

**République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur  
et de la Recherche scientifique**



**Centre Universitaire d'EL-Oued  
Institut des Sciences et de Technologies**



**Mémoire de Fin d'Etude  
Présenté pour l'obtention du diplôme de**

**LICENCE ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et de Technologies  
Filière: Génie Électrique  
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

## **Thème**

***Contribution À La Modélisation De La  
Machine Asynchrone Par La Méthode  
Des Éléments Finis***

**Ridigé par:  
HALEM NOURA**

**Réalisé par:  
ZAIME KAMEL  
ABSSI MED BACHIR**

**Soutenu le 10 Juin 2012**

# Sommaire

## *Chapitre 1*

### *Synthèse bibliographique*

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale .....                                           | 01 |
| <b>1.1</b> Introduction.....                                          | 02 |
| <b>1.2</b> Equations de base et lois liées a la matière .....         | 02 |
| <b>1.3</b> Formulation des équations électromagnétiques .....         | 04 |
| <b>1.3.1</b> Modèle magnétostatique .....                             | 04 |
| <b>1.3.2</b> Modèle magnétodynamique .....                            | 05 |
| <b>1.4</b> Méthode des éléments finis (mef).....                      | 06 |
| <b>1.5</b> Généralité sur la machine asynchrone.....                  | 08 |
| <b>1.5.1</b> Constitution de la machine .....                         | 08 |
| <b>1.5.2</b> Type de bobinage appliqué .....                          | 08 |
| <b>1.5.2.1</b> Bobinage statorique.....                               | 08 |
| <b>1.5.2.2</b> Bobinage rotorique.....                                | 09 |
| <b>1.5.3</b> Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone..... | 09 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| • Conclusion ..... | 10 |
|--------------------|----|

## ***Chapitre 2***

### *Modèle élément finis appliqué a la machine asynchrone*

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| <b>2.1</b> Introduction.....               | 11 |
| <b>2.2</b> Généralités.....                | 11 |
| <b>2.3</b> Définition de la géométrie..... | 13 |
| <b>2.4</b> Propriétés des matériaux .....  | 14 |
| <b>2.5</b> Maillage.....                   | 15 |
| <b>2.6</b> Résultats.....                  | 17 |
| <b>2.7</b> Conclusion.....                 | 19 |
| Conclusion générale.....                   | 20 |
| AnnexeA.....                               | 21 |
| Bibliographie.....                         | 22 |

# Liste de figures

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.1:</b> fonction d'interpolation d'un élément.....                                       | 07 |
| <b>Figure 1.2 :</b> Photo d'une machine asynchrone avec le stator et le rotor qui la constituent... | 09 |
| <b>Figure 2.1 :</b> L'architecture des encoches statorique et rotorique.....                        | 11 |
| <b>Figure 2.2 :</b> Répartition du bobinage statorique.....                                         | 13 |
| <b>Figure 2.3 :</b> Circuit magnétique de la machine asynchrone.....                                | 13 |
| <b>Figure 2.4 :</b> Courbe d'aimantation $B(H)$ (Msteel-19).....                                    | 14 |
| <b>Figure 2.5:</b> L'affectation des matériaux sur les régions de la machine.....                   | 15 |
| <b>Figure 2.6 :</b> Répartition du maillage sur la machine complète (éléments triangulaires).....   | 16 |
| <b>Figure 2.7 :</b> Répartition des lignes d'équiflux.....                                          | 17 |
| <b>Figure 2.8 :</b> Répartition de l'induction magnétique.....                                      | 18 |
| <b>Figure 2.9 :</b> Courbe de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer.  | 18 |

# INTRODUCTION GENERALE

Les phénomènes se trouvent dans des régions de géométrie très variée (Exemple : pièce des machines tournantes, transformateurs).

Ces qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivée partielles.

En générale, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes approchées.

Pour des géométries plus complexes, on a recourt à des méthodes numériques qui font appel à des techniques de discrétisation, en effet, elles transforment les équations aux dérivées partielles du champ en un système d'équations algébriques dans le domaine d'étude compte tenu des conditions aux limites.

Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût.

Ainsi, et pour ce faire, cette mémoire sera présentée comme suit :

- Dans un premier chapitre, nous présenterons les équations et les modèles mathématiques qui caractérisent les phénomènes électromagnétiques.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'application de la méthode des éléments finis sur la machine asynchrone triphasée en utilisant une modèle magnétostatique.

# ***Chapitre 1***

*Synthèse*

*bibliographique*

## 1.1 Introduction

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont le couronnement de vieux concepts de la physique.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les équations mathématiques caractérisant l'évolution spatiale et temporelle des phénomènes physiques.

## 1.2 Equations de base et lois liées a la matière

C'est J. C. Maxwell (1831-1879) qui a apporté à l'étude de l'électromagnétisme la puissance d'un formalisme mathématique, précisant les notions qualitatives introduites par Faraday. Il parvient à établir le groupe d'équations qui portant son nom, et qui constituent toujours la base de nos connaissances théoriques de l'électromagnétisme.

Dans ces formulations, J. C. Maxwell tenait à décrire des relations entre les grandeurs de l'électromagnétisme dans le cas général et où l'espace et le temps ont une influence dans un milieu physique quelconque, avec une densité de courant  $\vec{J}$  variable et une distribution de charge  $\rho$ . Ces équations sont introduites comme postulats fondamentaux de l'électromagnétisme [Khene 06]:

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$div \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

Ou :

$\vec{E}$ : Champ électrique [ $v / m$ ]

$\vec{B}$ : Induction magnétique. [ $T$ ]

$\vec{H}$ : Champ magnétique [ $A/m$ ],

$\vec{D}$ : Induction électrique. [ $C/m^2$ ]

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ : vecteur densité de courant de déplacement, négligeable aux basses fréquences [ $A/m^2$ ]

$\vec{J}_c$  : Densité du courant de conduction [ $A/m^2$ ],

$\rho$  : Densité volumique de charge électrique [ $C/m^3$ ],

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leurs joindre des relations qui définissent la matière ou le milieu à étudier :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ ou } \vec{H} = \nu \vec{B} \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (1.7)$$

Ou:

$\mu$ : Perméabilité magnétique [ $H/m$ ],

$\nu$  : Réductivité magnétique [ $m/H$ ],

$\varepsilon$  : Permittivité diélectrique [ $F/m$ ].

