{n}{2} \cdot f_{rot} \cdot \left[ 1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \Phi \right] \quad (\text{I.7})$$

$$\text{Défaut de bille: } f_{bille} = \frac{D}{2 \cdot d} \cdot f_{rot} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cdot \cos \Phi \right)^2 \right] \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Défaut de cage de bille: } f_{cage} = \frac{1}{2} \cdot f_{rot} \cdot \left[ 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \Phi \right] \quad (\text{I.9})$$

avec : -  $n_b$ : nombre de billes,

-  $d$ : diamètre des billes,

-  $D$ : diamètre de la cage

-  $\Phi$ : angle de contact entre la bille et les bagues

$f_{ext}$  et  $f_{int}$  correspondent respectivement à la fréquence de passage des billes sur la partie défectueuse de la bague extérieure ou intérieure,  $f_{bille}$  correspond à la fréquence de rotation de la bille défectueuse sur la bague extérieure ou intérieure,  $f_{cage}$  correspond à la fréquence de rotation de l'ensemble du train de billes.

### I.5.3.2 Défauts de l'arbre moteur

L'utilisation d'un mauvais matériau lors de la phase de construction de l'arbre de la machine peut laisser apparaître des fissures. Ces fissures peuvent engendrer une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Un environnement corrosif peut aussi diminuer la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Des contraintes mécaniques considérables exercées sur l'arbre du moteur peuvent aussi engendrer une excentricité statique, dynamique ou mixte supplémentaire.

### I.5.3.3 Défauts créés par les flasques

Causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la Machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

## I.6 METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

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 leurs expériences, ces derniers surveillent les modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables ou non [Zouz 15]. Pour effectuer un diagnostic, il est nécessaire de procéder à une ou à des analyses afin d'interpréter les signaux issus des capteurs tant sur le plan fréquentiel que temporel. Parmi tous les signaux permettant d'établir un diagnostic, ceux-ci peuvent provenir de la mesure du courant absorbé par le moteur électrique, le carré de ce courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park.....

Il est important de savoir que les différentes méthodes de diagnostic sont classées selon les Approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches [Zouz 15] :

- ✓ Approche sans modèle,
- ✓ Approche avec modèle.

### I.6.1 Méthode de diagnostic sans modèle

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle analytique précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures, les signatures de défauts, obtenues par une modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement dans une base de données.

L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert. Parmi ces méthodes on trouve:

#### I.6.1.1 Méthode par traitement de signal

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est la plus utilisée pour le diagnostic de défaut, car la plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche. Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux qui peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toutes parties de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont le spectrogramme, l'analyse spectrale par FFT et ondelettes.

### I.6.1.1.1 Transformée en Série de Fourier

La méthode la plus utilisée est la transformée de Fourier qui effectue l'analyse spectral d'un signal donné. Chaque défaut, statorique ou rotorique a ses fréquences caractéristiques propres. Ainsi une simple application de la transformée de Fourier peut localiser ces fréquences. En raison de sa simplicité, cette méthode est très utilisée car elle est peu coûteuse et fiable. Sa seule limitation réside dans le fait qu'elle ne peut être appliquée aux machines qui fonctionnent dans des conditions non stationnaires (vitesse non constante) [FARO 08].



Fig. I.13. Représentation temporelle vers fréquentielle

### I.6.1.1.2 Les techniques de types non stationnaires

Un fonctionnement à vitesse variable (non stationnaire) modifie la fréquence fondamentale à chaque instant. Cela rend les méthodes classiques d'analyse des harmoniques inefficaces pour la détection des défaillances. Pour l'analyse d'un signal variable dans le temps, plusieurs techniques du traitement basé sur le temps et la fréquence ont été proposées. Dans ce qui suit, deux des techniques les plus couramment utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques, sont exposées.

#### - Transformé de Fourier à Court Terme (TFCT)

Cette méthode permet d'analyser les signaux variables dans le temps de façon aperiodique. Mathématiquement, elle présente une distribution linéaire du temps et de la fréquence. Les distributions du temps ou de la fréquence sont normalement utilisées pour le diagnostic des défauts dans les systèmes mécaniques. Ces distributions peuvent extraire avec précision les fréquences désirées d'un signal non stationnaire. La TFCT d'un signal continu dans le temps  $x(t)$  est défini comme suit :

$$\text{TFCT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{I.10})$$

où :  $w(t)$  est la fonction fenêtre dont la position a été traduite dans le temps par ' $\tau$ '. La forme discrète est :

$$\text{TFCT}(k, m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n-m)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (\text{I.11})$$

où:  $w(n)$  est la fenêtre glissante Si la variation d'un signal en cours d'analyse est relativement lente, il peut être supposé que le signal est stationnaire dans l'ensemble du calcul de la TFCT. Le nombre de calculs TFCT nécessaires dépend de la longueur du signal échantillonné et de la taille de la fenêtre utilisée pour segmenter le signal. Malgré sa simplicité de mise en œuvre et sa performance raisonnable, cette méthode reste limitée par le fait que longueur de la fenêtre temporelle influence la fréquence de la résolution. L'augmentation de la largeur de la fenêtre conduit à l'amélioration de la fréquence de résolution. Cela signifie que l'information peuvent des signaux non stationnaires appartenant à cette largeur risque de se perdre. Ce rapport intrinsèque entre le temps et la fréquence de la résolution devient plus critique lorsque la TFCT traite les signaux dont la fréquence est en évolution constante [Zouz 15] .

### - Transformé d'ondelette (TO)

Elle a été développée pour résoudre l'arbitrage entre le temps et la fréquence des résolutions de la TFCT. TO est essentiellement une méthode d'échelle du temps. Dans l'analyse d'ondelette, un signal est analysé pour différentes échelles ou résolutions une fenêtre est utilisée pour regarder la stationnarité approximative du signal et une fenêtre est utilisé pour accéder au transitoires. Cette vue du signal en multi résolution ou multi échelle est la particularité de l'analyse avec ondelette. La transformée d'ondelette d'un signal  $x(t)$ , dépend de deux variables paramètre de fréquence et le paramètre de temps. Elle est donnée par :

$$\text{TO}(af, \tau) = \frac{1}{\sqrt{af}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g\left(\frac{t-\tau}{af}\right)dt \quad (\text{I.12})$$

Le choix d'ondelette est important pour une bonne extraction des caractéristiques des défauts. Une vraie ondelette ne possède pas l'information de phase distincte et, par conséquent, elle est uniquement adaptée pour détecter les transitoires. Elle n'est donc pas d'une grande utilité dans le diagnostic des moteurs où l'information des défauts est répartie dans l'ensemble du signal. Elle est utilisée pour mesurer les fréquences instantanées. Elle offre meilleur choix pour la détection des défaillances des moteurs [Zouz 15] .

#### I.6.1.2 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts par mesure des vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine. Ces vibrations peuvent être captées par des accéléromètres. Les

spectres des signaux de vibrations, issus de la machine en défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque la machine est en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor [SAK 12].

### **I.6.1.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite**

Dans une machine idéale et sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [SAH 03].

### **I.6.1.4 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites**

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non- idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non- linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [SAH 03].

### **I.6.1.5 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique**

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 [Hsu95]. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur.

### **I.6.1.6 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée**

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [SAH 03].

### I.6.1.7 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [SAH 03].

Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par:

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de La machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
  - La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant.
- La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

### I.6.1.8 Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous:  $i_q = f(i_d)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [SAH 10].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park ( $\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}$ ) Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [SAH10].

### I.6.1.9 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)

Les techniques d'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisées dans le domaine du diagnostic, des chercheurs [Zouz 15] et les industriels ont de plus en plus recours à ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du système. En fait le terme « intelligence artificielle » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacités.

### I.6.2 Méthode de diagnostic avec modèle

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié [Zouz 15]. Les paramètres peuvent être aussi identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le Filtre de Kalman [Zouz 15].

-La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues, ...) et des variables connues (consignes, variables mesurées).

Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier [Zouz 15].

## I.7 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre nous avons présenté quelques définitions relatives aux termes de diagnostic puis rappelé la constitution de la machine asynchrone. Ensuite nous avons évoqué brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines. Enfin nous avons présenté les différentes méthodes de diagnostic des défauts appliquées à la machine asynchrone.

Le chapitre suivant présente une modélisation et simulation de la machine asynchrone à l'état sain par la méthode des éléments finis.

## II.1 INTRODUCTION

Il y a quelques années, les programmes de simulation faisaient intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court. A ce jour, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons nous passer de ces transformations, ce qui permet dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit. [DED 04]

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.

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 de calcul, d'où une grande souplesse d'utilisation. [DED 04]. Ce chapitre a pour but la modélisation de la machine asynchrone avec le Logiciel Flux 2D et présentation des résultats.

## II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [DED 04]. De nombreux logiciels ont vu le jour pour permettre d'aborder cette approche difficile. Nous pouvons citer Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons le, de déterminer la cartographie



du champ magnétique présent dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières.

### II.2.1 formulations

Considérons un certain domaine ( $\Omega$ ) dans lequel un champ  $A$ , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [KHE 12] :

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

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  $\Gamma$  du domaine ( $\Omega$ )

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

Dans cette équation  $G$  et  $H$  sont des fonctions connues sur les frontières  $\Gamma$ . 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  $\Gamma$  :

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

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  $\Gamma$  :

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

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  $\Omega$  en sous domaines élémentaire  $\Omega_e$  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  $\Omega$ .

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 :

- 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/m<sup>2</sup>)

$\mu$  : Perméabilité magnétique (H/m)

$\sigma$  : 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 courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

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

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

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

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

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

Pour que  $\mathbf{A}$  soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition  $\text{div}(\mathbf{A}) = 0$  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 :

$$\text{rot } (\nu \text{rot } \overset{\rho}{A}) = \overset{\rho}{J} + \text{rot } (\nu \overset{\rho}{B}_r) \quad (\text{II.16})$$

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 :

$$\operatorname{rot}^{\rho}(\operatorname{vrot}^{\rho}A) + j\omega\sigma A^{\rho} = J^{\rho} \quad (\text{II.17})$$

$\omega = 2\pi f$  : pulsation électrique (rad.s<sup>-1</sup>),  $j$  : 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 :

$$\operatorname{rot}^{\rho}(\operatorname{vrot}^{\rho}A) + \sigma \frac{\partial A^{\rho}}{\partial t} - \operatorname{rot}^{\rho}B_r + \sigma \operatorname{grad}V = 0 \quad (\text{II.18})$$

### 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 [KHE 12].

Pour un élément triangulaire on a :

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

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

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

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 ( $\Omega$ ) 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 ( $\Omega$ ).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Fig. II.1).

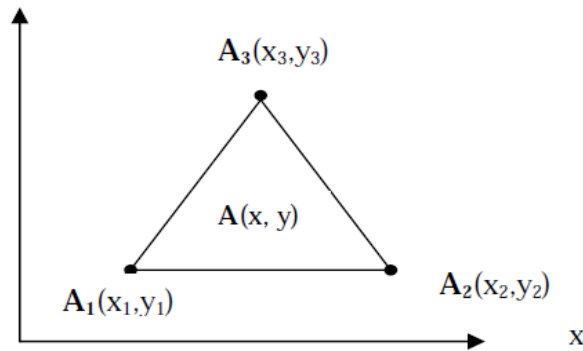


Fig. II.1. Fonction d'interpolation d'un élément

#### 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.

\_ (**Materialsdatabase**) 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 fig. II.2.

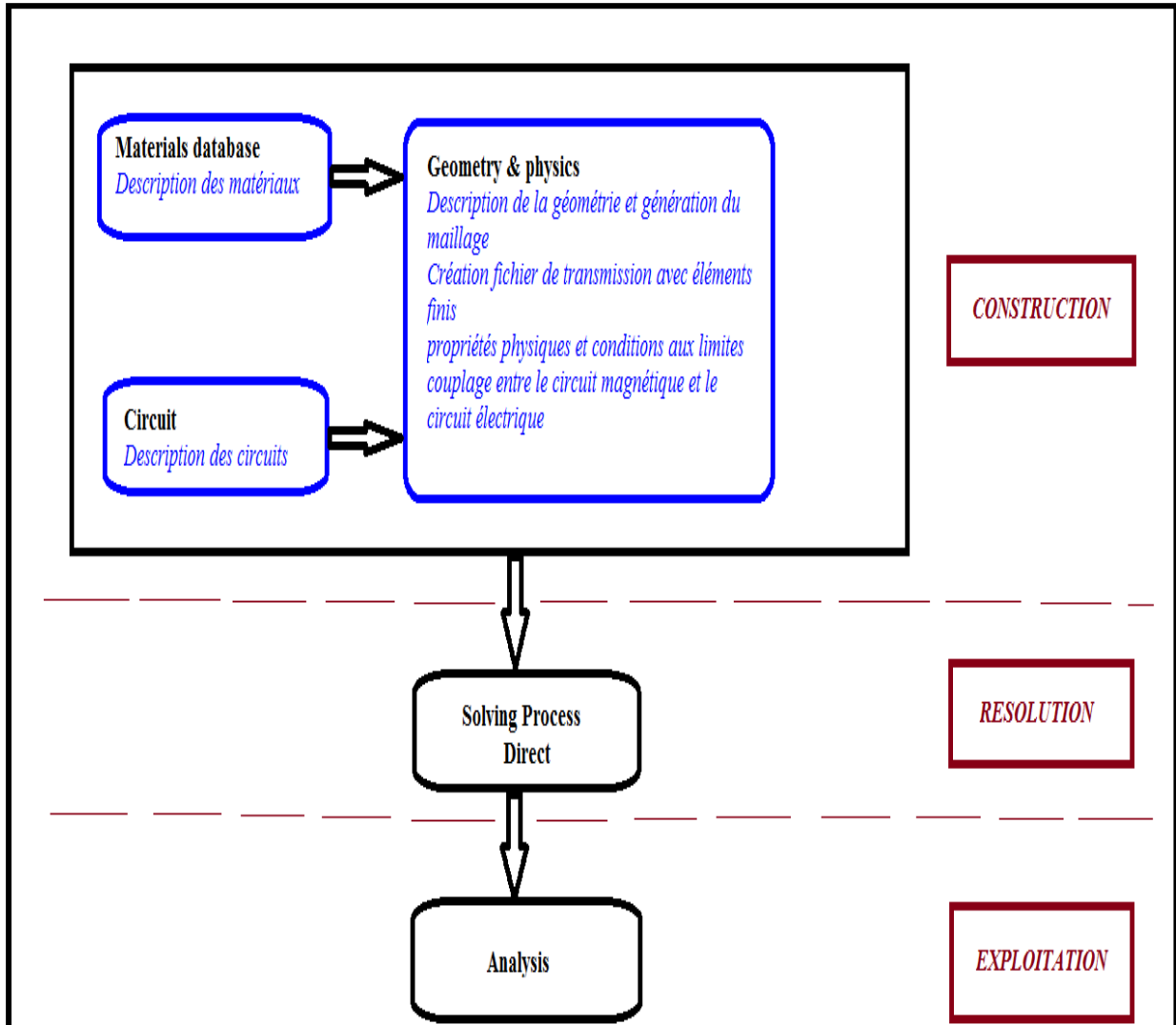


Fig. II.2. L'enchaînement des programmes de Flux 2D

## 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 intérieures du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentiels à ces deux surfaces.

