

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

**Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**HENDEL Amine**

**TAGOUNITS Abdelghani**

**Mémoire dirigé par : Mr.Y BOUTORA**

Thème

# Détermination des caractéristiques d'une machine synchrone à pôles lisses 150VA avec logiciel libre FEMM

*Mémoire soutenu publiquement le 27 septembre 2018 devant le jury composé de :*

**Mr MIOUAT Azzouz**  
UMMTO, Président

**Mr BOUTORA Youcef**  
UMMTO, Encadreur

**Mr KHALDI Rabah**  
UMMTO, Examineur

**Mr KIMOUCHE Abdelghani**  
UMMTO, Examineur

# Remerciements

*La rédaction de cet ouvrage nous a permis de trouver un espace pour exprimer nos remerciements avec infiniment de reconnaissance et de respect envers tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la maîtrise du sujet.*

*Nous tenons à remercier vivement notre promoteur Mr Y.Boutora pour son encadrement et pour sa contribution à travers sa disponibilité, son temps et son expérience.*

*Nous remercions également nos Familles, nos amis (es) qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Généralités sur la machine synchrone à pôles lisses</b> |           |
| <b>I.1.Introduction.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>I.2.Définition.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>I.3.Description de la machine synchrone à pôles lisses.....</b>      | <b>4</b>  |
| <b>I.3.1.Stator (induit).....</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>I.3.2.Rotor (inducteur).....</b>                                     | <b>5</b>  |
| <b>I.4.Champ tournant.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>I.5.Principe de fonctionnement de l’alternateur.....</b>             | <b>6</b>  |
| <b>I.6.Modèle d’étude en régime permanent.....</b>                      | <b>6</b>  |
| <b>I.6.1.Modèle de Behn-Eschenburg.....</b>                             | <b>6</b>  |
| <b>I.6.1.1.Schéma équivalent d’une phase.....</b>                       | <b>7</b>  |
| <b>I.6.1.2.Construction du diagramme de Behn-Eschenburg.....</b>        | <b>7</b>  |
| <b>I.6.2.Modèle de Potier.....</b>                                      | <b>9</b>  |
| <b>I.6.2.1.Diagramme du modèle de Potier.....</b>                       | <b>9</b>  |
| <b>I.6.2.2. Détermination graphique des paramètres de Potier.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>I.7.Avantages et inconvénients.....</b>                              | <b>10</b> |
| <b>I.7.1.Avantages.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>I.7.2.Inconvénients.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>Chapitre II : Méthode des éléments finis</b>                         |           |
| <b>II.1.Introduction.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>II.2.Principe de modélisation des machines électriques.....</b>      | <b>12</b> |
| <b>II.3.Principe de la méthode des éléments finis.....</b>              | <b>13</b> |
| <b>II.3.1.Formulation intégrale.....</b>                                | <b>13</b> |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| II.3.2. | Les Equations de Maxwell.....                         | 13 |
| II.3.3. | Conditions aux limites.....                           | 14 |
| II.3.4. | Discrétisation et approximation.....                  | 16 |
| II.4.   | Présentation du logiciel FEMM.....                    | 17 |
| II.4.1. | Barre de menu principal.....                          | 18 |
| II.4.2. | Dessin de la géométrie de la structure à étudier..... | 18 |
| II.4.3  | Lua Script.....                                       | 18 |

## Chapitre III : Etude des caractéristiques de la machine

|            |  |    |
|------------|--|----|
| III.1.     | Présentation de la machine étudiée.....                    | 21 |
| III.1.1.   | Dimensions géométriques et grandeurs nominales.....        | 22 |
| III.1.2.   | Moteur universel.....                                      | 23 |
| III.2.     | Cartographie du champ magnétique.....                      | 23 |
| III.2.1    | A vide.....  | 23 |
| III.2.2    | En charge.....   | 24 |
| III.3.     | Courbe de l'induction et de potentiel dans l'entrefer..... | 24 |
| III.3.1.   | Cas d'induit seul.....                                     | 24 |
| III.3.1.1  | Composante normale.....                                    | 24 |
| III.3.1.2. | Composante tangentielle.....                               | 25 |
| III.3.1.3. | Potentiel.....   | 25 |
| III.3.2.   | Cas d'inducteur seul.....                                  | 26 |
| III.3.2.1. | Composante normale.....                                    | 26 |
| III.3.2.2. | Composante tangentielle.....                               | 26 |
| III.3.2.3. | Potentiel.....   | 27 |
| III.3.3.   | Cas d'induit et d'inducteur.....                           | 27 |
| III.3.3.1. | Composante normale.....                                    | 27 |
| III.3.3.2. | Composante tangentielle.....                               | 28 |
| III.3.3.3. | Potentiel.....   | 28 |
| III.4.     | Densité des flux magnétiques.....                          | 29 |
| III.5.     | Energie magnétique emmagasinée.....                        | 29 |
| III.6.     | Application du modèle de la machine.....                   | 30 |
| III.6.1.   | Force électromotrice de la machine.....                    | 30 |