$\sigma$ : Conductivité électrique [ $S/m$ ],

L'équation (1. 6) est définie dans un milieu diélectrique et l'équation (1. 7) est définie dans un milieu conducteur.

### 1.3 Formulation des équations électromagnétiques

Les modèles de J. C. Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables.

Les équations se découplent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique.

Dans le cadre de notre travail, seul le modèle magnétostatique et le modèle magnétodynamique seront considérés et détaillés.

#### 1.3.1 Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  de l'équation (1. 1) est nul. Ceci s'explique par le fait que

le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent :

##### a. Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce cas, les courants électrique sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps .D'après les équations (1.2) et (1.3) , on obtient:

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{0} \quad (1.8)$$

$$\text{div} B = 0 \quad (1.9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.10)$$

$\vec{H}$  Dérive d'un potentiel scalaire magnétique  $\Phi$  ,d'ou la nomination du modèle magnétostatique

$$\text{Scalaire, tel que : } \vec{H} = -g \vec{\text{grad}} \Phi \quad (1.11)$$

Le modèle ramène alors à l'équation :

$$\text{div}(\mu \vec{\text{grad}}) = 0 \quad (1.12)$$

### b. Modèle magnétostatique vectorielle

Dans ce modèle, les courants électriques ne sont pas nuls. vient alors que :

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (1.13)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (1.14)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.15)$$

La relation  $\text{div} \vec{B} = 0$  permet de définir une fonction vectoriel  $\vec{A}$  appelée potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\vec{B} = \vec{\text{rot}} \vec{A} \quad (1.16)$$

D'où le système d'équation :

$$\vec{\text{rot}} \vec{\text{rot}} (\vec{A}) = \vec{J} \quad (1.17)$$

En tenant compte des relations de l'analyse vectorielle l'équation (1.10) devient :

### 1.3.2 Modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme qui représente la variation temporelle de vecteur induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault.

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques, des dispositifs de chauffage par induction, des transformateurs, ... etc.

En se basant sur les équations de J. C. Maxwell, on peut formuler l'équation qui décrit

l'évolution spatiale - temporelle des phénomènes électromagnétiques.

#### 1.4 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangle ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié (compris l'espace avironnant) [Bouharkat 06].

Sur chaque élément du découpage, la fonction d'interpolation est de la forme

$$A = \sum_{m=1}^{ns} A_m Q_m(x, y) \quad (1.18)$$

Où  $ns$  est le nombre de sommets de cet élément.

Le polynôme d'approximation (du second degré pour un élément quadrilatéral) est déterminé par ces coefficients (ici six).

$$Q_m(x, y) = a_m + b_m x + c_m y + d_m x^2 + e_m xy + f_m y^2 \quad (1.19)$$

Les coefficients peuvent être déterminés par les valeurs de la fonction en des points particuliers appelés nœuds de l'élément (ici les sommets du triangulaire dans la figure 1.1

Ainsi, le potentiel est défini à l'intérieur de chaque élément.

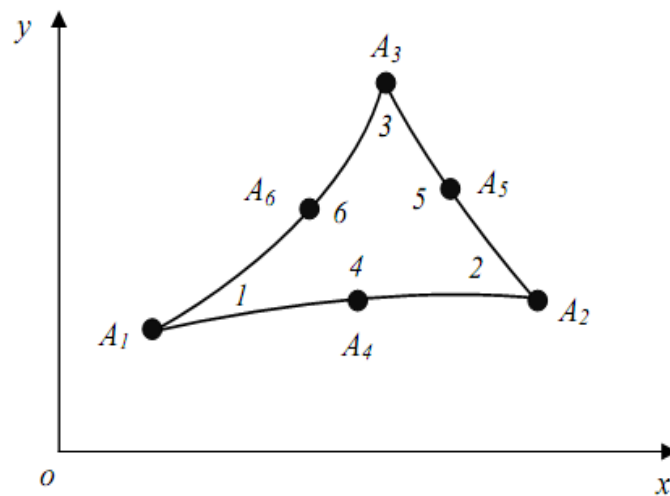


Figure 1.1 :fonction d'interpolation d'un élément

Le processus de discrétisation par éléments finis aboutit, alors à un système algébrique de la forme

$$[K][A] + [F] = 0 \quad (1.20)$$

Où  $[A]$  est un vecteur dont les composantes sont les inconnues du problème et représentent les valeurs nodales du potentiel magnétique  $[K]$  est une matrice symétrique dont les composantes sont fonction des propriétés magnétiques des matériaux composant le système et indépendantes des sources du champ  $[F]$  est un vecteur fonction des sources du champ (courants, tensions, aimants).

Ainsi la détermination des valeurs,  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , que la fonction inconnue  $A(x, y)$  prend en chaque nœud de chaque élément de découpage, représente le déroulement des calculs pour arriver à la solution du problème [Sablonnière 1988]

## **1.5 Généralité sur la machine asynchrone**

### **1.5.1 Constitution de la machine**

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure 1.2). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statiques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rétorque nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction.