### II.5.1 les données de la machine étudiée

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

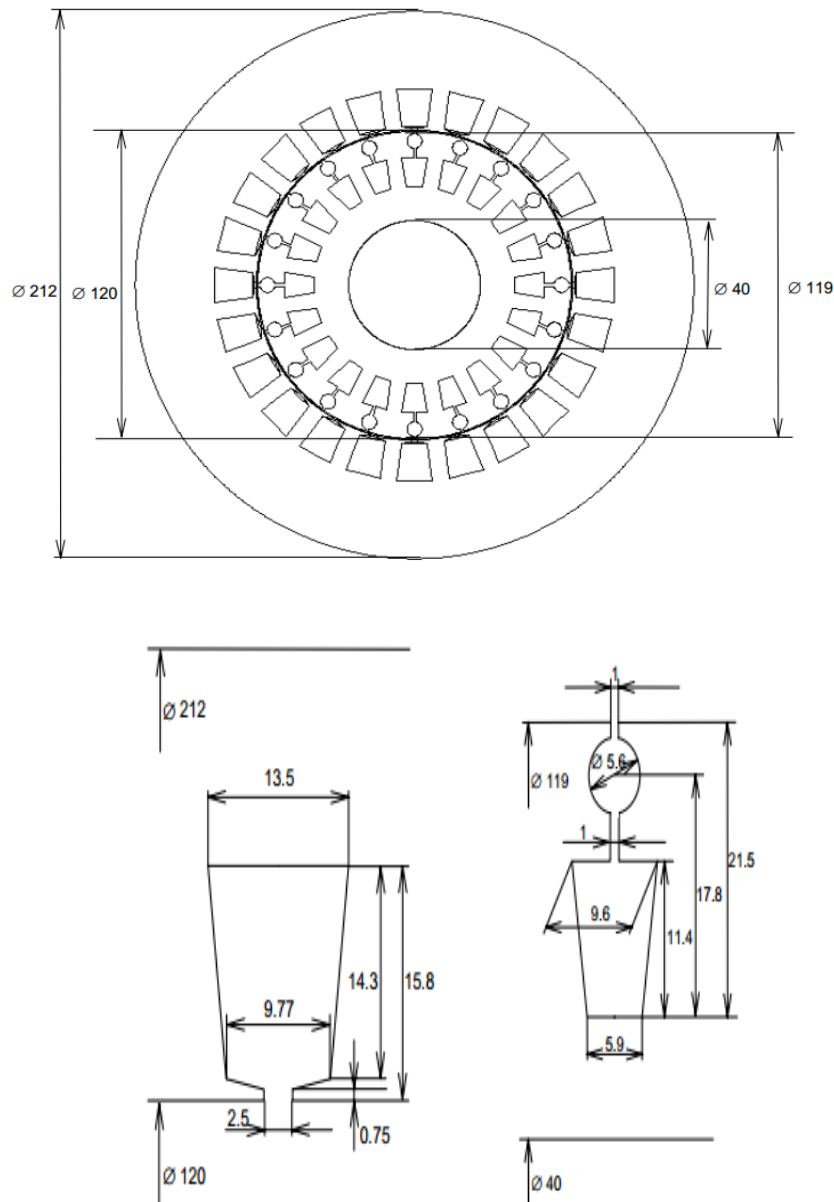


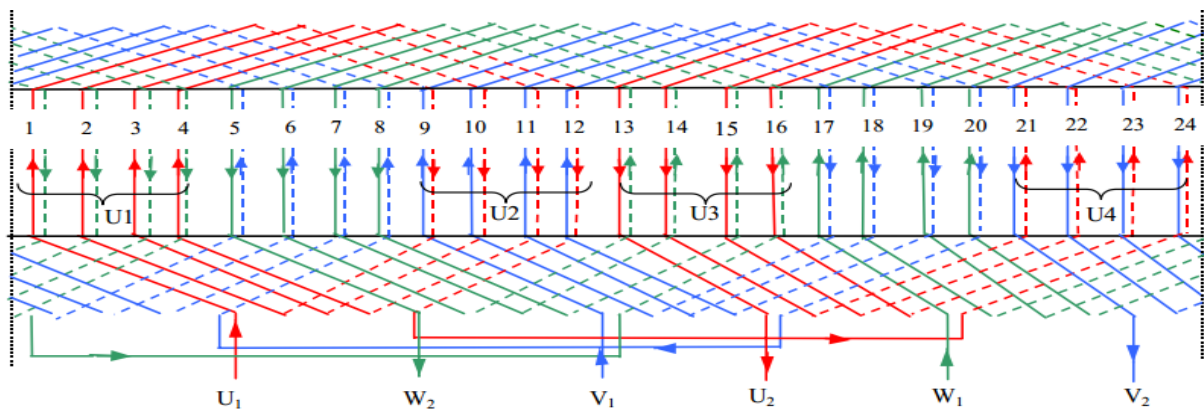
Fig. II.3. Les dimensions de la machine asynchrone étudiée

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

Paramètres		Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5kW
	Courant	8.89 A
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2925tr/min
	Nombre de paires de pôles	1
	Longueur du paquet de tôles	125mm
STATOR	Nombre d'encoches	24
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	120mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	1.54Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

**Tableau. II.1.** Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée [DOC TECH 2006].

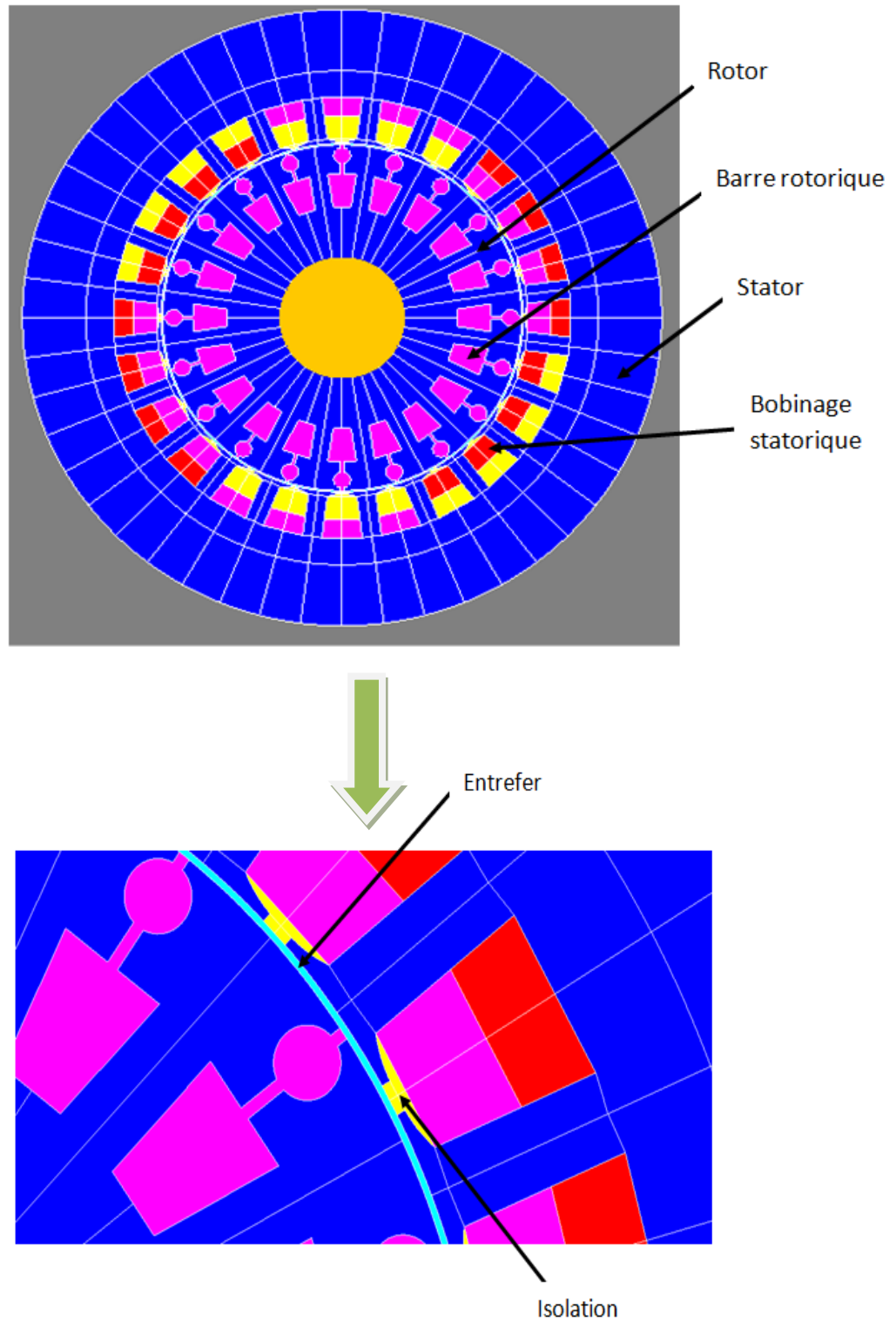
L'enroulement du stator est un enroulement de cuivre à deux couches, Fig. II.4, avec une étape raccourcie de 8/12 et  $w_1 = 208$  tours par phase.



**Fig. II.4.** Bobinage statorique



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



**Fig. 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. [KHE 12]

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 va 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.

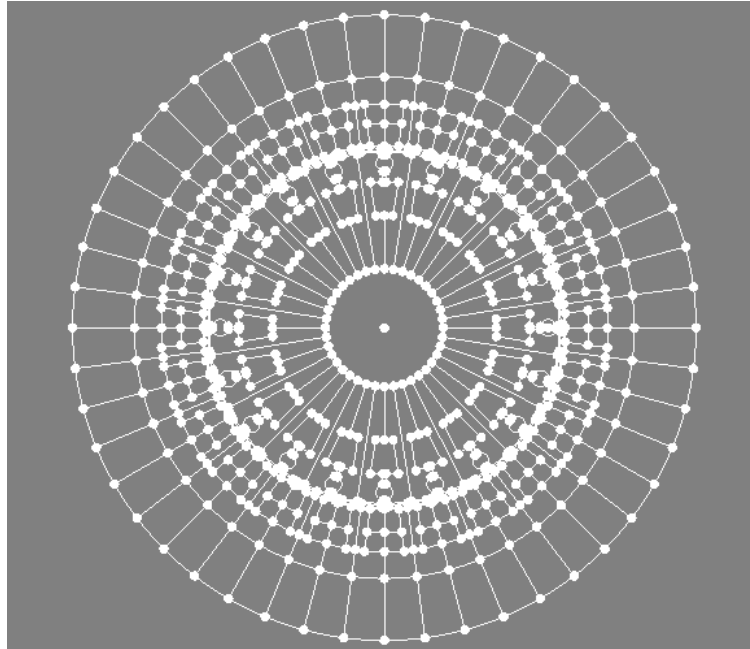
**Génération du maillage** Pour plus d'information voir le guide de flux 2d [DOC TECH2006].

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

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est  $(0,0)$ , l'angle égale à  $360/20$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/24$ . On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 19 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 23fois avec le choix de commande **Add Faces and associated Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 23fois en appliquant la même transformation de

l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces.

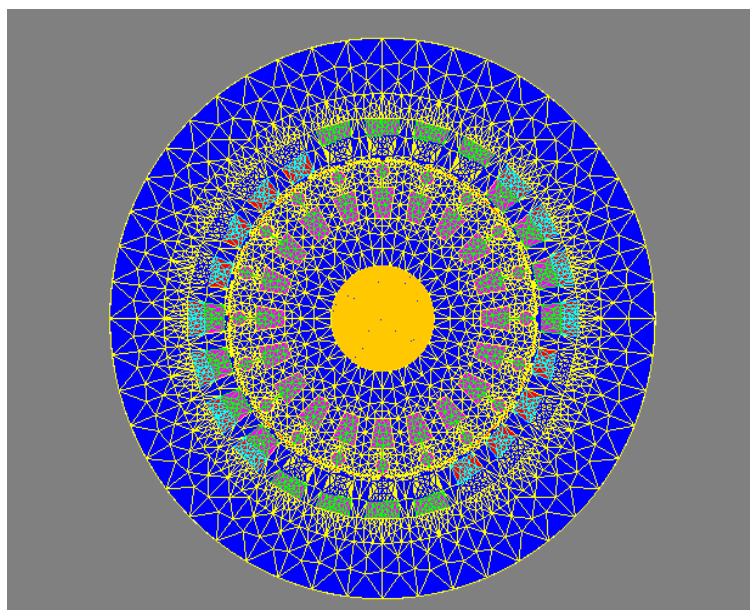
La fig. II.6 présente la géométrie avec les points du maillage.