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| III.6.2. | Courbe de la fem à vide.....                     | 32       |
| III.6.3. | Taux d'harmoniques.....                          | 33       |
| III.6.4. | Détermination des inductances de la machine..... | 34       |
| III.6.5. | Méthode de l'énergie magnétique emmagasinée..... | 34       |
|          | Conclusion.....                                  | 35       |
|          | Conclusion générale.....                         | 36       |
|          | Bibliographie.....                               | 37       |
|          | Annexe.....                                      | A1---A23 |

# INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques tournantes, qui assurent une conversion d'énergie électromécanique, sont le cœur d'une discipline scientifique appelée jadis « électrotechnique » et, aujourd'hui, « génie électrique » en raison de l'importante évolution technologique engendrée par l'apport de disciplines adjacentes (électronique de puissance, électronique de commande analogique et numérique, automatique, etc.). Cette révolution a entraîné la généralisation de l'actionnement électrique dans tous les domaines industriels mais aussi dans la vie courante ; elle a aussi profondément modifié la manière dont les machines sont mises en œuvre tout en leur permettant également de s'adapter à l'utilisation de nouvelles sources d'énergie. En conséquence, leur enseignement doit en tenir compte [14].

Une machine électrique tournante est un système électromécanique réversible, qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement moteur) et vice versa (fonctionnement générateur). Inventées durant le XIX<sup>ème</sup> siècle, les machines électriques constituent aujourd'hui l'une des principales forces motrices de la civilisation contemporaine. Elles sont quasiment omniprésentes dans les industries : production d'énergie électrique, transport (voitures, trains, avions), robotique, machines-outils, produits électroménagers... etc

Grâce à leurs performances, les machines synchrones ont été adoptées dans plusieurs applications comme moteur ou comme générateur. De ce fait, il est indispensable d'avoir un modèle fiable pour mieux retranscrire leur comportement.

Les diverses complexités rencontrées lors de l'étude des machines électriques rend leur étude difficile et l'utilisation de modèles analytiques insuffisante. Le recours aux méthodes numériques est donc requis. En employant ces méthodes, il est devenu possible d'avoir une description électromagnétique très précise de la machine. Pour cette raison, ces méthodes sont très utiles pendant l'étape de conception. Et pour cela on dispose du logiciel libre FEMM (finite elements magnetics method) afin de calculer avec la méthode des éléments finis des problèmes à deux dimensions [3].

Notre travail consiste à étudier une machine synchrone à pôles lisses 150VA avec un programme LUA sous environnement FEMM, et ceci dans le but de construire un modèle de la machine à partir des dimensions issues d'un travail qui a été déjà fait. Cela permettra d'estimer et de visualiser la forme de la f.e.m, et déterminer les inductances de notre machine.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- ) Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine synchrone.
- ) Le deuxième chapitre est consacré à une présentation de la méthode des éléments finis.
- ) Le troisième chapitre concerne l'étude de la machine sous environnement FEMM.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