### **1.5.2 Type de bobinage appliqué**

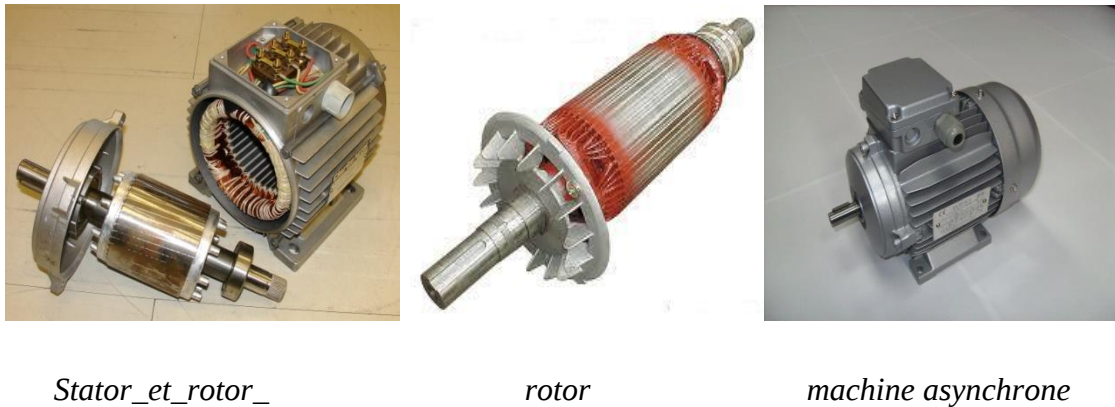
#### **1.5.2.1 Bobinage statorique**

Le stator, composé de trois enroulements logés symétriquement dans des encoches situées à la périphérie de ce dernier. Ces enroulements sont alimentés par un système de tensions équilibrées et peuvent être couplés en étoile ou en triangle. Le bobinage statorique quant à lui, est réalisé par la mise en série et parallèle de spires élémentaires. L'organisation des spires est faite en fonction de la vitesse, du couple et des tensions d'alimentation désirées de la machine, du nombre d'encoches, du dimensionnement de la machine ou encore à partir de l'environnement de travail. À titre d'exemple nous citerons [Schaeffer-99] où le bobinage est présenté dans la (figure 1.2). Pour des raisons techniques de mise en œuvre, et pour limiter les effets pelliculaires, les conducteurs statoriques doivent être en fil de cuivre isolé de petite section. L'isolation étant réalisée à partir d'une résine protectrice. Certaines machines proposent plusieurs sections par encoche, où les sections peuvent être de phases différentes. Une isolation supplémentaire peut être rajoutée pour l'amélioration du mur isolant entre les phases. Nous invitons le lecteur qui s'intéresse au bobinage de la machine asynchrone ainsi que l'isolation de ce dernier de se référer au livre suivant.

En phase finale, lorsque le bobinage est placé dans les encoches, il sera englué dans un vernis qui le maintiendra collé et améliorera l'isolation électrique. Une cale supplémentaire aide au blocage des conducteurs dans les encoches pour pallier le problème des efforts mis en jeu lors du fonctionnement (force de Lorentz).

### 1.5.2.2 Bobinage rotorique

Le rotor présente quand à lui deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation faite de la machine. Nous distinguons le rotor bobiné qui supporte un bobinage semblable à celui du stator où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même. La deuxième configuration (Figure 1.2) qui est la plus usité dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil. Les conducteurs des rotors à cage sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor.



**Figure 1.2 :** Photo d'une machine asynchrone avec le stator et le rotor qui la constituent

### 1.5.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone repose entièrement sur les lois de l'induction. La machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant (théorème de *FERRARIS*) dont le secondaire (rotor) est en court-circuit.

Ce fonctionnement est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor a une vitesse différente de  $N_s$  (état d'asynchronisme), l'application de la loi de *FARADAY* à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p}$$

Où :

$f$  : est la fréquence.

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

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

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

## 1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les équations et les modèles mathématiques qui caractérisent les phénomènes électromagnétiques. Dans le chapitre suivant le modèle magnétostatique qui est été déjà présenté dans le paragraphe 1.3.1 sera appliqué sur la machine asynchrone en utilisant la méthode des éléments finis.

# ***Chapitre 2***

*Modèle élément  
finis appliqué à la  
machine  
asynchrone*

## MODELE ELEMENT APPLIQUE A LA MACHINE ASYNCHRONE

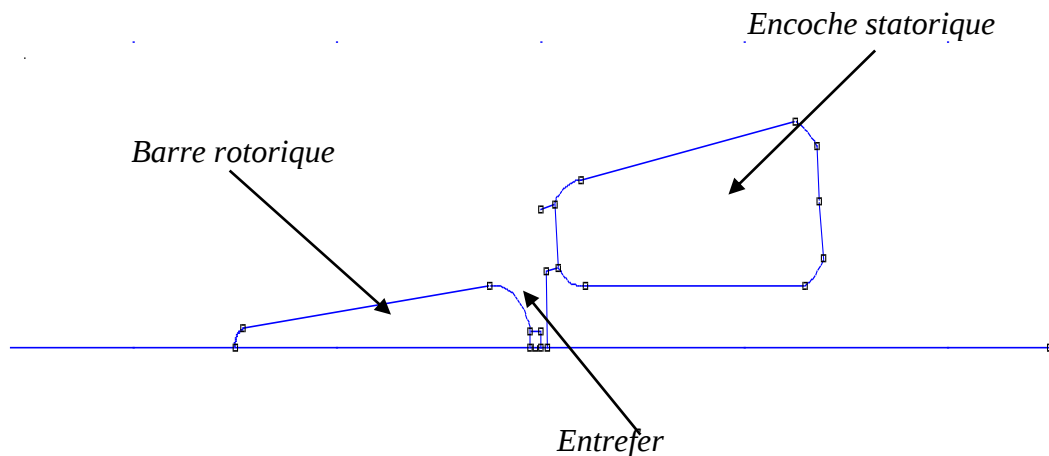
### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier la machine asynchrone avec un modèle qui représente la machine réelle. Dans ce but nous nous orientons vers la modélisation par la méthode de calcul par éléments finis. Cette dernière qui représente une grande fidélité du comportement électromagnétique, ainsi que sa considération de la géométrie de la machine.