**Fig. II.6.** les points de maillage

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



**Fig. 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.

### 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.

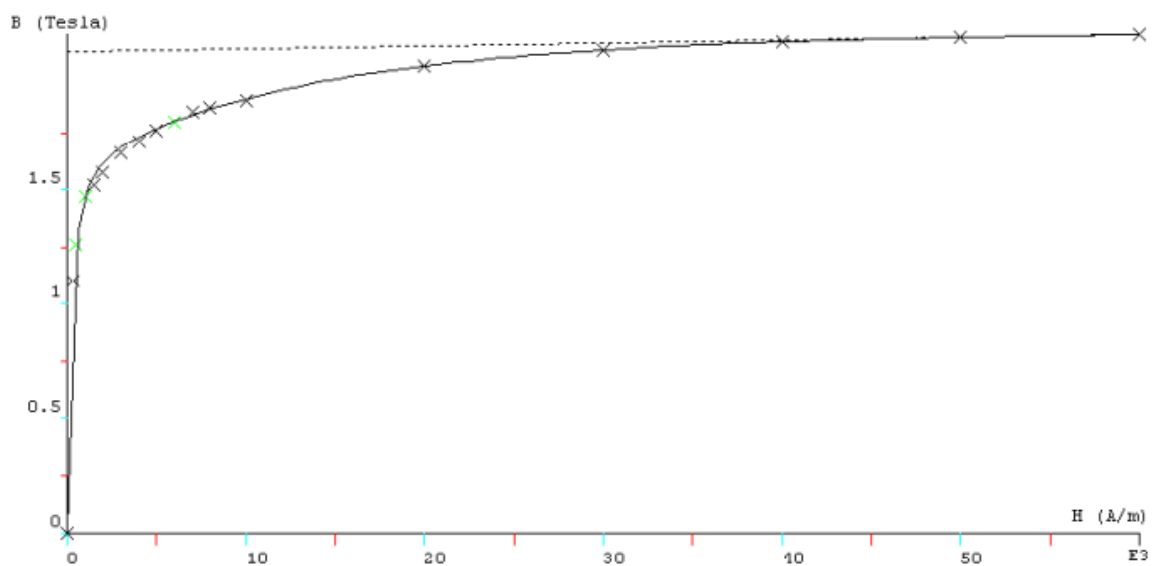


Fig. II.8. La courbe d'aimantation  $B(H)$  du matériau ferromagnétique

### 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), fig. II.9.

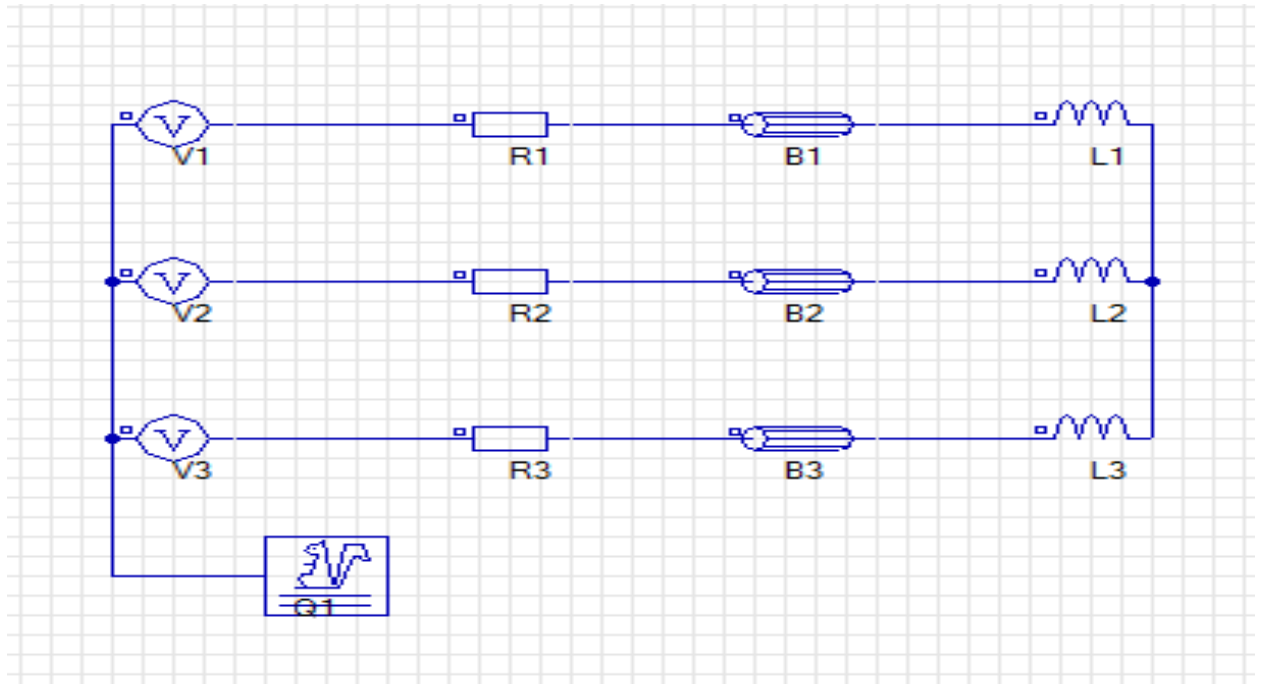


Fig. II.9. Le circuit électrique d'alimentation

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 correspondant aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), où  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  sont les sources de tension d'alimentation (voir fig. II.11). Ba1, Ba2, Bc16 représentant le bobinage statorique. R1, R2, et R3 sont les résistances de chute de tension dans le réseau. L1, L2 et L3 sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

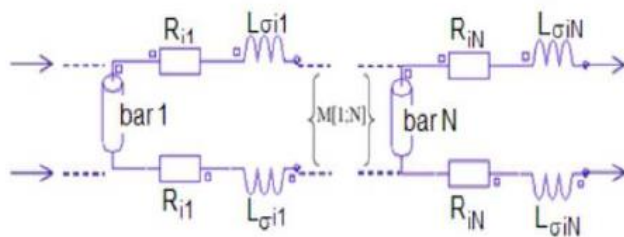


Fig. II.10. Circuit équivalent de la cage rotorique

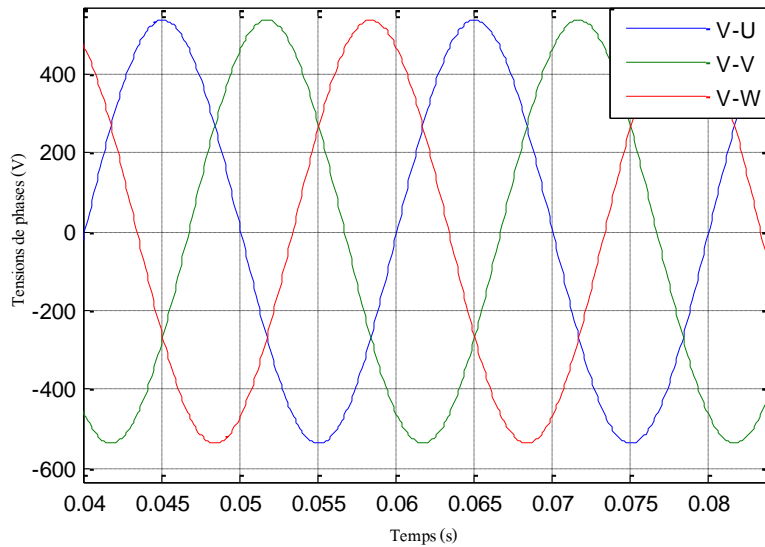


Fig. II.11. Les tensions d'alimentation  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$

### 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 SIMULATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN

Pour la résolution magnétique transitoire de notre modèle, l'obtention d'un fonctionnement en régime permanent de la machine passe par un fonctionnement en régime transitoire, cet état est atteint après environ 0.8 s. La simulation a été faite selon les paramètres suivants :

- La fréquence d'échantillonnage :  $f_e = 10000 \text{ Hz}$  ;
- Le temps d'acquisition :  $T_a = 6 \text{ sec}$ ;
- Le nombre des échantillons :  $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e \cdot T_a = 60000$  échantillons

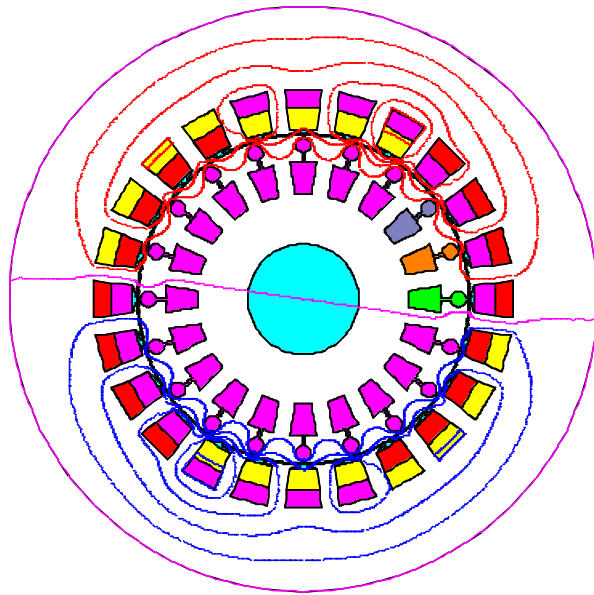
La résolution fréquentielle :  $\Delta f = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{6} = 0.16 \text{ Hz}$

Le choix d'intervalle du temps est dicté par un certain nombre de contraintes liées au temps de calcul, à la capacité de stockage. A titre d'illustration la limite temps de 6 s nécessite environ 1 jour de calcul avec un micro-ordinateur de CORE-i5\_6400 et 8 Giga de RAM (pour l'ensemble des résultats le temps requis, avoisine le mois). Le stockage en externe de fichier solution d'un seul modèle pour ce temps avoisine les 100 Giga. Au regard de toutes ces considérations, un intervalle de temps avoisinant les 6s sera utilisé pour une application optimale de la technique d'analyse spectrale FFT.

### II.6.1 Résultat de simulation

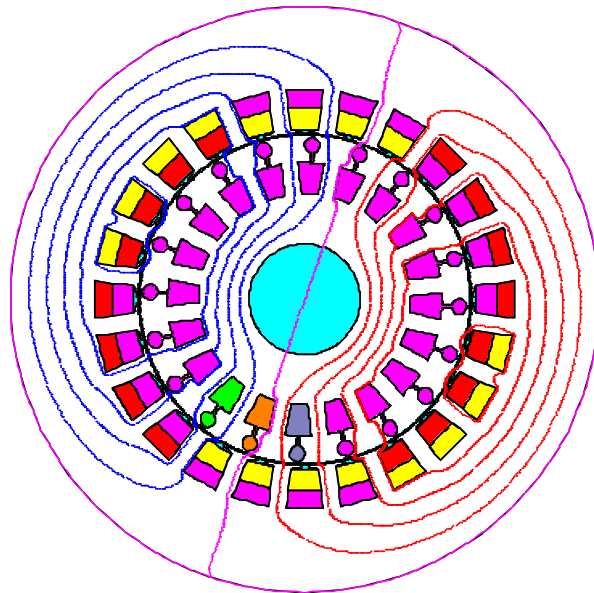
Les résultats de simulation ci-dessous représentent : la répartition des lignes du champ magnétique à vide (Fig. II.12), l'induction dans le circuit magnétique à vide (Fig. II.13); la répartition des lignes du champ magnétique en charge (Fig. II.14) et l'induction dans le circuit magnétique (Fig. II.15) en charge.

Nous remarquons bien la présence d'une paire de pôles. La distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes du champ entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est, elle aussi, quasi-symétrique.



(a)

Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-157,92852E-6
2 /	-126,34281E-6
3 /	-94,75711E-6
4 /	-63,17141E-6
5 /	-31,5857E-6
6 /	0
7 /	31,5857E-6
8 /	63,17141E-6
9 /	94,75711E-6
10 /	126,34281E-6
11 /	157,92852E-6

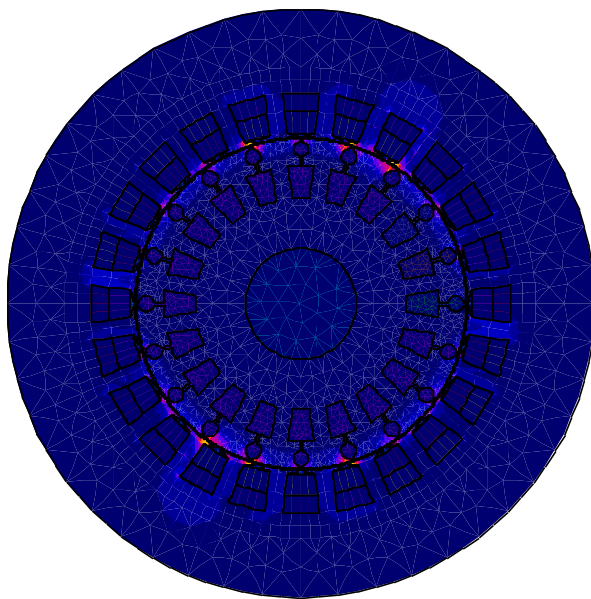


(b)

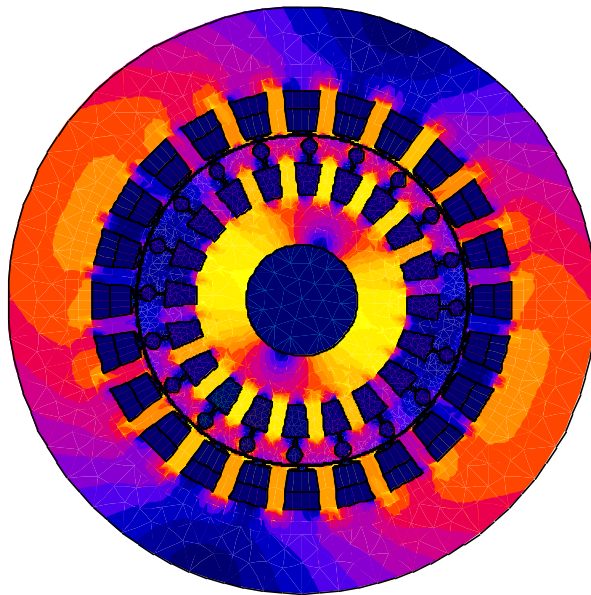
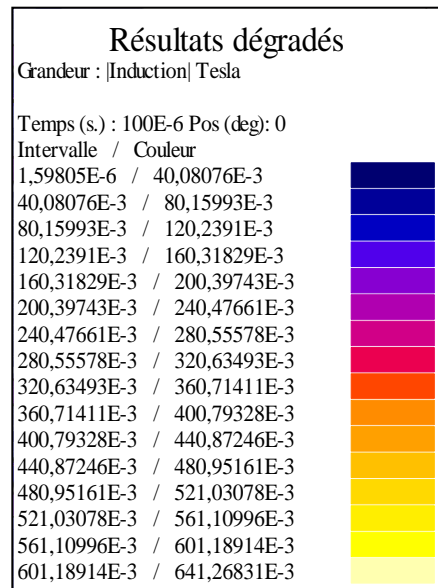
Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 1,5 Pos (deg): 22,55E3	
Ligne / Valeur	
1 /	-4,73019E-3
2 /	-3,78415E-3
3 /	-2,83811E-3
4 /	-1,89208E-3
5 /	-946,03829E-6
6 /	0
7 /	946,03829E-6
8 /	1,89208E-3
9 /	2,83811E-3
10 /	3,78415E-3
11 /	4,73019E-3

Fig. II.12. La distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ;(b) en régime permanent





(a)



(b)

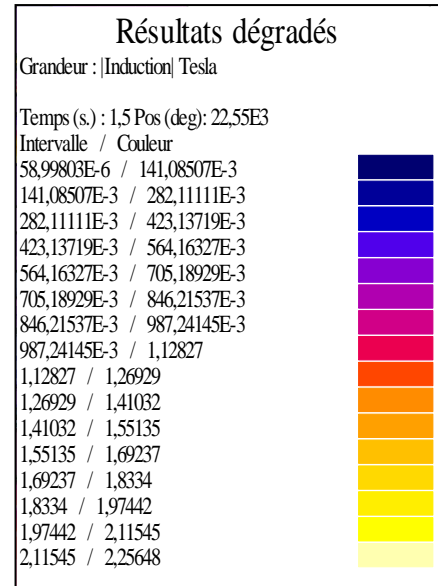
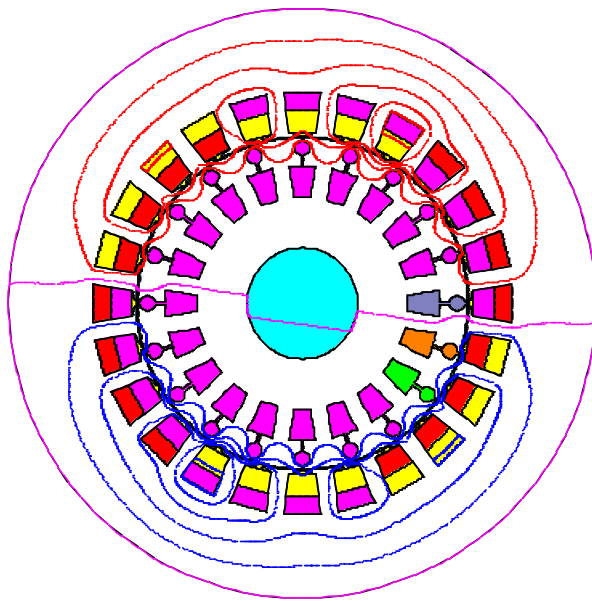
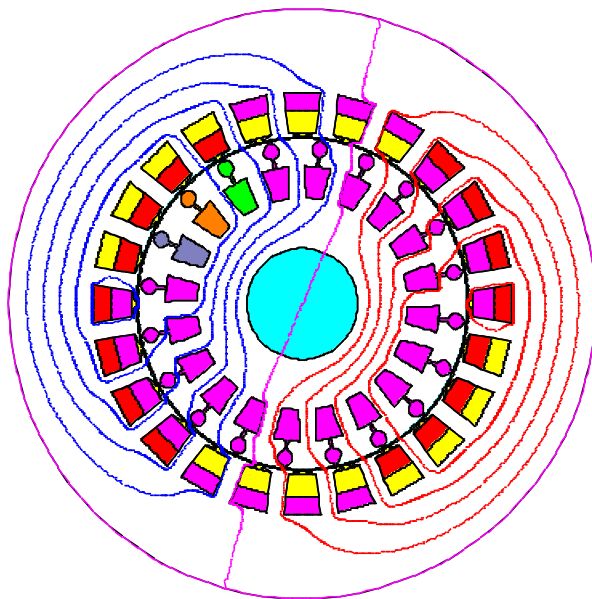


Fig. II .13. L'induction B à vide(a) au démarrage ;(b) en régime permanent.