**Chapitre I**

**Généralités sur la**

**machine synchrone à**

**pôles lisses**

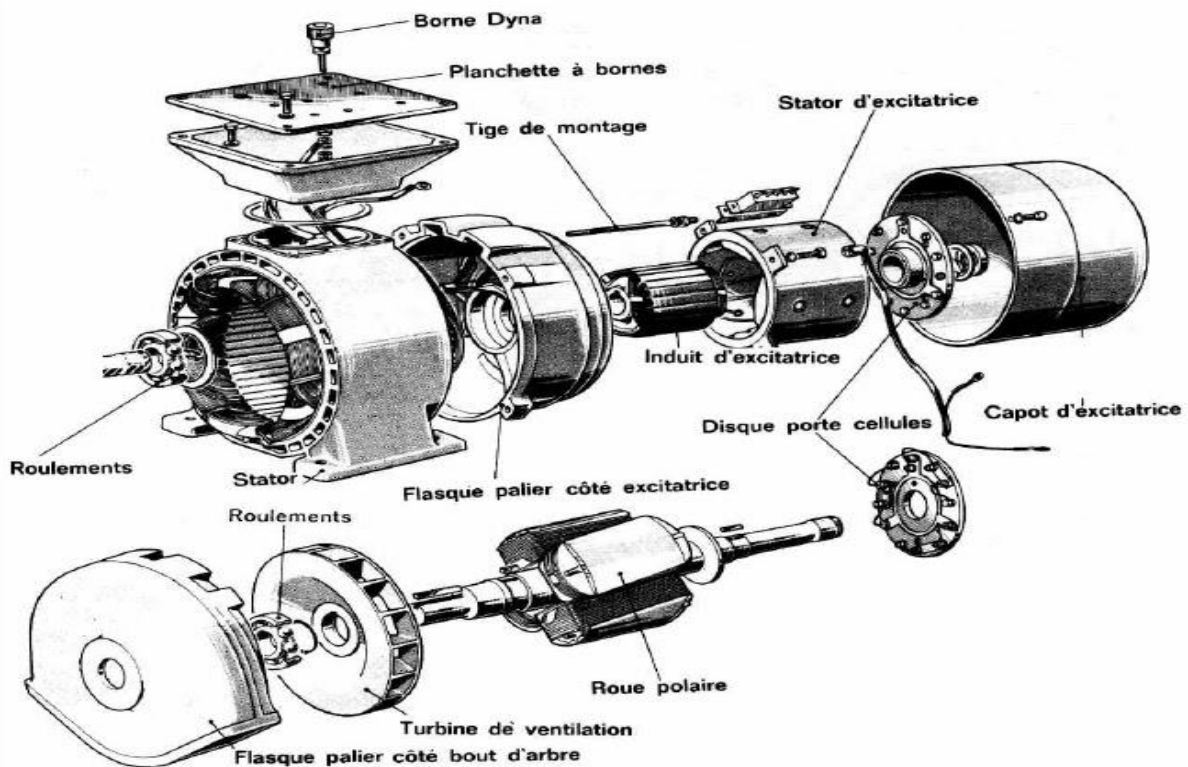
## I.1 Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche.

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants.

Notre étude se bornera ici à considérer l'aspect génératrice, on l'appelle plus particulièrement : alternateur.



**Fig. I.1** Vue éclatée d'un alternateur d'expérimentation (Moteurs Leroy)

## I.2 Définition [1]

Les alternateurs sont des machines tournantes, leur puissance apparente est comprise entre quelque centaines de VA pour les plus petites et plus de 1600 MVA pour les plus grosses unités.

L'alternateur transforme l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne en énergie électrique; il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux.

Les f.e.m sont produites par inducteur c'est-à-dire par déplacement relatif d'un circuit inducteur avec une vitesse de rotation «N» égale la vitesse de rotation du champ tournant où de synchronisme «Ns», d'où le nom de la machine synchrone.

$$N=N_s=60f/p \quad [\text{tr}/\text{min}]$$

Avec  $p$  : Nombre de paires de pôles.

$f$  : Fréquence du réseau [Hz]

## I.3 Description de la machine synchrone à pôles lisses

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de la partie tournante appelée rotor. L'entrefer est l'espace aménagé entre les deux armatures ; il est constant.

### I.3.1 Stator (induit) [2]

Comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitué de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé.

Parcouru par un système de courant équilibré, il produit un champ tournant : le stator est donc identique à celui de la machine asynchrone.

Le stator constitue l'induit de la machine puisqu'il est traversé par le champ inducteur produit par le rotor. Le courant induit peut être fourni (cas générateur) ou absorbé (cas moteur).