Nous nous intéressons à développer cette méthode en utilisant l'outil logiciel FEMME.

### 2.2 Généralités

Une modélisation magnétostatique en deux dimensions (2D) de la machine est suffisante, et permet de réduire sensiblement le temps de calcul. Les dimensions géométriques de la machine étudiée dans ce chapitre sont présentées par la figure 2.1 [Spoorten 07].



**Figure 2.1 :** L'architecture des encoches statorique et rotorique

Les valeurs nominales de la machine étudiée est donnée par le tableau 2.1, alors que les caractéristiques de la géométrie et du bobinage sont données par le tableau 2.2.

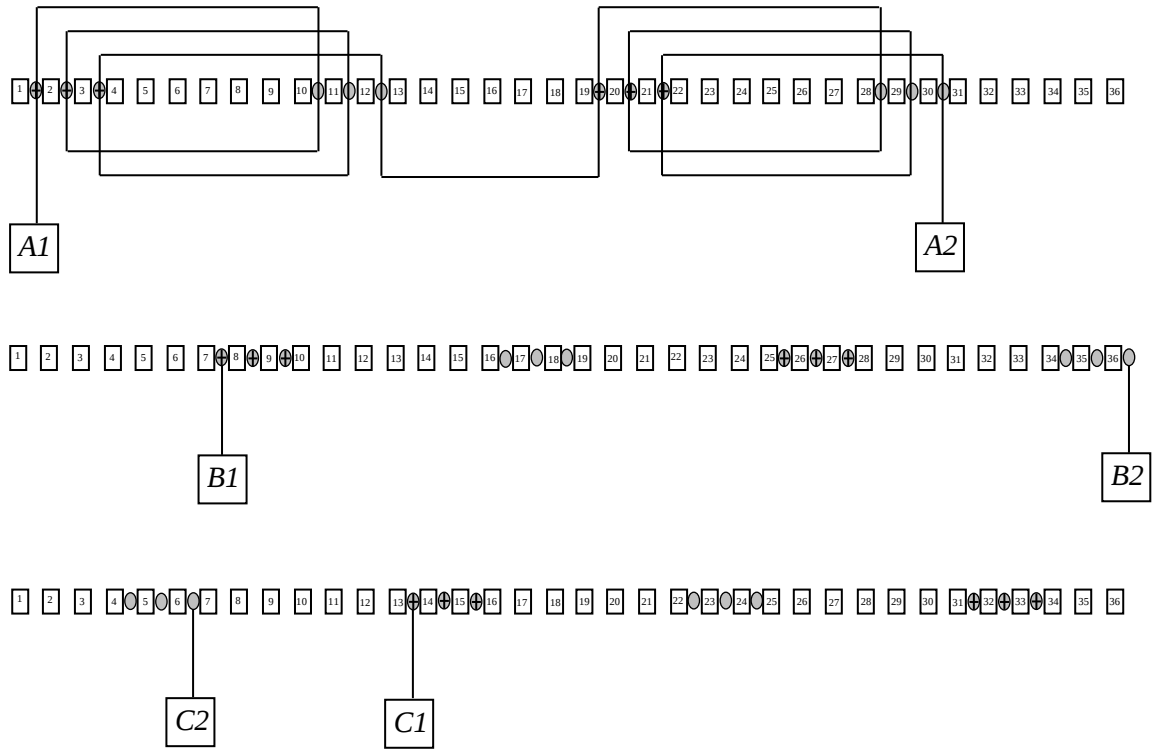
| Valeurs nominales |        |
|-------------------|--------|
| Puissance         | 1.5 kW |
| Tension           | 220 V  |
| Fréquence         | 50 Hz  |

**Tableau 2.1 :** Caractéristiques de la machine (valeurs nominales)

| Géométrie et bobinage                       |                                             |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Générale                                    |                                             |
| Epaisseur d'entrefer                        | $e = 1 \text{ mm}$                          |
| Longueur du paquet de tôles                 | $l = 139.5 \text{ mm}$                      |
| Stator                                      |                                             |
| Nombre d'encoche                            | $N_s = 36$                                  |
| Nombre de spires en série / encoche         | 44                                          |
| Nombre de paires de pôles                   | $p=2$                                       |
| Diamètre de la culasse                      | $D_c = 170 \text{ mm}$                      |
| Diamètre interne                            | $D_s = 117 \text{ mm}$                      |
| Résistivité du matériau (alliage de cuivre) | $\rho_{Cu} = 1.724 \times 10^{-8} \Omega m$ |
| Nombre d'encoches / pole / phase            | 3 encoches                                  |
| Rotor (cage d'écureuil)                     |                                             |
| Nombre d'encoche                            | $N_r = 28 \text{ bars}$                     |
| Résistivité du matériau (aluminium)         | $\rho_{Al} = 2.826 \times 10^{-8} \Omega m$ |
| Diamètre extérieur                          | $D_r = 116.5 \text{ mm}$                    |
| Diamètre de l'arbre                         | $D_{arbre} = 38 \text{ mm}$                 |