(a)

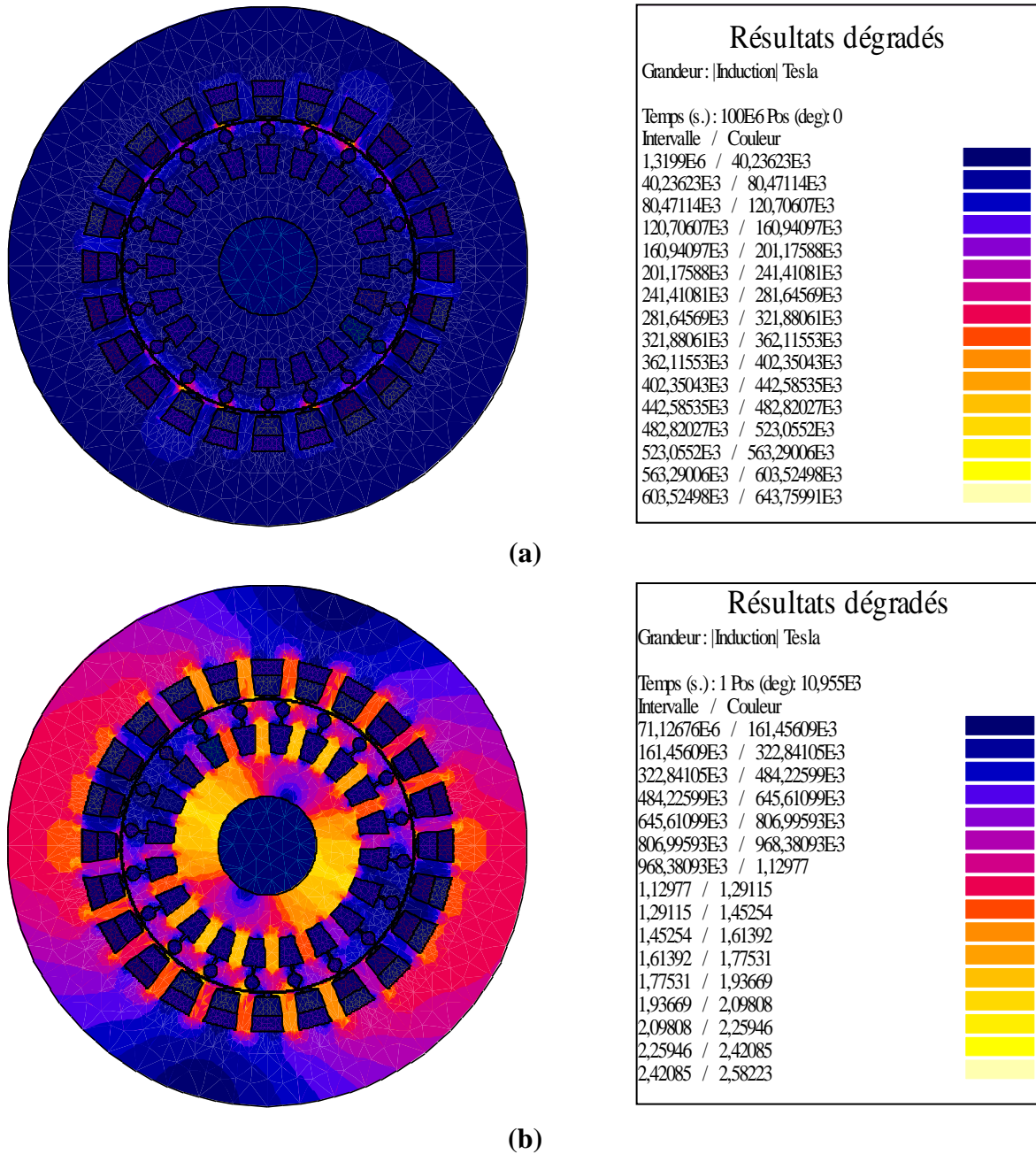
Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-157,87876E-6
2 /	-126,30167E-6
3 /	-94,72458E-6
4 /	-63,14748E-6
5 /	-31,57039E-6
6 /	0
7 /	31,58379E-6
8 /	63,16089E-6
9 /	94,73798E-6
10 /	126,31508E-6
11 /	157,89217E-6



(b)

Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 1 Pos (deg): 10,955E3	
Ligne / Valeur	
1 /	-4,74104E-3
2 /	-3,79283E-3
3 /	-2,84462E-3
4 /	-1,89641E-3
5 /	-948,20565E-6
6 /	0
7 /	948,20937E-6
8 /	1,89642E-3
9 /	2,84462E-3
10 /	3,79283E-3
11 /	4,74104E-3

Fig. II.14. La distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent

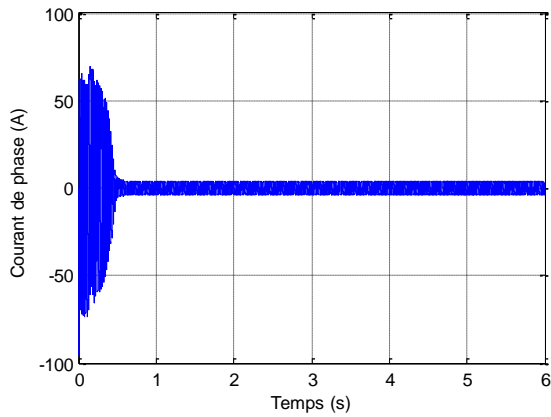


**Fig. II.15.** L'induction B en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent.

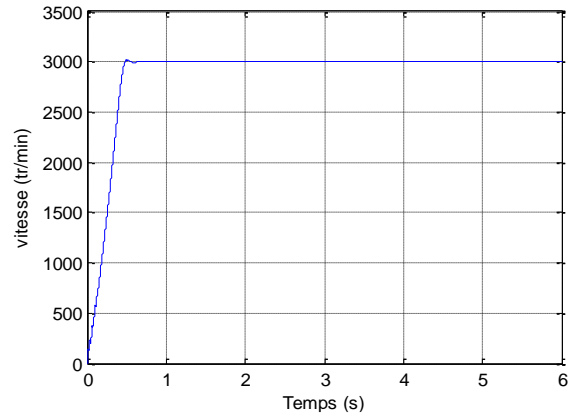
Les figures II.16 à II.20 montrent l'évolution (du courants statorique de la phase V\_U, de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, du courant dans la première barre rotorique (barre1) et de la puissance instantanée) du moteur asynchrone à l'état sain, à vide.

Après un régime transitoire d'environ 0.6s durant lequel la machine se magnétise, le courant au stator atteint le régime permanent avec une valeur efficace de 3A.

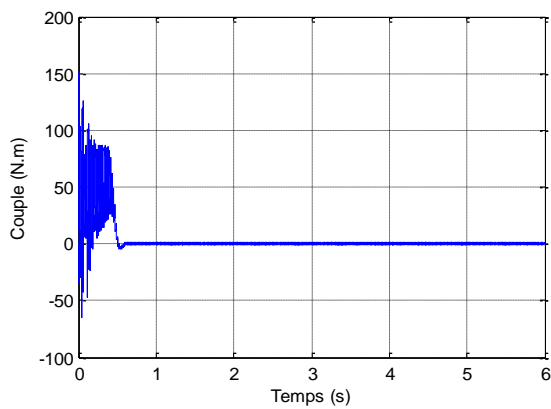
Le couple électromagnétique en régime permanent, à vide, est pratiquement nul. La vitesse atteint les 3000 tr/mn. Ces grandeurs ainsi que le courant dans la barre et la puissance sont conformes à la littérature.



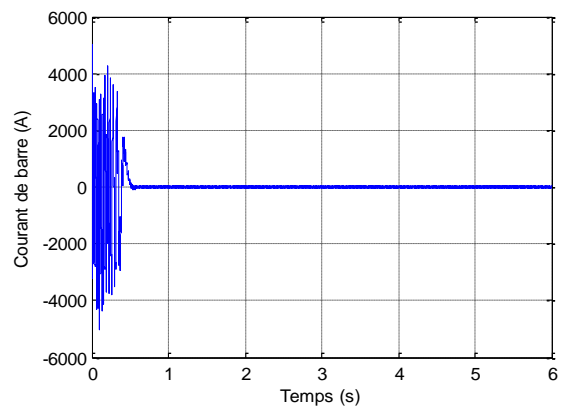
**Fig. II.16.** Forme d'onde du courant Phase V\_U  
Du moteur asynchrone à l'état sain à vide



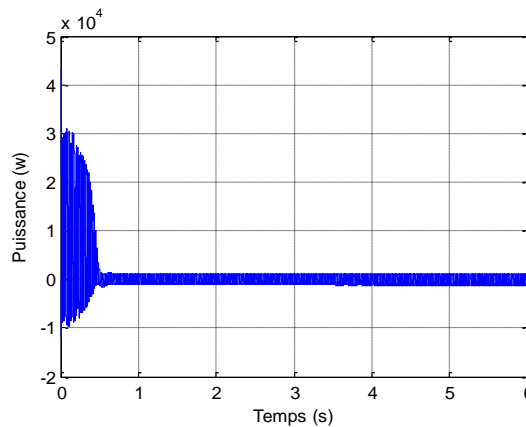
**Fig. II.17.** Vitesse de rotation du moteur  
Asynchrone à l'état sain à vide



**Fig. II.18.** Couple électromagnétique du .moteur  
asynchrone à l'état sain a vide



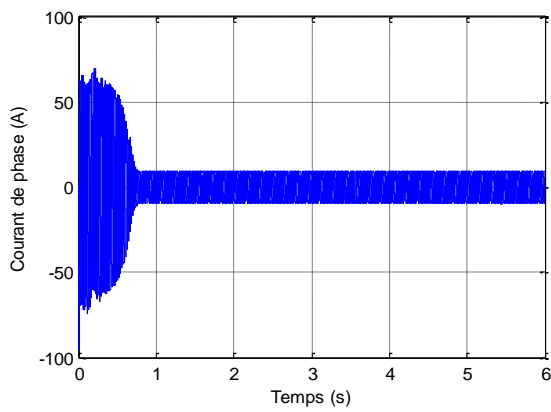
**Fig. II.19.** Courant dans une barre rotorique1 du  
moteur asynchrone à l'état sain a vide



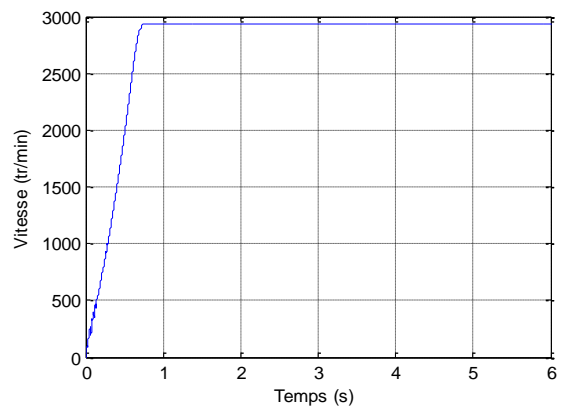
**Fig. II.20.** La puissance instantanée de la Phase V\_U du  
moteur asynchrone à l'état sain à vide

Les figures II.21 à II.25 montrent l'évolution (du courants statorique de la phase V\_U, de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, et du courant dans la première barre rotorique (barre1) et de la puissance instantanée) du moteur asynchrone à l'état sain chargé avec un couple résistant de 18.36 N.m (75 % de la charge nominale).

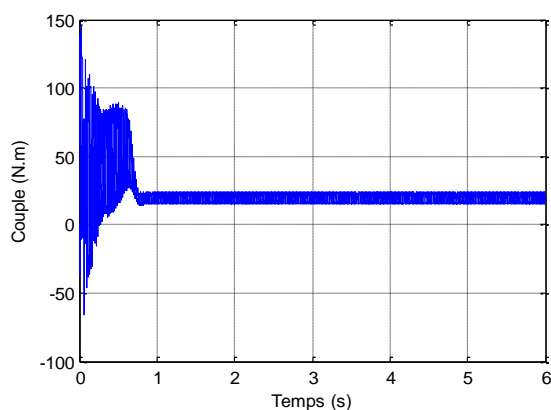
Après un régime transitoire d'environ 0.8s durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 6.74 A, le couple électromagnétique atteint sa valeur de 18.36 N.m (75% de la charge nominale) avec des harmoniques de faibles amplitudes, La vitesse atteint les 2930 tr/mn. Les valeurs du courant de barre de la puissance sont conformes à la charge.



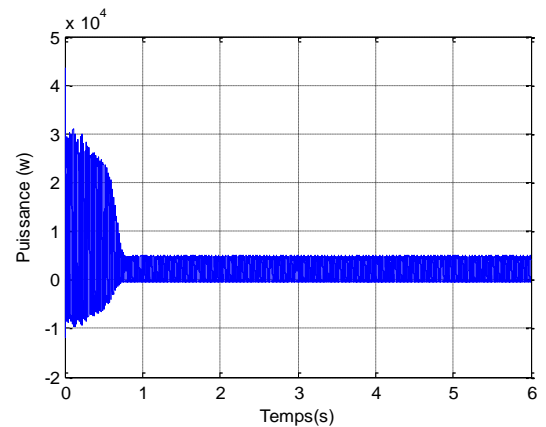
**Fig. II.21.** Forme d'onde du courant statorique phase V\_U du moteur asynchrone l'état sain en charge



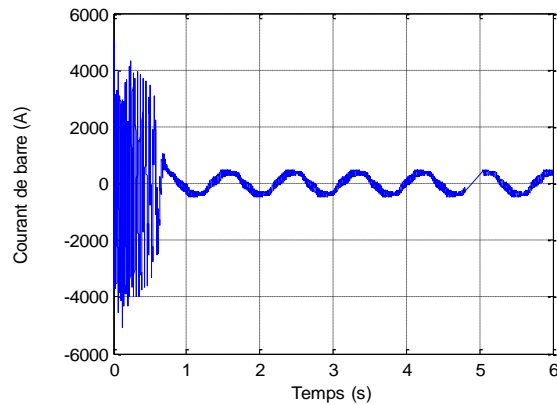
**Fig. II.22.** Vitesse de rotation du moteur asynchrone À l'état sain en charge



**Fig. II.23.** Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain en charge

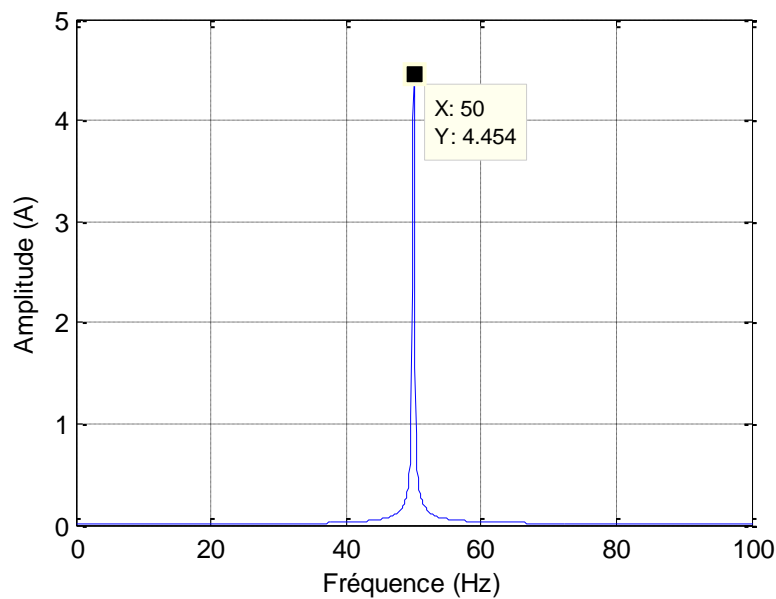


**Fig. II.24.** La puissance instantanée de la Phase V\_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge



**Fig. II.25.** Courant dans une barre rotorique du moteur asynchrone à l'état sain en charge

Les figures II. 26, 27 et II.28 représentent les spectres du courant statorique de la phase V\_U, du couple électromagnétique et de la puissance instantanée de la Phase V\_U, Il est clair que pendant le fonctionnement sain les spectres ne contiennent aucune composante spectrale représentative des défauts rotoriques.