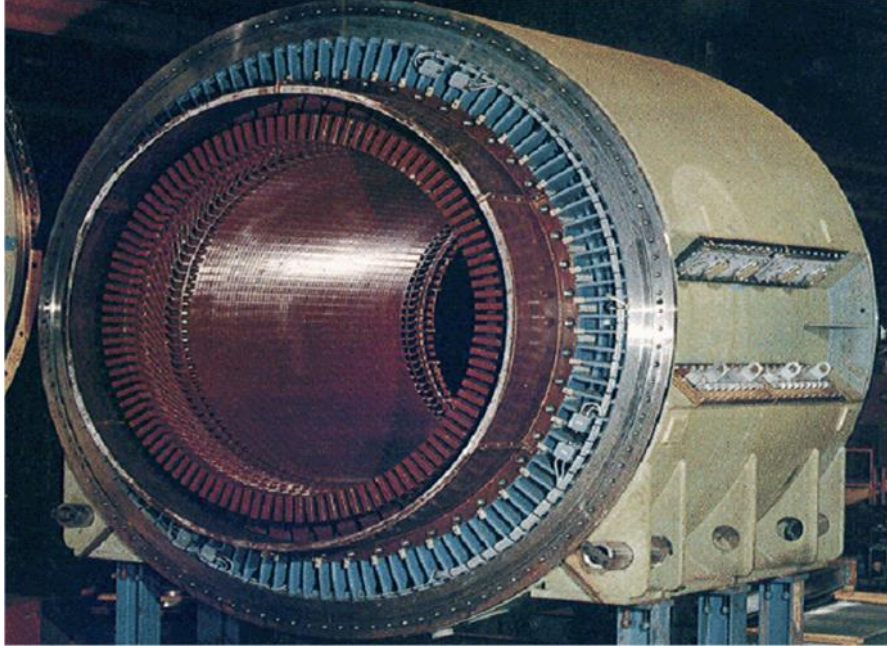


Fig. I.2 Stator

### I.3.2 Rotor (inducteur)

Le rotor dans les machines à pôles lisses est généralement constitué par un cylindre ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Ces machines comportent généralement deux à quatre pôles (turbo-alternateurs).

Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour les machines de fortes puissances destinées à tourner à grandes vitesses.

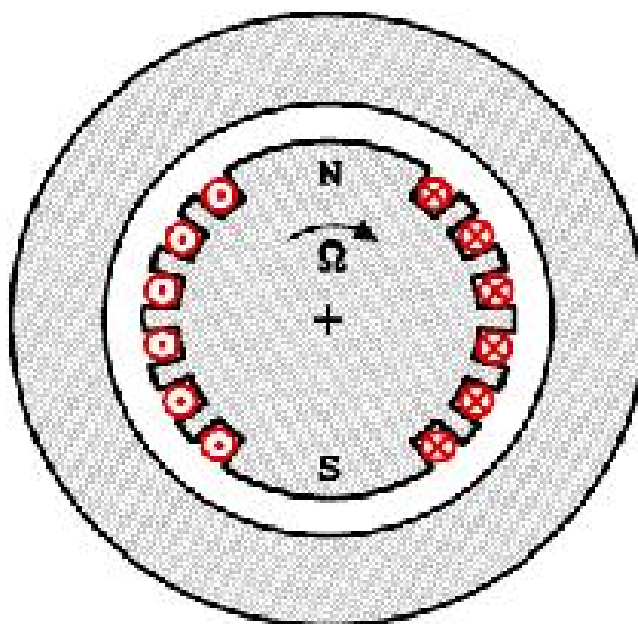


Fig. I.3 Rotor

#### I.4 Champ tournant [10]

On appelle champ tournant, la portion de l'espace où existe un champ magnétique de valeur constante dans la même direction avec une vitesse angulaire constant  $\omega_s$ . Les courants alternatifs dont le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse  $\Omega_s$  définit par :

$$\Omega_s = \omega_s / p$$

$$2\pi N_s = 2\pi f / p$$

Donc  $N_s = 60f / p$  [trs/min]

Avec  $\Omega_s$  : vitesse de rotation du champ tournant [rad/s].

$\omega_s$  : pulsation des courants alternatifs [rad/s].

$N_s$  : vitesse de rotation [trs/min].

$f$  : fréquence des courants alternatifs [Hz].

$p$  : nombre de pair de pôles.

#### I.5 Principe de fonctionnement de l'alternateur [3]

Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation de façon mécanique à la vitesse de synchronisme. Le courant continu circulant dans l'enroulement du rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique dont la composante fondamentale sinusoïdale comporte  $2p$  pôles.

La théorie des champs glissants montre que le bobinage du stator est le siège de forces électromotrices triphasées, dont la composante fondamentale est de pulsation  $\omega_s = p \cdot \omega_r$ . Dans les réseaux électriques, l'ensemble des alternateurs des différentes centrales sont connectées en parallèle sur le même réseau, et produisent des tensions de même fréquence.