**Tableau 2.2 :** Caractéristiques de la machine (géométrie et bobinage)

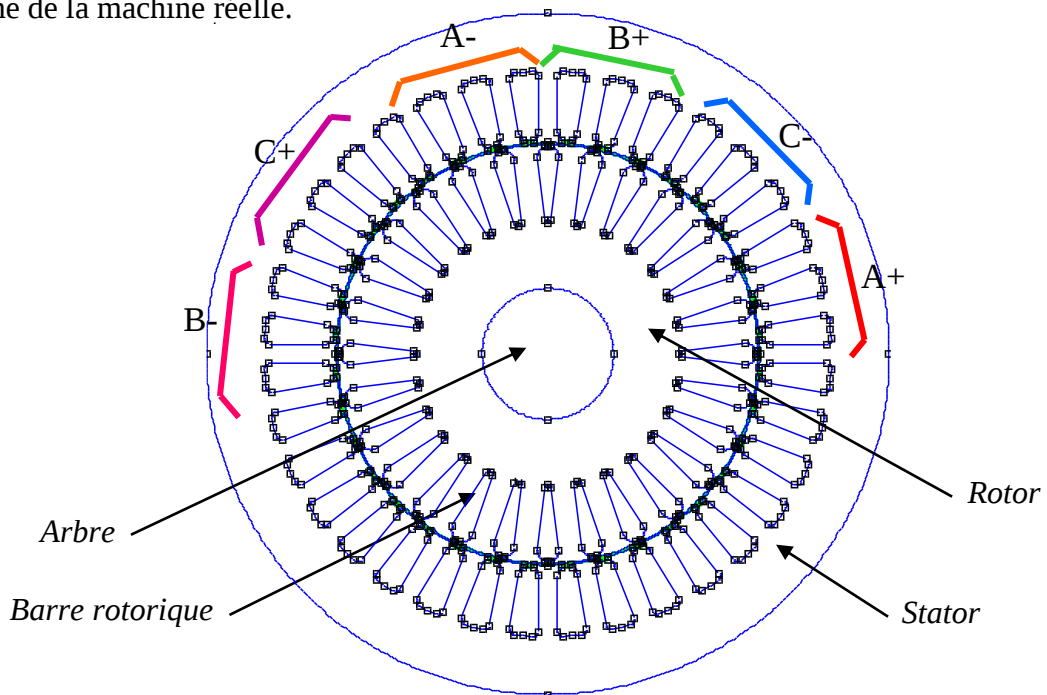
La figure 2.2, illustre la répartition du bobinage dans les encoches statorique, notant qu'on a 3 encoches par pole et par phase.



**Figure 2.2 :** Répartition du bobinage statorique

### 2.3 Définition de la géométrie

La figure 2.3 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone, la géométrie est très proche de la machine réelle.