**Fig. II.26.** Spectre du courant statorique phase V\_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge

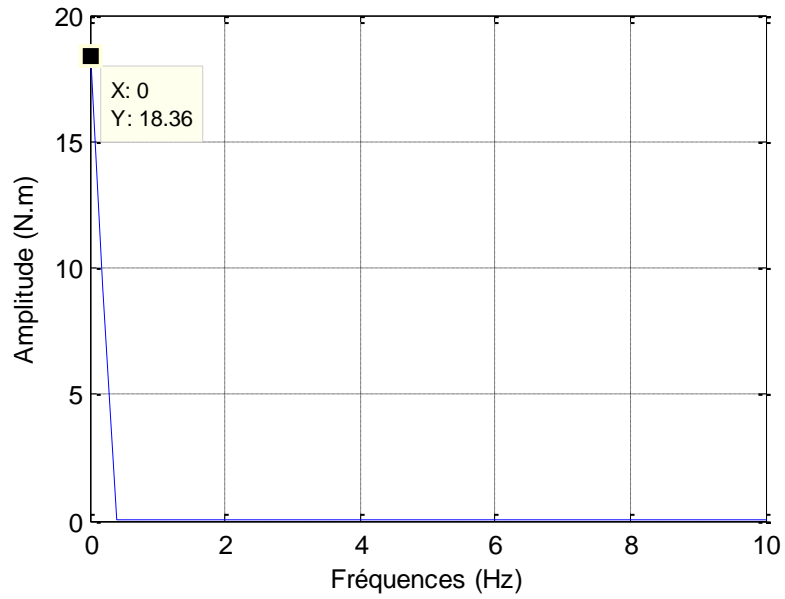


Fig. II.27. Spectre du Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain fonction en charge

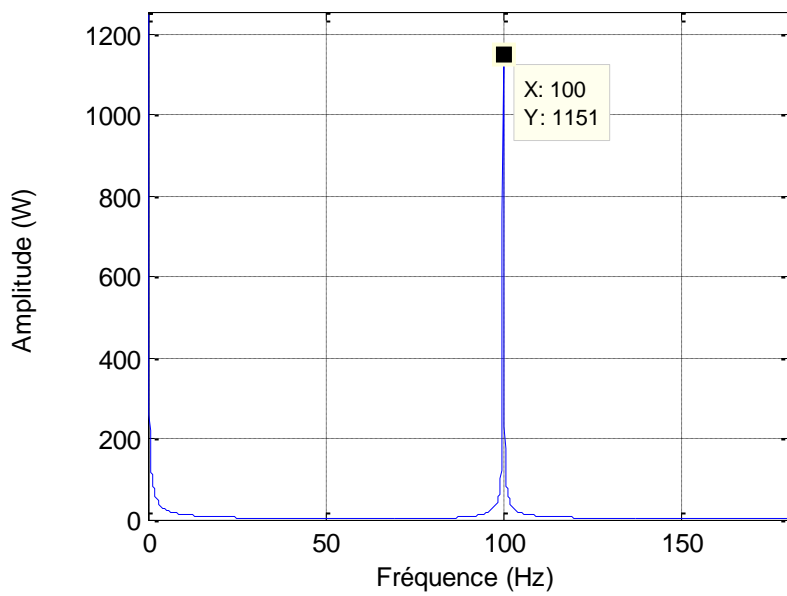


Fig. II.28. Spectre de la puissance instantanée de la Phase V\_U du moteur asynchrone à l'état sain en charge

## II.7 CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement du logiciel Flux 2D. On a commencé par la présentation de la méthode de calcul du 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 du principe de calcul du logiciel utilisé.

Nous avons simulé la MAS en 2 dimensions (2D) à l'état sain, à vide et en charge et visualisé la répartition des lignes du champ magnétique, de l'induction magnétique, les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse et la puissance). Aussi nous avons présenté les spectres du courant statorique de la phase V\_U, du couple électromagnétique et de la puissance instantanée de la Phase V\_U à l'état sain, en charge. Dans le prochain chapitre nous allons simuler la MAS dans l'état de défaut d'une et de plusieurs barres cassées et ceci pour plusieurs cas de charges.



### III.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 de la puissance instantanée obtenue à partir de capteurs de courants et de tension non encombrants.

La rupture d'une 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 La première méthode

La procédure consiste à simuler la machine avec défaut d'une, de deux puis de trois barres. Les signaux requis ont été tronqués de leur régime transitoire afin de pouvoir appliquer la FFT au signal courant ou au signal puissance. Les résultats de simulation relatifs aux courant, à la puissance, à la vitesse et au couple sont montrés de la figures III.1 à la figure III.9.

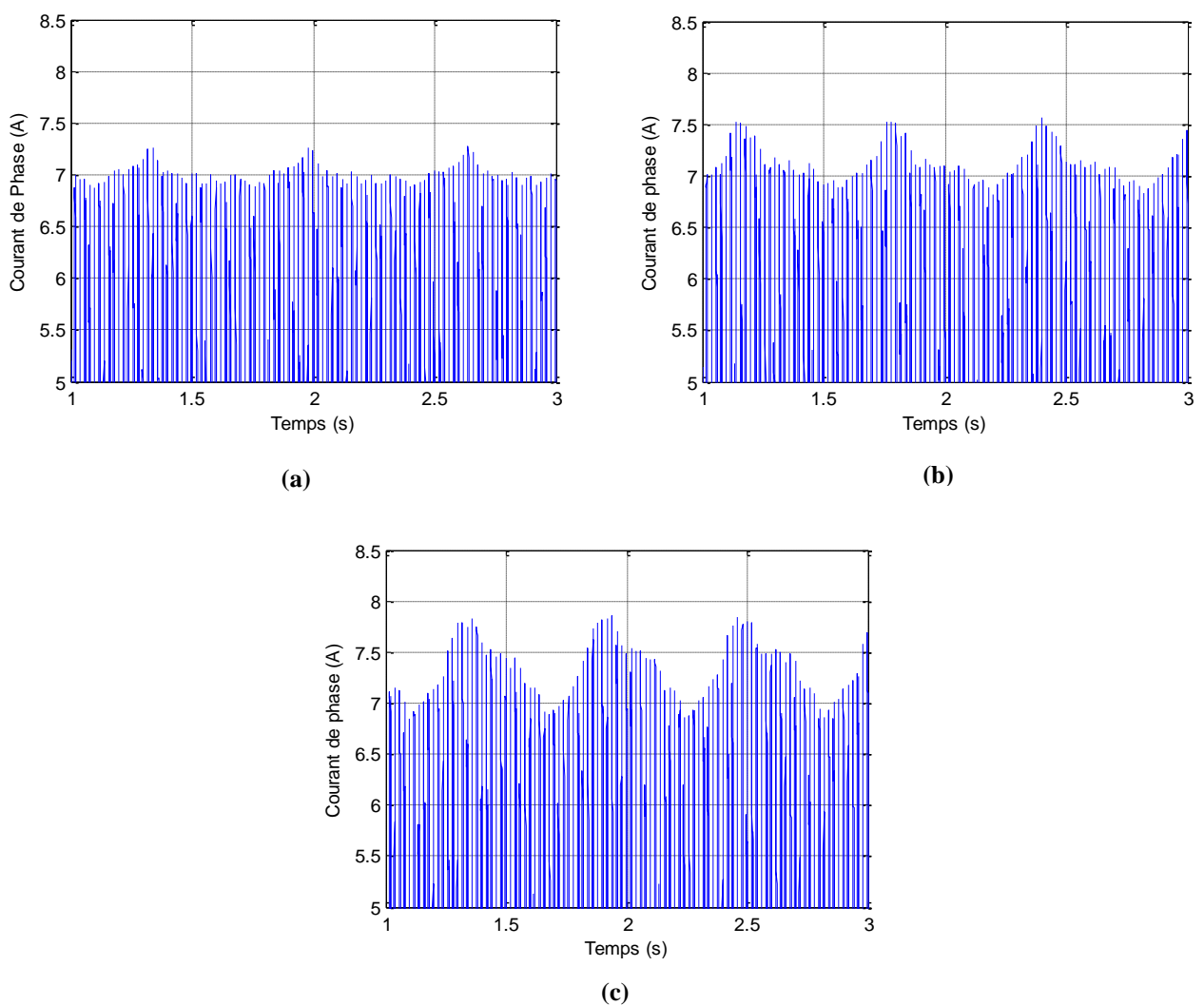
De plus à partir des observations montrant l'effet des cassures de barres sur les lignes de champ ont été faites. Aussi la fin du chapitre contient l'analyse spectrale de la puissance instantanée où l'on a montrée l'effet de la charge et du nombre de barres cassées sur les harmoniques de défaut.

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

La procédure consiste à montrer l'effet de l'augmentation du nombre de barres cassées sur les grandeurs courant, puissance, vitesse et couple.

#### III.2.1 grandeur courant

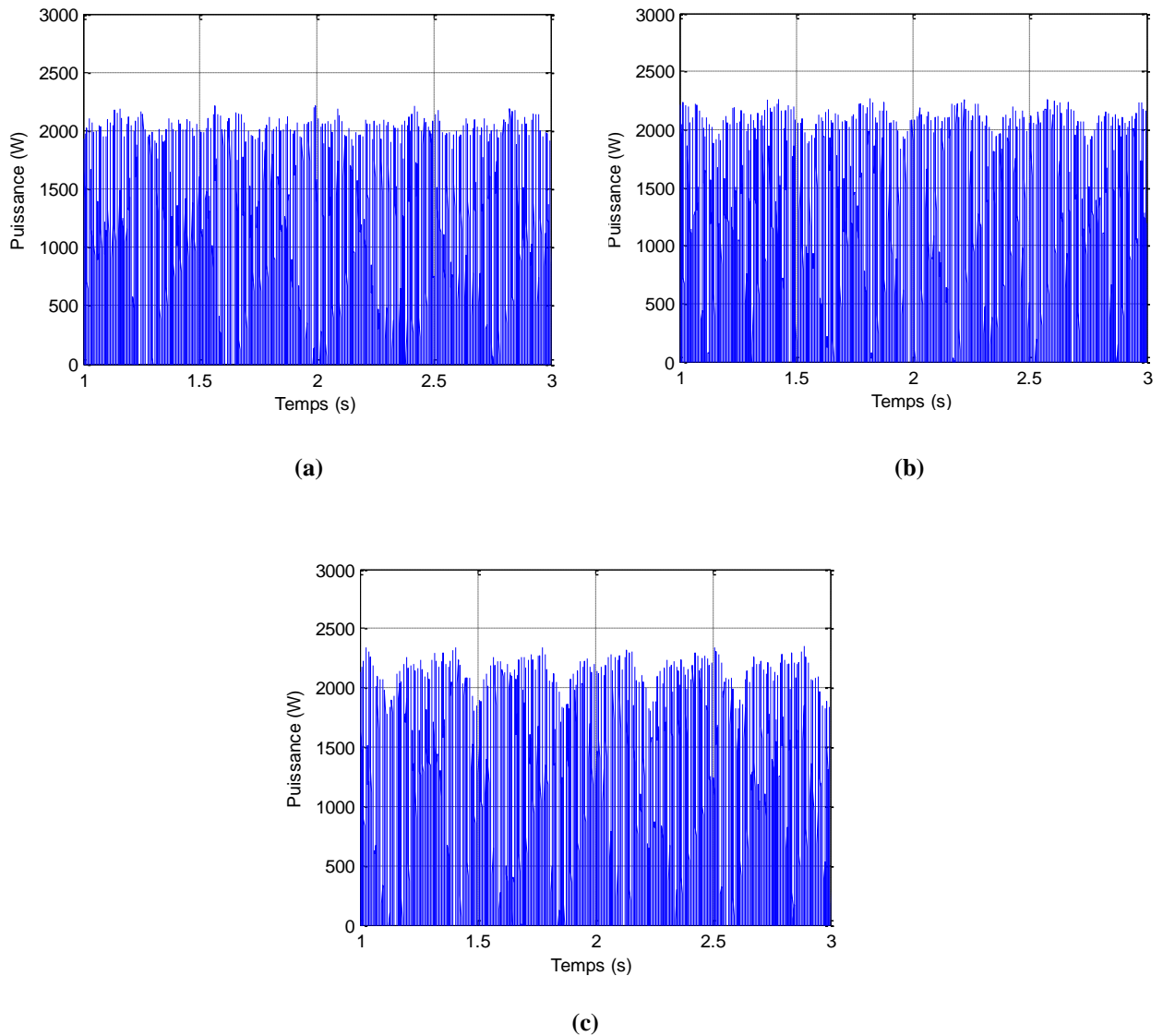
La fig. III.1 (a,b,c) présente 3 courants pour une, deux et 3 barres cassées. On remarque que les ondulations augmentent en amplitude et en fréquence lors de l'augmentation du nombre de barres cassées pour une charge de 50%.



**Fig.III.1.** Le courant statorique phase V\_U avec zoom pour : une (a) deux (b) trois barres cassées (c).

### III.2.2 grandeur puissance instantanée

La fig. III.2 (a,b,c) présente 3 puissances pour une, deux et 3 barres cassées. De même que le courant on constate que le fait d'augmenter le nombre de barres cassées a pour conséquence l'augmentation l'amplitude des ondulations et leur fréquence, ici pour une charge de 75%.



**Fig.III.2.** La puissance instantanée phase V\_U avec zoom pour : une (a) deux (b) trois barres cassées (c).

III.2.3 grandeur vitesse

Les figures ci dessous montrent l'influence du nombre de 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. De plus on constate que la vitesse diminue lorsque le nombre de barres cassées augmente, autrement c'est comme s'il y a eu augmentation de la charge.