#### I.6 Modèle d'étude en régime permanent

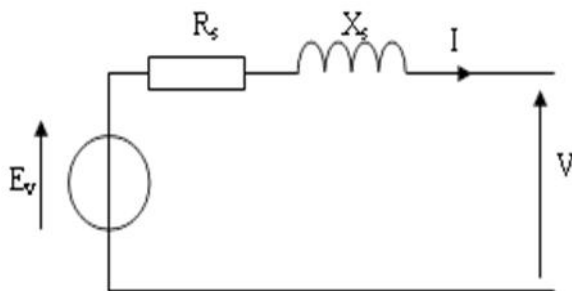
##### I.6.1 Modèle de Behn-Eschenburg [4]

Le modèle de Behn-Eschenburg est très intéressant par sa simplicité. Cependant, il peut conduire à des erreurs importantes et il n'est valable que dans la zone linéaire. Il est utilisé pour la machine à pôles lisses qui a une seule réactance. La machine est supposée non saturée.

L'équation de fonctionnement est alors :

$$\overline{E}_v = \overline{V} + R_s \cdot \overline{I} + jX_s \cdot \overline{I} \quad (I.1)$$

### I.6.1.1 Schéma équivalent d'une phase



$E_v$  : Fem

$V$  : Tension aux bornes d'un enroulement

$R_s$  : Résistance de l'enroulement

$X_s = L_s \cdot \omega$  : Réactance synchrone.

$L_s$  : Inductance synchrone

$\omega$  : Pulsation électrique

### I.6.1.2 Construction du diagramme de BehnEschenburg

Connaissant l'impédance

$$Z = R_s + jL_s \cdot \omega \quad (I.2)$$

Avec:  $R_s$  qui est facilement mesurable (méthode volt-ampermétrique)

$X_s = L_s \cdot \omega$  Réactance constante par hypothèse (machine non saturée). On le détermine à partir de la caractéristique à vide  $E_v(J)$  et en court-circuit  $I_{cc}(J)$ .

$J$  : est connu

$E_v(J)$  : donne  $E_v$

$I_{cc}(J)$  : donne  $I_{cc}$

En court-circuit ( $V=0$ ), avec la même valeur de  $J$  :

$$E_v = Z_s \times I_c \quad (I.3)$$

$$Z_s = \frac{E_v}{I_c} \quad (I.4)$$

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (I.5)$$

$$X_s = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (I.6)$$

On peut déterminer  $Z_s$  à partir de la courbe  $E_v(J)$  et la courbe  $I_{cc}(J)$ .

Pour la même valeur de  $J$  dans la zone linéaire :

$$Z_s = \frac{A}{A}$$

Pour une autre valeur de  $J'$  dans la zone de saturation, on trouve une autre valeur pour  $Z_s$ .

On tient compte alors de la saturation :

$$Z_s = \frac{A'C'}{A'B'}$$

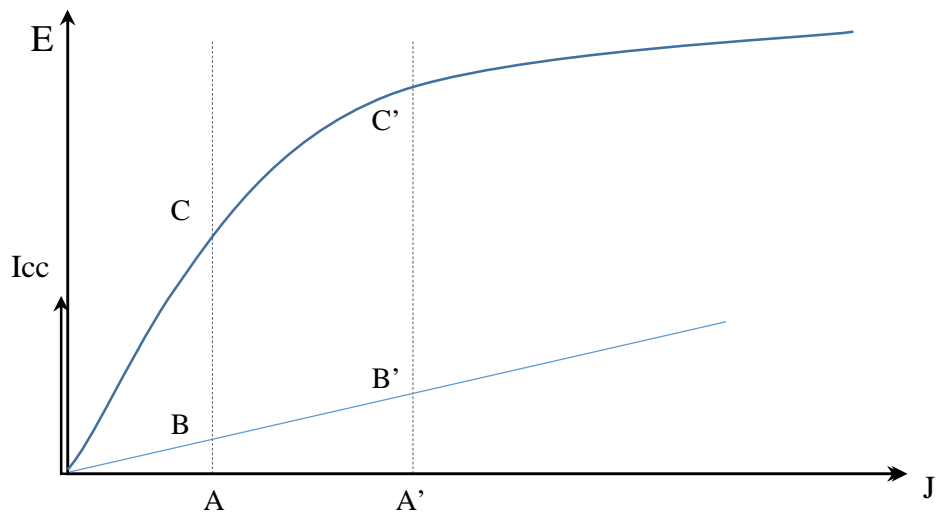


Fig. 1.4 Détermination graphique

Le diagramme se présente comme suit :