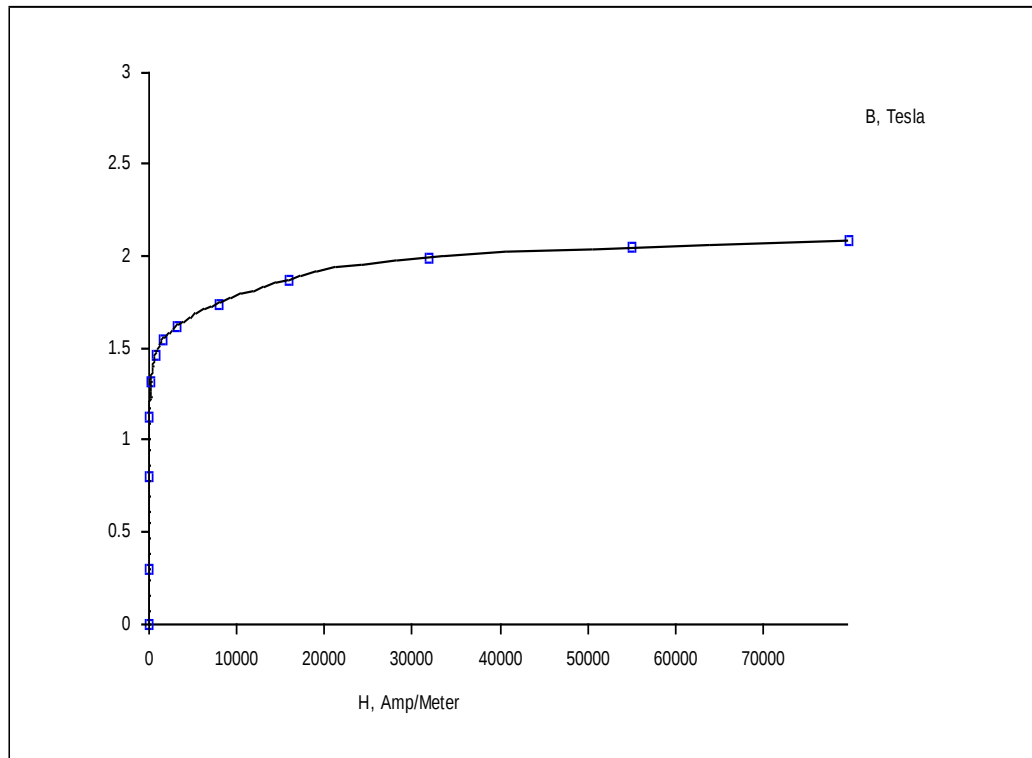


**Figure 2.3 :** Circuit magnétique de la machine asynchrone

## 2.4 Propriétés des matériaux

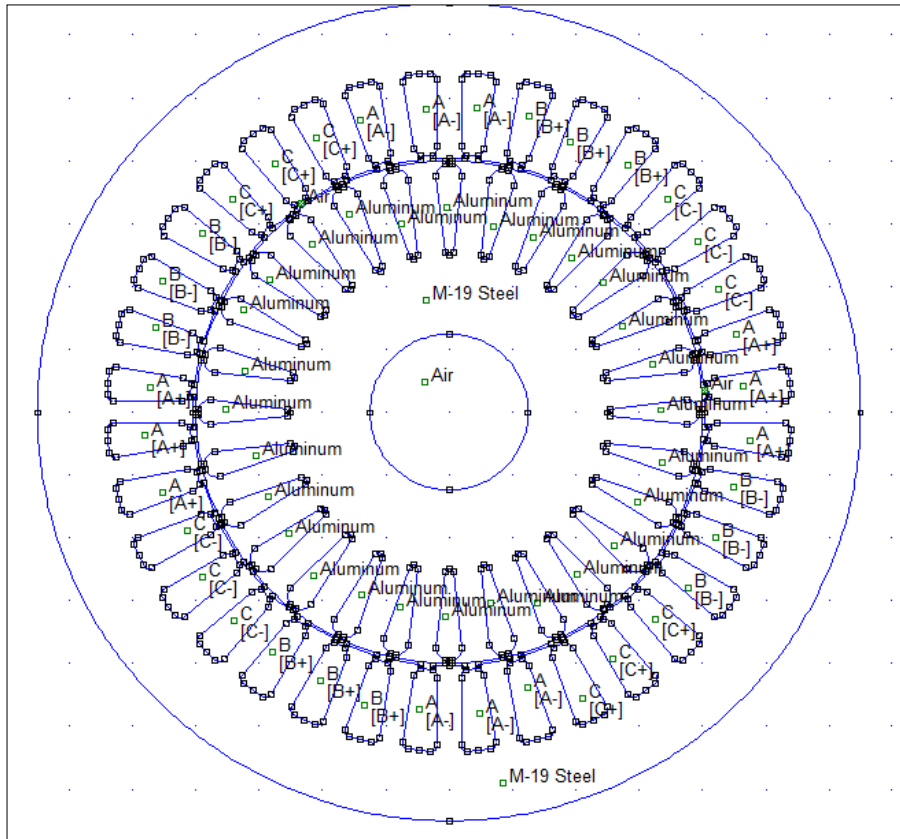
On a quatre régions [Halem 10]:

- *Les encoches statoriques* : sont définies par un matériau qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique  $MUX=1$ .
- *Les régions laminées* : sont définies par un matériau magnétique qui est caractérisé d'une courbe  $B(H)$  présentée dans la figure 2.4.
- *Les bars rotoriques* : sont en aluminium, donc la résistivité de cet dernier sera utilisée.
- *La région d'entrefer* : est définie par un matériau qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique  $MUX=1$ .



**Figure 2.4:** Courbe d'aimantation des régions laminées  $B(H)$  (Msteel-19)

La figure 2.5 présente l'affectation des matériaux et du bobinage sur les régions de la machine.



**Figure 2.5:** L'affectation des matériaux sur les régions de la machine

## 2.5 Maillage

Après la définition de la géométrie complète du stator, ainsi que la géométrie complète du rotor, la région de l'entrefer est automatiquement générée, avec une épaisseur de  $1\text{ mm}$ .

La région d'entrefer est une région très importante dans la machine, alors cette région doit être maillée régulièrement que possible, en respectant le nombre des éléments qui garde la précision, et en même temps, il faut gagner du temps de calcul que possible.

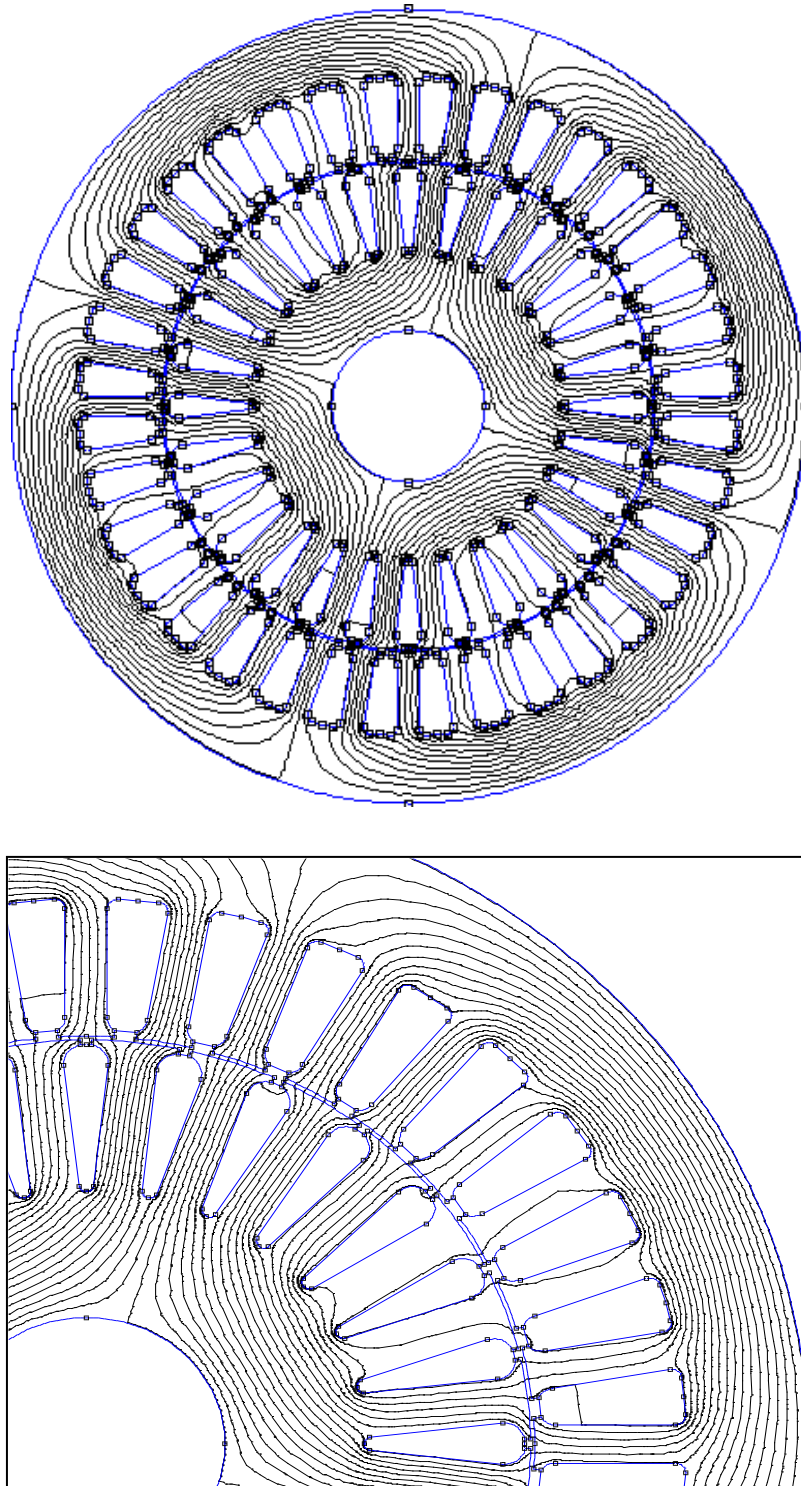
Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information.