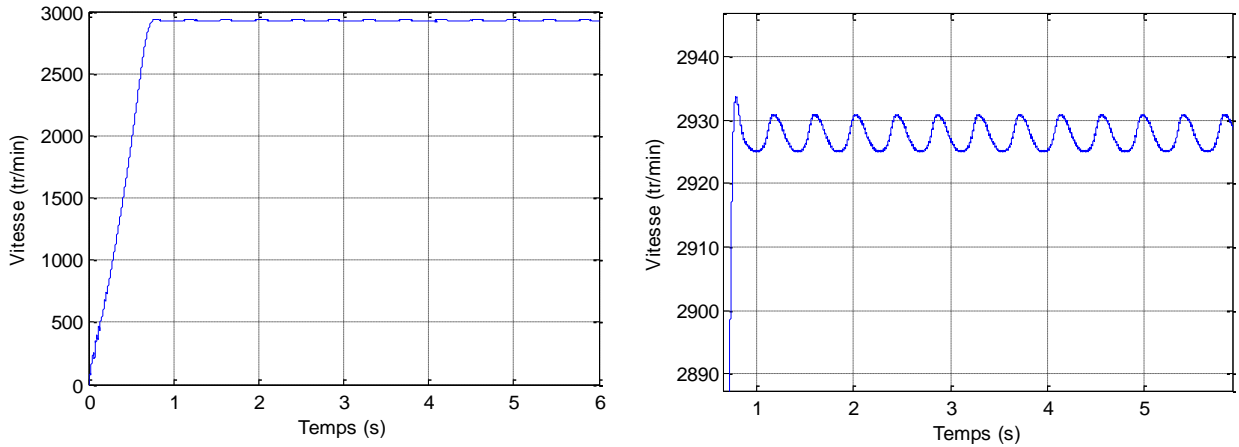


Fig.III.3.La vitesse de rotation et zoom avec une barre cassée

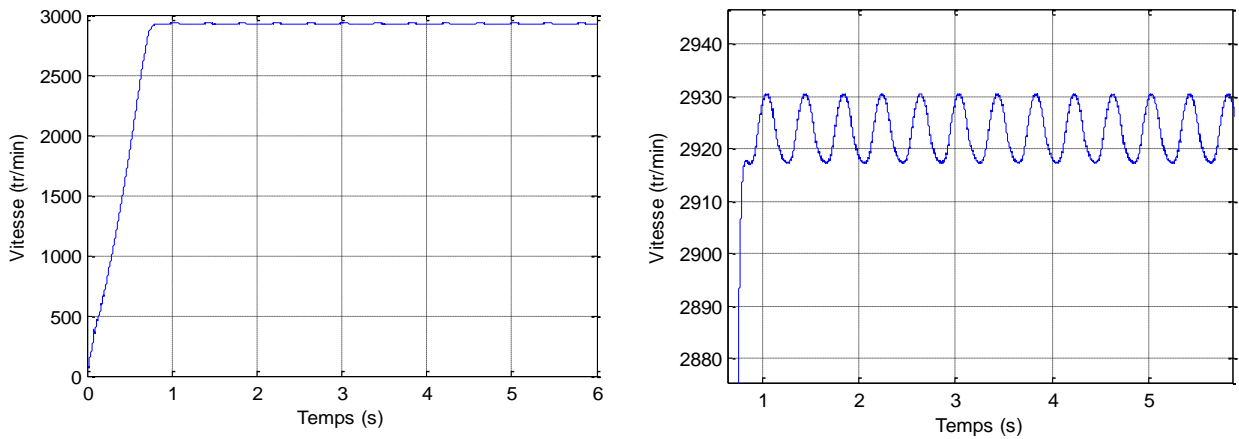


Fig.III.4.La vitesse de rotation et zoom avec deux barres cassées

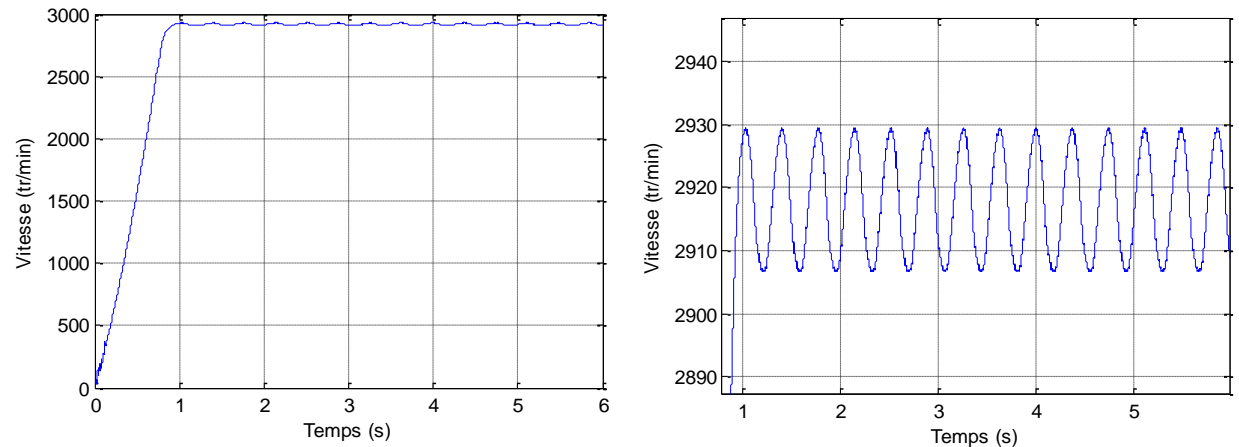


Fig.III.5.La vitesse de rotation et zoom avec trois barres cassées

### III.2.4 grandeur couple

On note également l'augmentation de l'amplitude des ondulations ainsi que leur fréquence dans l'allure du couple lors de l'augmentation du nombre des barres cassées. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique.

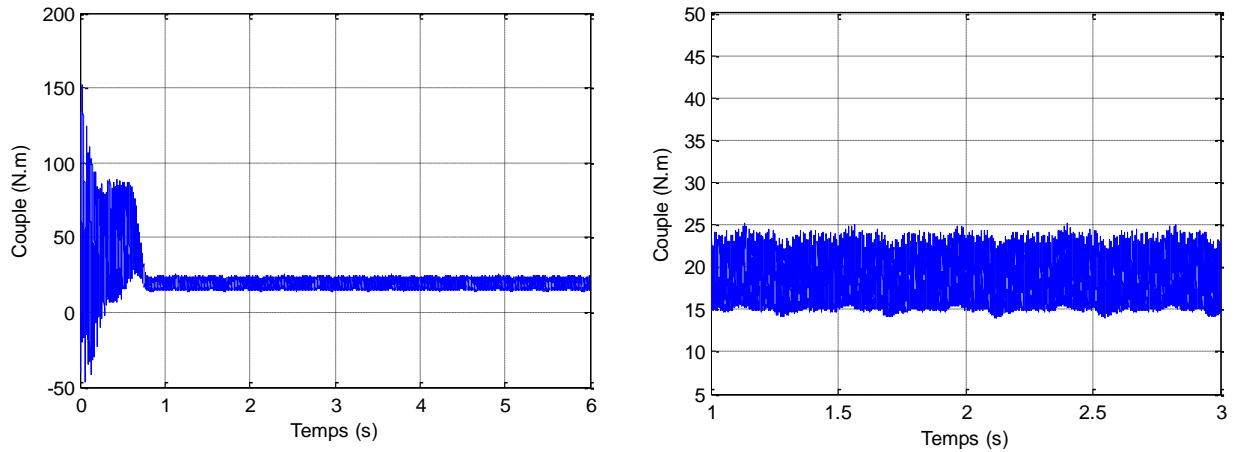


Fig. III.6. Le couple électromagnétique et zoom avec une barre cassée

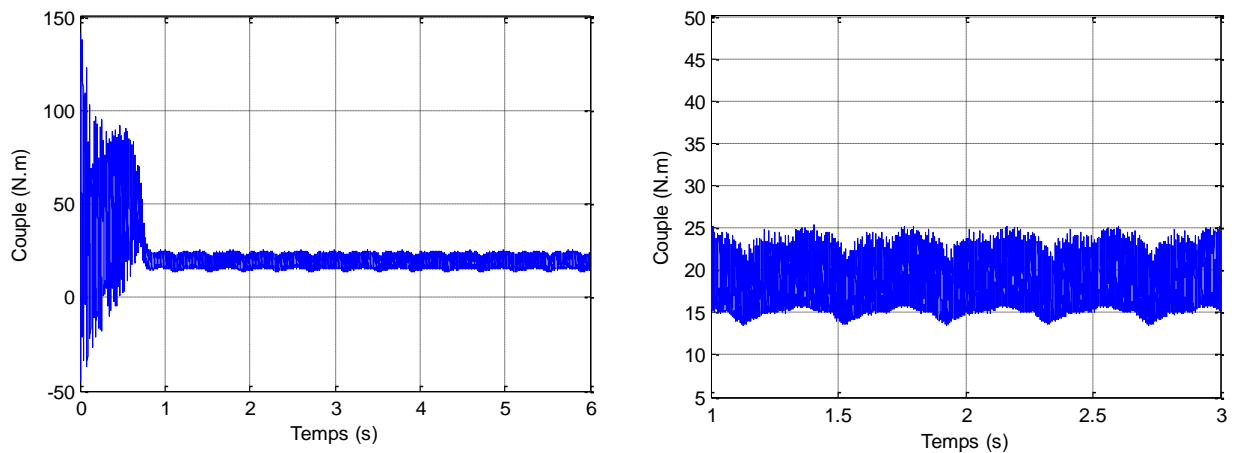


Fig. III.7. Le couple électromagnétique et zoom avec deux barres cassées

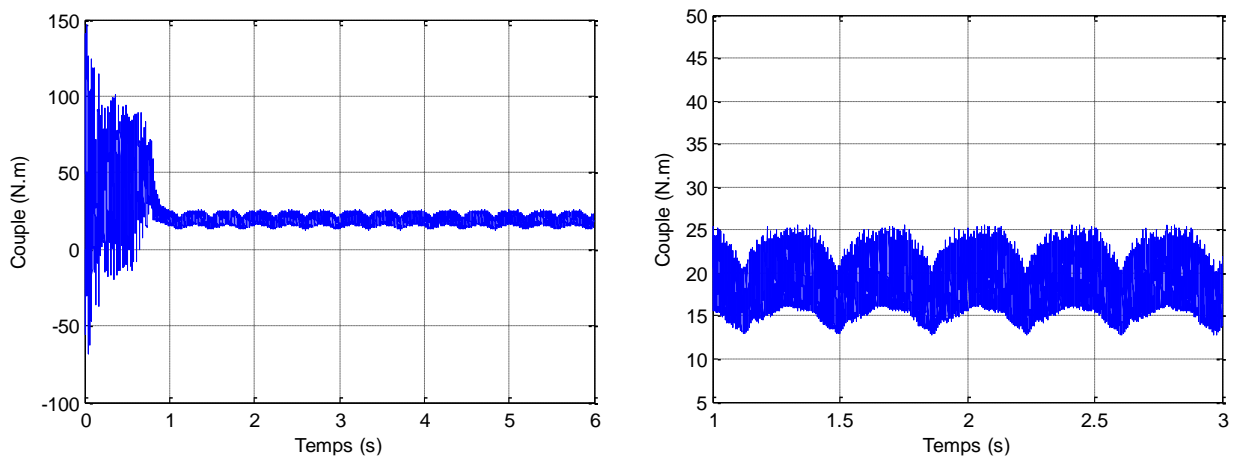


Fig.III.8. Le couple électromagnétique et zoom avec trois barres cassées

### III.3 EFFET DE LA BARRE CASSEE SUR LES BARRES ADJACENTES

La rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor et une augmentation de l'amplitude du courant dans les barres adjacentes aux barres cassées. Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées, ceci 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.

La fig. III.9 montre l'allure du courant de la barre rompue. Les trois autres figures représentent les courants des barres adjacentes à la barre rompue.

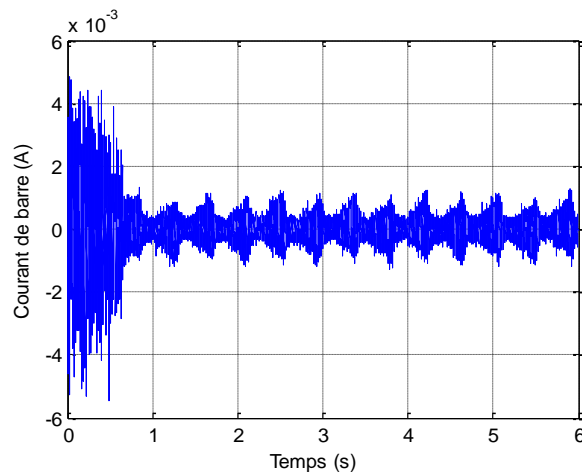
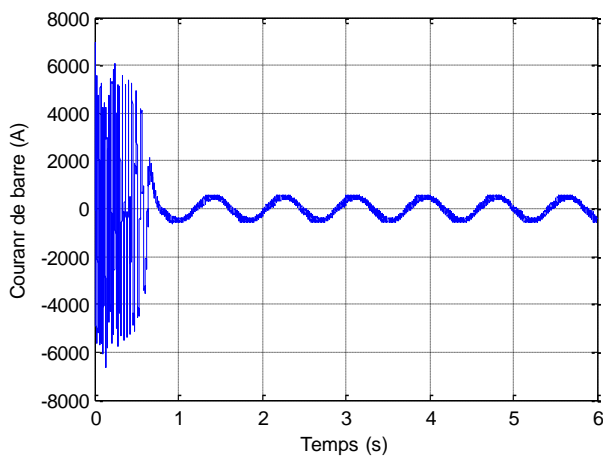
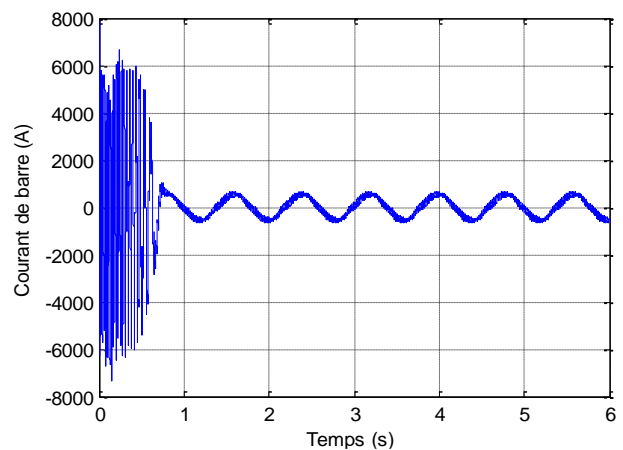


Fig. III.9. Le courant dans la barre cassée (barre 1)



(a)



(b)

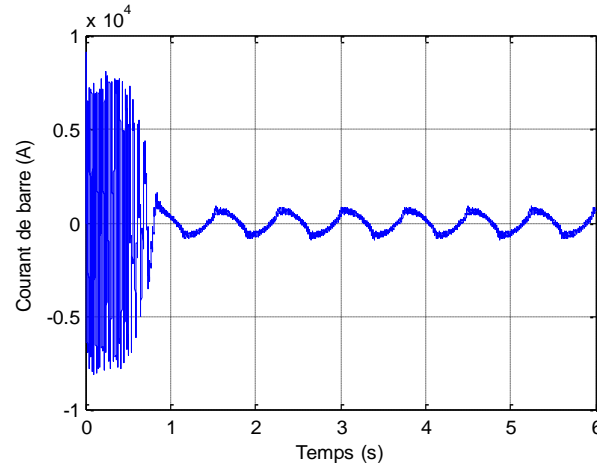
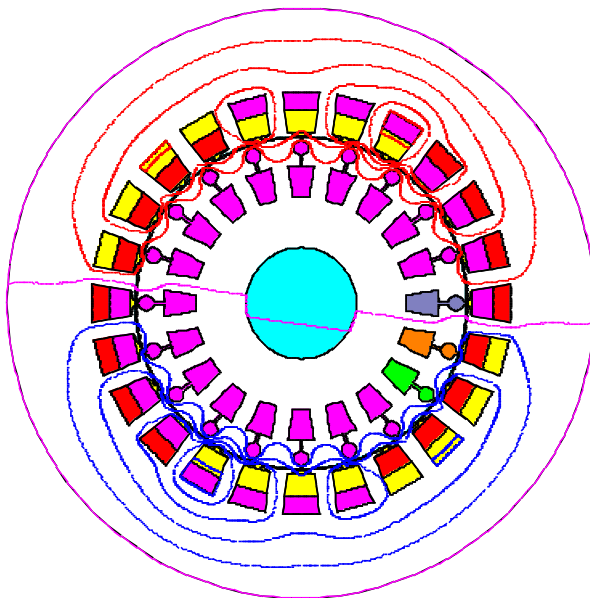


Fig.III.10. Le courant dans la barre adjacente aux barres cassées ;(a) avec une barre cassée ;(b) avec deux barres cassées ;(c) avec trois barres cassées

### III.4 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE

La fig. III.11 (a,b,c,d).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.



#### Résultats isovaleurs

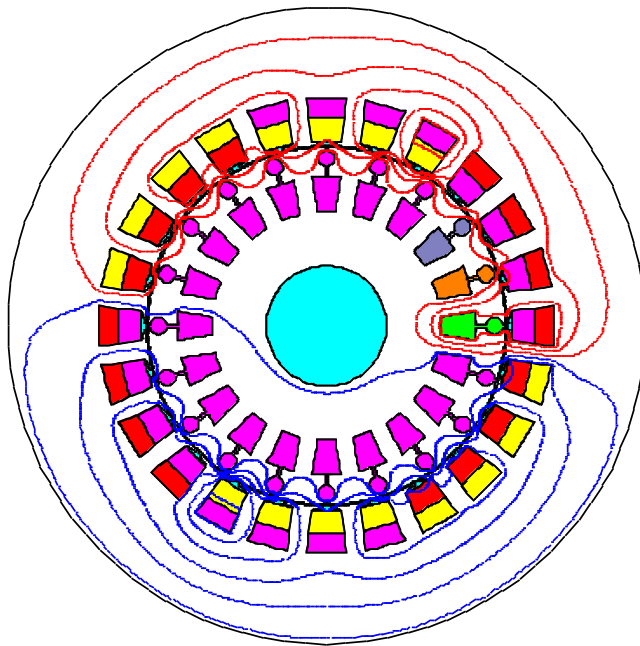
Grandeur : Equi flux Weber

Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0

Ligne / Valeur

1	/	-157,87876E-6
2	/	-126,30167E-6
3	/	-94,72458E-6
4	/	-63,14748E-6
5	/	-31,57039E-6
6	/	0
7	/	31,58379E-6
8	/	63,16089E-6
9	/	94,73798E-6
10	/	126,31508E-6
11	/	157,89217E-6

(a)



(b)

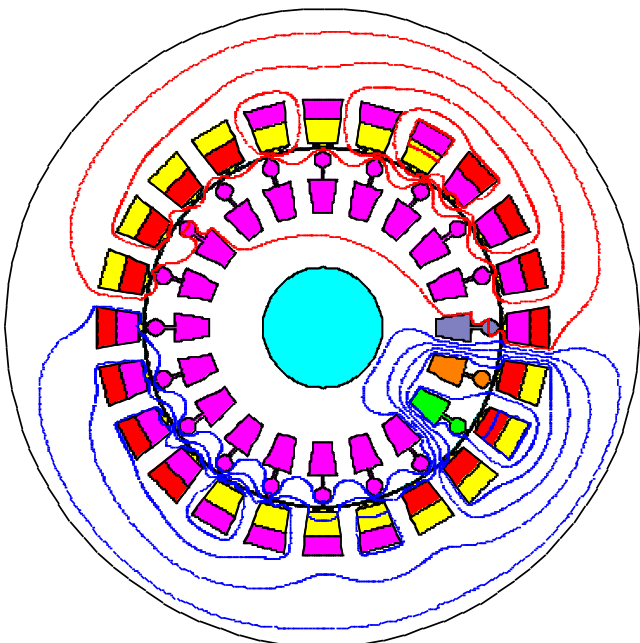
### Résultats isovaleurs

Grandeur : Equi flux Weber

Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0

Ligne / Valeur

1	/	-157,78057E-6
2	/	-127,21319E-6
3	/	-96,64582E-6
4	/	-66,07844E-6
5	/	-35,51107E-6
6	/	-4,9437E-6
7	/	25,62367E-6
8	/	56,19105E-6
9	/	86,75842E-6
10	/	117,32579E-6
11	/	147,89317E-6



(c)

### Résultats isovaleurs

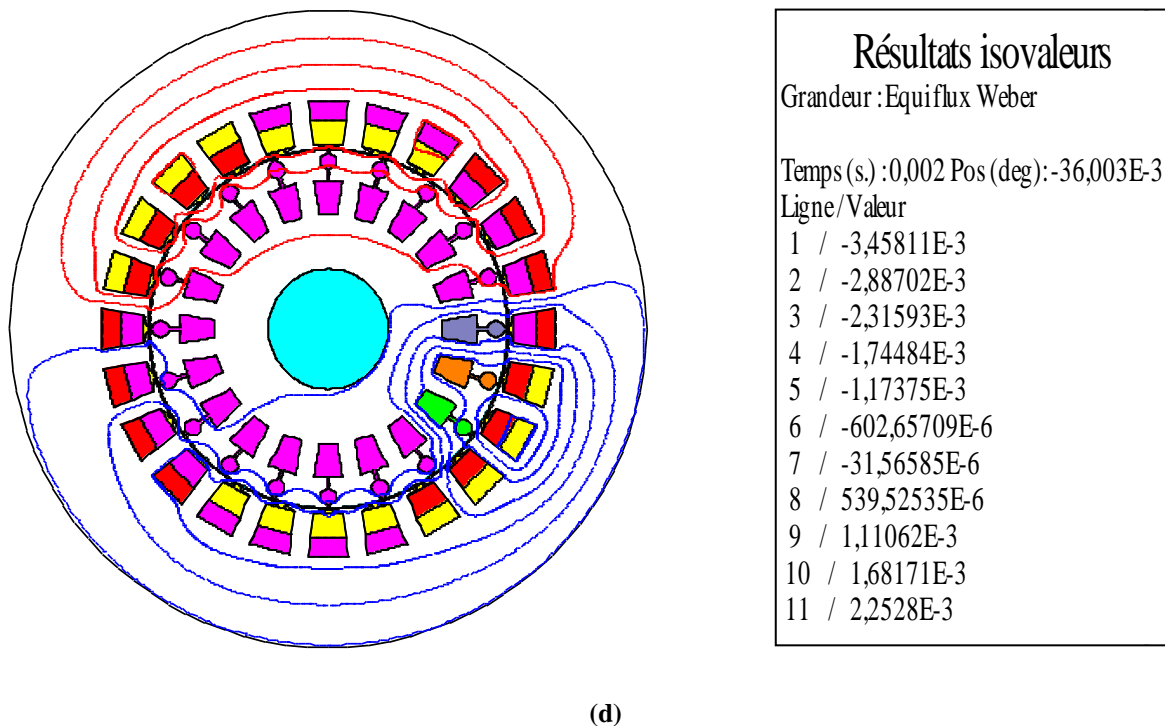
Grandeur : Equi flux Weber

Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0

Ligne / Valeur

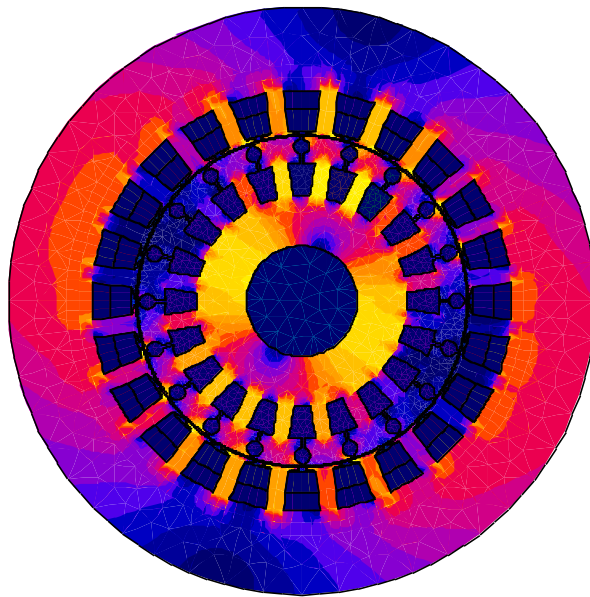
1	/	-184,20615E-6
2	/	-149,66809E-6
3	/	-115,13003E-6
4	/	-80,59198E-6
5	/	-46,05392E-6
6	/	-11,51587E-6
7	/	23,02218E-6
8	/	57,56024E-6
9	/	92,09829E-6
10	/	126,63635E-6
11	/	161,17441E-6





**Fig. II.11.** La distribution des lignes du flux au démarrage (a) machine saine ;(b) avec une barre cassée ;(c) avec deux barres cassées ;(d) avec trois barres cassées.

Les distributions de l'induction montrent 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.

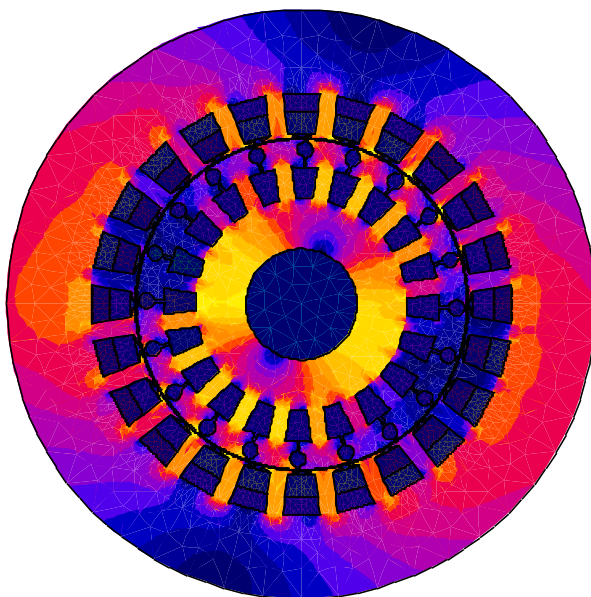


**Résultats dégradés**  
 Grandeur : [Induction] Tesla

Temps (s.) : 1 Pos (deg): 10,853E3  
 Intervalle / Couleur

47,12671E-6	/	151,4928E-3
151,4928E-3	/	302,93849E-3
302,93849E-3	/	454,38421E-3
454,38421E-3	/	605,82989E-3
605,82989E-3	/	757,27558E-3
757,27558E-3	/	908,72127E-3
908,72127E-3	/	1,06017
1,06017	/	1,21161
1,21161	/	1,36306
1,36306	/	1,5145
1,5145	/	1,66595
1,66595	/	1,8174
1,8174	/	1,96884
1,96884	/	2,12029
2,12029	/	2,27173
2,27173	/	2,42318

(a)



**Résultats dégradés**  
 Grandeur : [Induction] Tesla

Temps (s.) : 1 Pos (deg): 10,636E3  
 Intervalle / Couleur

68,96268E-6	/	152,9616E-3
152,9616E-3	/	305,85426E-3
305,85426E-3	/	458,74685E-3
458,74685E-3	/	611,6395E-3
611,6395E-3	/	764,53215E-3
764,53215E-3	/	917,42474E-3
917,42474E-3	/	1,07032
1,07032	/	1,22321
1,22321	/	1,3761
1,3761	/	1,5281
1,5281	/	1,68189
1,68189	/	1,83478
1,83478	/	1,98767
1,98767	/	2,14057
2,14057	/	2,29346
2,29346	/	2,44635

(b)

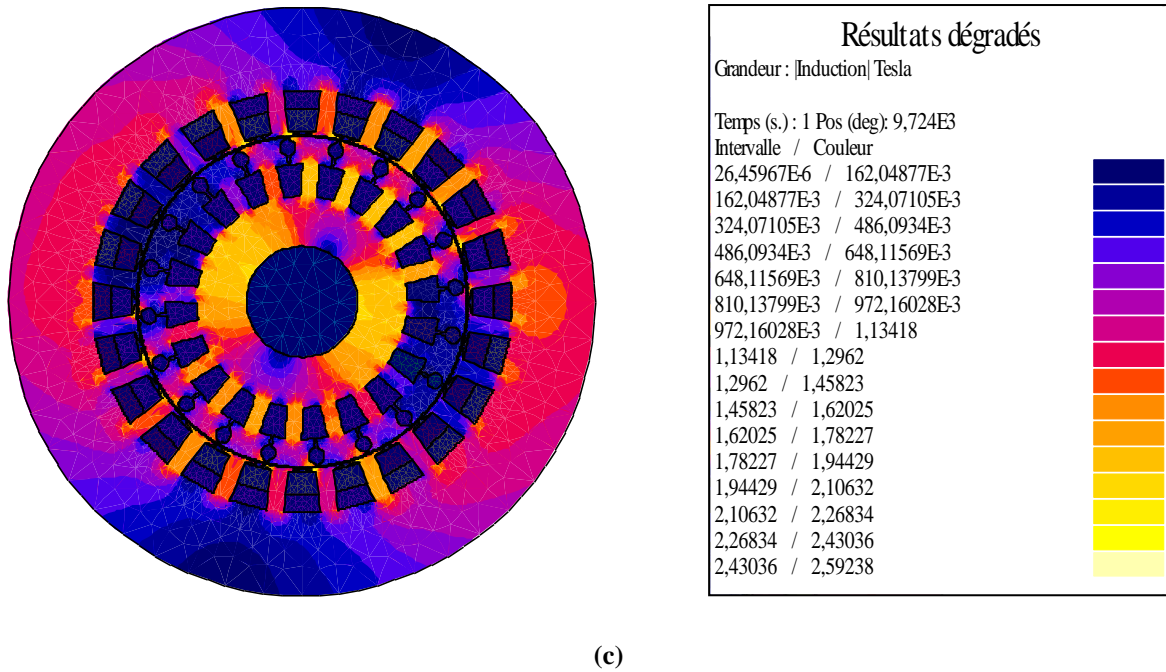


Fig. III.12. L'induction magnétique (a) avec une barres cassées ;(b) avec deux barres cassées (c) avec trois barres cassées

### III.5 DETECTION DES DEFAUTS ROTORIQUES (DEFAUT CASSURE DE BARRE) PAR L'ANALYSE SPECTRALE DE LA PUISSANCE INSTANTANEE

#### a. défaut d'une barre cassée

La fig. III.13 montre la superposition de trois courbes représentant les spectres de puissance respectifs pour les charges de 25, 50 et 75% où l'on observe de manière remarquable l'effet de la charge sur l'augmentation des amplitudes des harmoniques de défaut. Tandis que la fig. III.14 représente le spectre précédent agrandi aux faibles fréquences.