Suivant ce qui précède pour le maillage de la partie stator, partie rotor, et spécialement le maillage d'entrefer, nous appliquons un maillage avec des éléments triangulaires (figure 2.6).



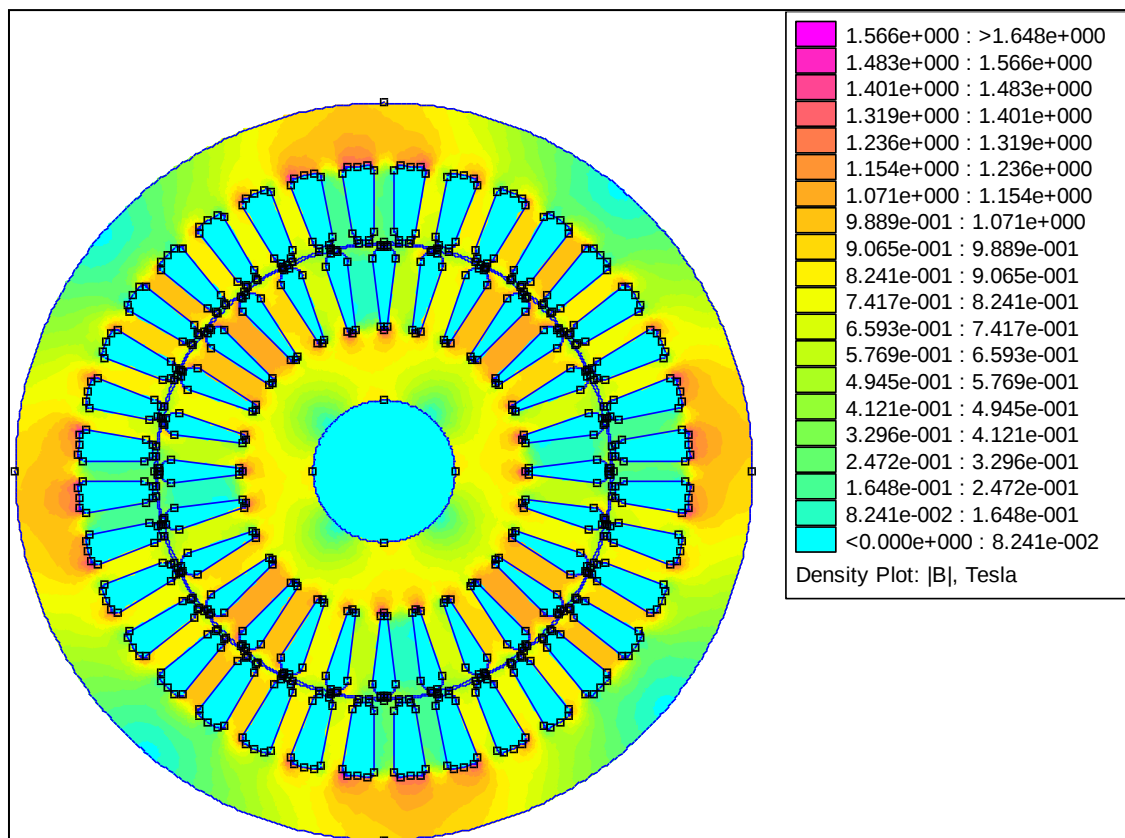
## 2.6 Résultats

La figure 2.7 présente la répartition des lignes d'équiflux pour la solution statique où nous observons les deux paires de pôles de la machine, qui sont symétriques

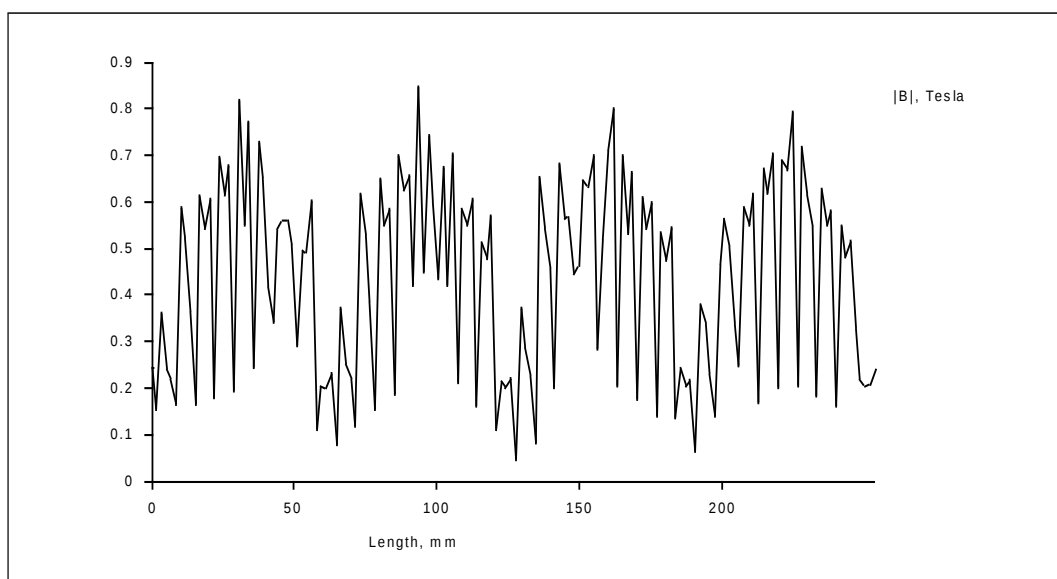


**Figure 2.7 :** Répartition des lignes d'équiflux

La figure 2.8 présente la répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique. Nous remarquons que cette répartition de l'induction est quasi-symétrique avec une valeur maximale de 1.566 Tesla qui s'explique la saturation du circuit magnétique de la machine.



**Figure 2.8 :** Répartition de l'induction magnétique



**Figure 2.9 :** Courbe de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer

La figure 2.9, montre la répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer, pour un contour défini, la répartition de l'induction est symétrique pour les deux paires de pôles

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre un modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone a été développé, Le circuit magnétique étant modélisé. Dans notre modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone, des éléments de forme triangulaire de second ordre sont utilisés pour le maillage du circuit magnétique, pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. Ainsi nous appliquons à ce modèle magnétostatique une alimentation par la densité du courant électrique afin de visualiser les lignes d'équiflux, et calculer l'induction et magnétique.

# ***Introduction générale***

# **CONCLUSION GENERALE**

Les phénomènes électromagnétiques sont modélisés par des équations mathématiques (équations aux dérivées partielles).

Il y a plusieurs méthodes de résolutions de ces équations. La méthode analytique parfois est difficile à cause de la géométrie du dispositif étudié. Donc les méthodes numériques sont les plus efficaces dans ce cas, parmi ces méthodes on trouve la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. Chacune de ces méthodes a des propriétés, donc il y a une méthode convenable pour chaque problème ou chaque domaine d'étude.

La méthode des éléments finis est la plus ancienne de ces méthodes, Dans cette mémoire un modèle éléments fini appliqué à la machine asynchrone a été développé, Le circuit magnétique étant modélisé, une courbe d'aimantation  $BH$  est utilisée pour modéliser le matériau de la partie magnétique de la machine. Dans notre modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone, des éléments de forme triangulaire de second ordre sont utilisés pour le maillage du circuit magnétique. Ainsi nous appliquons à ce modèle magnétostatique une alimentation par la densité du courant afin de visualiser les lignes d'équiflux, et calculer l'induction et magnétique.

La modélisation magnétostatique possède l'avantage de faciliter les calculs grâce à sa simplicité de modélisation ainsi que son temps de calcul qui est très léger. Cette méthode peut suffire pour certains cas spéciaux, mais elle reste limitée, puisque la plus proche méthode de la réalité est de simuler les problèmes avec une source de tension, et on cherche l'évolution du courant ainsi que les autres grandeurs électrique et magnétique à partir des conditions et des données qui sont déjà connus.

## FEMM (Finite Element Method Magnetics)

FEMM (Finite Element Method Magnetics) est une suite de programmes pour résoudre les problèmes magnétostatiques et de faibles fréquences en deux dimensions (2D), planaires et axisymétriques. FEMM est divisé en trois parties:

### 1. Preprocessor (femme.exe)

C'est un programme de CAO pour la définition de géométrie du problème à résoudre, et définissant les conditions aux limites. Les fichiers DXF d'Autocad peuvent être importés pour faciliter des géométries.

### 2. Solver (fkern.exe)

Le solveur prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans domaine de résolution.

### 3. Postprocesseur (femmview.exe)

C'est un programme graphique qui affiche les résultats sous forme de champ, de contour et densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, et d'évaluer plusieurs différentes intégrales et tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur. Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux-ci sont:

1. triangle.exe : Triangle découpe la région avec en grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
2. femmplot.exe : Ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

# Bibliographie

- [Halem 10] N. Halem : Mémoire de Magister 2010 « *Modélisation des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic avec Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Eléments Finis* ». Centre universitaire d'Eloued.
- [Khene 06] M. L. Khene : Mémoire de Magister 2006 « *Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques dans les Structures à Géométries Complexes par Adaptation de la Méthode des Volumes Finis* ». Université de Batna.
- [Bergoug 06 ] N Bergoug : Mémoire de Magister 2006 "Etude de L'influence des Matériaux Ferromagnétiques sur les Performances d'une Machine MHD par la Modélisation Numérique 2D". Université de Batna.
- [Bouharkat 06] M. Bouharkat, "*Etude de l'évolution des courant rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*", Thèse de doctorat, université de Batna. Février 2006.
- [Sabonnadière 1988] J.C Sabonnadière et J.L Coulomb "*calcul des champs électromagnétiques*". Techniques de l'Ingénieur D3020.
- [Spoorten 07] J. Spoorten "*Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines-study of internal effect and fault detection techniques*", Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles (ULB), 2007.

*Belkhiri Yamina : Mémoire de Magister (Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM)). Université de Batna.*



# ***Bibliographie***

- [Bouharkat 06] M. Bouharkat, "*Etude de l'évolution des courant rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*", Thèse de doctorat, université de Batna. Février 2006.
- [Halem 10] N. Halem : Mémoire de Magister 2010 « *Modélisation des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic avec Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Éléments Finis* ». Centre universitaire d'Eloued.
- [Khene 06] M. L. Khene : Mémoire de Magister 2006 « *Modélisation des Phénomènes Électromagnétiques dans les Structures à Géométries Complexes par Adaptation de la Méthode des Volumes Finis* ». Université de Batna.
- [Sabonnadière 1988] J.C Sabonnadière et J.L Coulomb "*calcul des champs électromagnétiques*". Techniques de l'Ingénieur D3020.
- [Spoorten 07] J. Spoorten "*Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines-study of internal effect and fault detection techniques*", Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles (ULB), 2007.