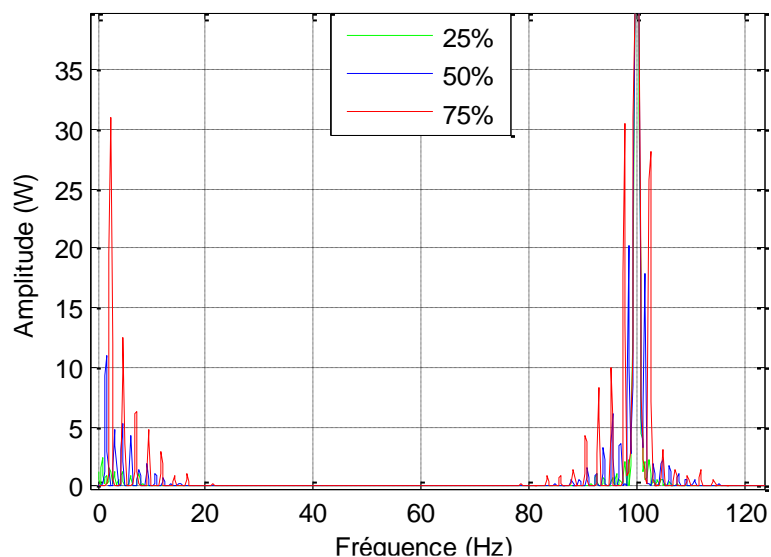


Fig. III.13. Spectre de la puissance instantané état de cassure 1 barre avec déférente charge

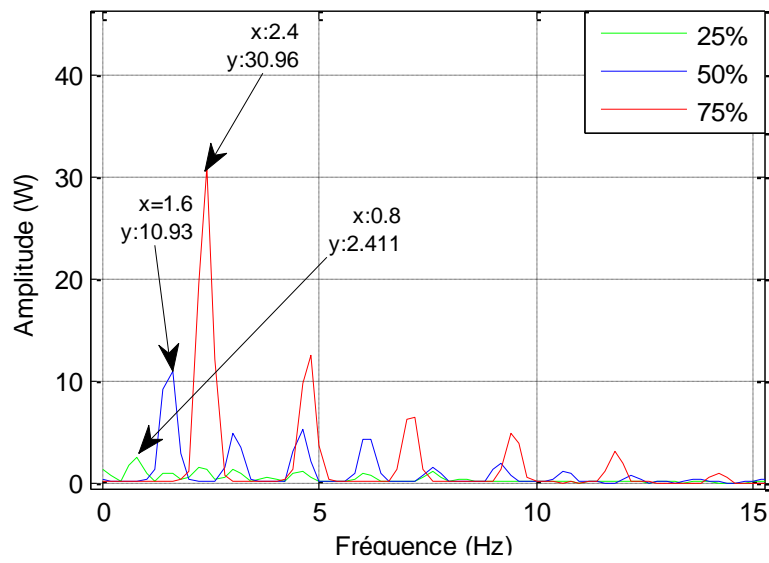


Fig.III.14. Spectre de la puissance instantané avec zoom état de cassure 1 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 15Hz)

**b. défaut de deux barres cassées**

La figure III.15 montre la superposition de trois courbes représentant les spectres de puissance (pour un défaut de deux barres) respectifs pour les charges de 25, 50 et 75% où l'on observe aussi et de manière remarquable l'effet de la charge sur l'augmentation des amplitudes des harmoniques de défaut. Tandis que la fig. III.16 représente un zoom sur le spectre précédent aux faibles fréquences.

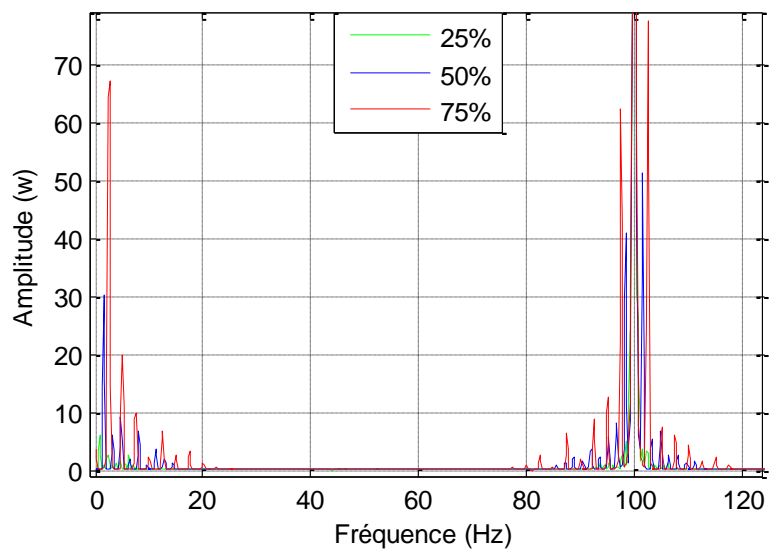


Fig.III.15. Spectre de la puissance instantané état de cassure2 barre avec déférente charge

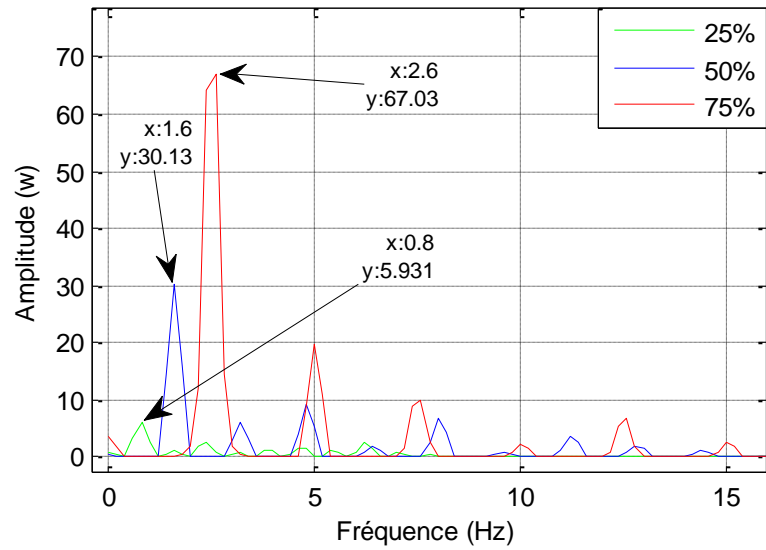


Fig.III .16. Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 2 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 15Hz)

**c. défaut de trois barres cassées**

On retrouve les constatations que pour les deux cas précédents.

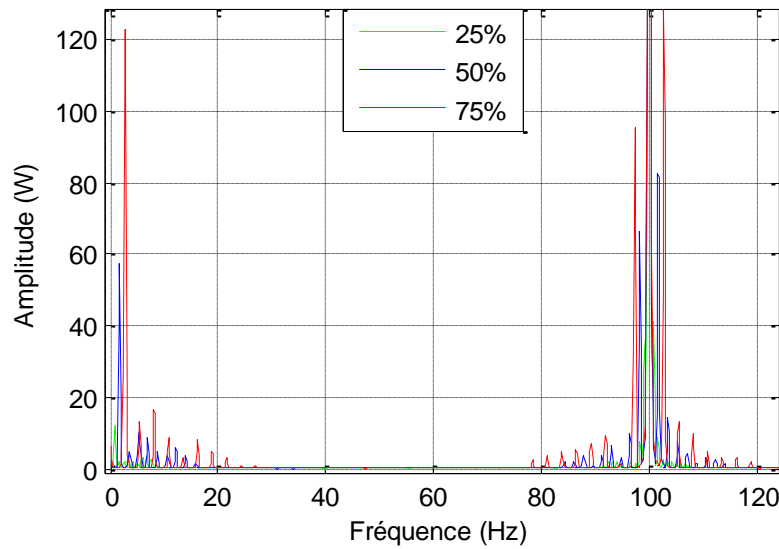


Fig. III.17. Spectre de la puissance instantané état de cassure3 barre avec déférente charge

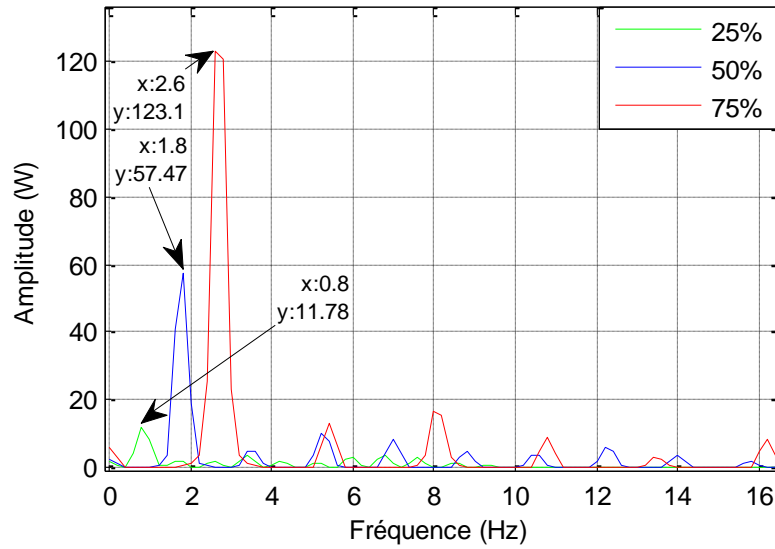


Fig.III .18.Spectre de la puissance instantanée avec zoom état de cassure 3 barre pour différentes charges (Basse fréquence de 0 à 16Hz)

**d. Effet du nombre de barres cassées sur les harmoniques de défaut pour une même charge (75%)**

La fig. III.19 suivante montre la superposition des trois courbes précédentes où l’on observe de manière remarquable l’effet de l’augmentation du nombre de barres cassées sur l’augmentation de l’amplitude de l’harmonique de défaut.

Les courbes des spectres des trois puissances obtenues pour une, deux et trois barres cassées se superposent parfaitement sans éloignement des harmoniques si ce n’est qu’elles sont différentes en amplitude. Ceci est très évident sur la fig. III. 20.

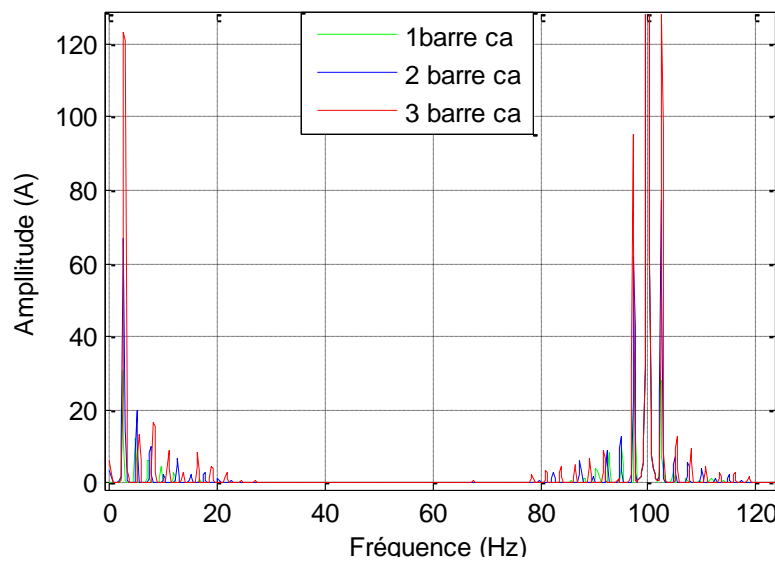
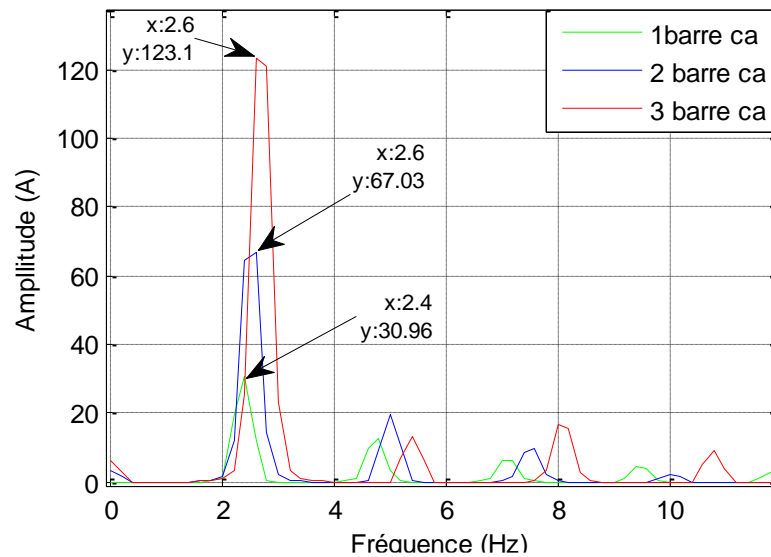


Fig. III.19. Spectre de la puissance instantané état en charge (75%) avec déférente cassure de barre



**Fig.III .20.** Spectre de la puissance instantanée avec zoom état en charge (75%) avec déférente cassure de barre (Basse fréquence de 0 à 16Hz)

### III.6 CONCLUSION

Nous avons développé dans ce chapitre un modèle basé sur 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.

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 pour un ordinateur de 8G de RAM et CORE-i5\_6400. A noté aussi que la mémoire à réserver dans le disque dur doit être très grande (70 Go pour une solution de 6 secondes avec un pas de 0.0001s).

## **CONCLUSION GENERALE**

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 affecter 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 le signal puissance instantanée qui comprend le signal courant et dont le signal est plus riche en harmoniques.

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

Les résultats trouvés sont très satisfaisants et sont conformes avec ceux de la littérature. Nous avons pu observer les ondulations sur les grandeurs courant, puissance, couple et vitesse ainsi que leur accroissement lors de l'augmentation de la charge et du nombre de barres cassées.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectral de la puissance instantanée et par conséquent de déterminer les composantes  $(1 \pm 2k) f_s$  caractérisant le défaut de barres rotoriques. Ensuite, nous avons montré l'influence du nombre de barres cassées sur ces composantes. 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.

L'inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très très long et qui demande un ordinateur très puissant, élément non disponible dans notre possession.

Comme perspectives, nous proposons à court terme d'étudier l'impact du déséquilibre de la 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 ou de la puissance afin de surveiller le fonctionnement de la machine en ligne, et d'assurer ainsi une maintenance préventive.



---

**Bibliographie**

[CHEL2017] : Chellouai Nacereddine Mohammed «Modélisation Des Machines Electriques Par Éléments finis» du diplôme de master Option Machines électriques Université Mohamed Khider Biskra 2017

[SAH.10] : Sahraoui. Mohamed, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ", Thèse de Doctorat, UNV Mohamed Khider Biskra ,2010.

[BES 16 ] : bessam besma, "Analyse et détection des défauts dans la machine Asynchrone à base des techniques intelligentes", Thèse de Doctorat, UNV Mohamed KHIDER Biskra ,02/06/2016.

[Zouz 15] : Zouzou Sara du diplôme de magister « détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées » Option Machines électriques Université Mohamed Khider Biskra 2015

[SAK 12] :Y. Saker Commande vectorielle d'une machine asynchrone avec défaut, Thèse Magister, Université Mohamed khider Biskra, 2012.

[SAH 03] :M. Sahraoui Contribution au diagnostic d'une machine asynchrone triphasée a cage, Thèse Magister, Université Mohamed khider Biskra, 2003.

[DED 04] :G.Dedier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances» thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.

[KHL 12] : S. Khelif, «Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique », mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khider Biskra, 2012

[BED16] : Mohamed Bedboudi, «Commande et diagnostic des défauts de la machine asynchrone», thèse de doctorat, Option Automatique université badji mokhtar annaba 2016

[HAL2015] : Halem Noura« Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis » du diplôme de doctorat option électrotechnique Université Mohamed Khider Biskra 2015

[DOC TECH 2006] : Document technique du moteur à induction FLUX® Application 2D L'évaluation de la qualité de FLUX2D (Norme Electricité de France, numéro enregistré AQM1L002) Ce document technique a été conçu et édité le 14 juin 2006 avec la participation d'EPM\_NM, Laboratoire de l'Université POLITEHNICA de Bucarest, ROUMANIE  
Réf: K205-P-930-FR-05/06



## Annexe

	<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
<b>MACHINE</b>	Puissance	7.5kW
	Courant	8.89 A
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2925tr/min
	Nombre de paires de pôles	1
	Longueur du paquet de tôles	125mm
<b>STATOR</b>	Nombre d'encoches	24
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	120mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	1.54Ω
<b>ROTOR</b>	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
<b>ENTREFER</b>	Epaisseur	0.5mm