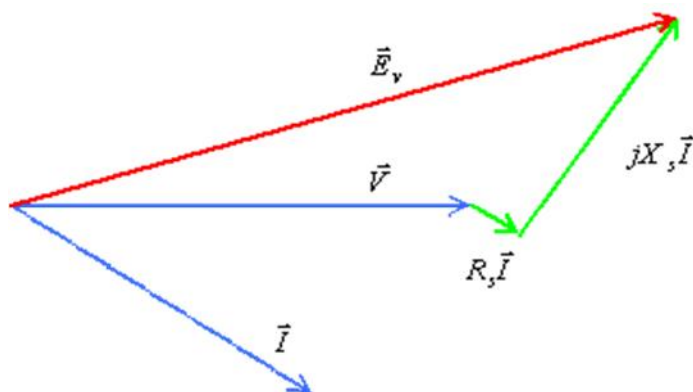


Fig. I.5 Diagramme de Behn Eschenburg

### I.6.2 Modèle de Potier [5]

Le modèle de Potier d'une machine synchrone saturée à pôles lisses, est caractérisé par deux paramètres : le coefficient d'équivalence et la réactance de fuite. De façon classique, ces paramètres se déterminent graphiquement à partir de caractéristiques relevées lors de la réalisation de trois essais sur la machine : un essai à vide, un essai en court-circuit et un essai en déwatté.

Les équations générales du modèle de Potier d'une machine synchrone à pôles lisses pouvant être saturé, sont les suivantes :

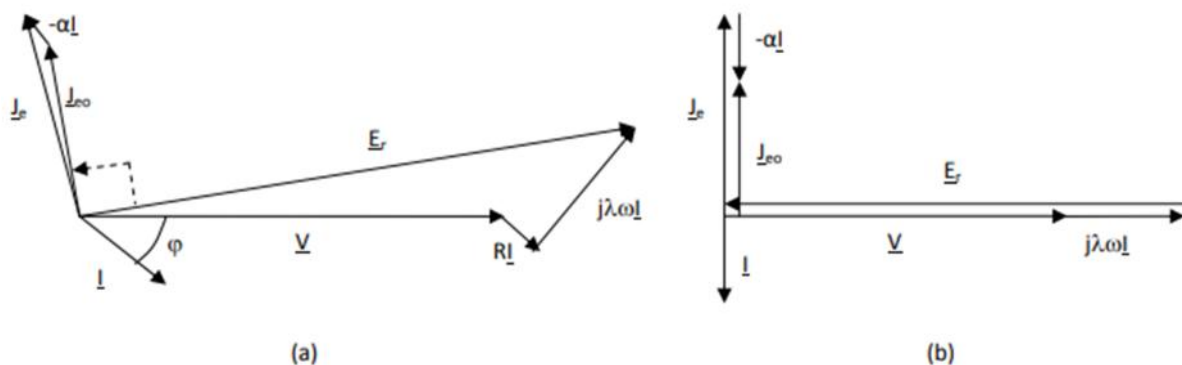
$$\bar{V} = \bar{E}_r - R\bar{I} - j\bar{S}\bar{I} \quad (I.7)$$

$$\bar{J}_e = \bar{J}_{e0} - \alpha\bar{I} \quad (I.8)$$

Dans l'équation aux tensions,  $\bar{V}$  désigne la tension d'une phase de l'alternateur et  $\bar{I}$  le courant d'induit débité.  $\bar{E}_r$  traduit la force électromotrice induite par les variations du flux  $\phi_r$  et  $\lambda\omega\bar{I}$  représente la chute de tension interne due au flux de fuite  $\phi_f$ .  $R$  désigne la résistance d'une phase de l'induit de la machine. [5]

L'équation aux intensités établit une relation entre le terme  $\alpha\bar{I}$ , le courant d'excitation réel  $J_e$  de la roue polaire et le courant d'excitation fictif  $J_{e0}$  introduit par Potier.  $J_{e0}$  est lié à la force électromotrice induite  $E_r$ , par la caractéristique interne de la machine. [5]

#### I.6.2.1 Diagramme du modèle de Potier



**Fig. I.6** Diagrammes vectoriels d'une MS débitant sur (a) charge R-L, (b) charge purement inductive

### I.6.2.2 Détermination graphique des paramètres de Potier

La méthode que Potier a proposé pour déterminer les paramètres  $\alpha$  et  $\lambda\omega$ , est purement graphique. Trois essais à vitesse de rotation constante, sont nécessaires à sa mise en œuvre :

- Un essai à vide qui permet de tracer la caractéristique interne  $E_r = f(J_e0)$ ,
- Un essai en déwatté relevé à courant d'induit  $I_1$  et permettant d'obtenir le point H( $J_e1, V_1$ ),
- Un essai en court-circuit qui permet de placer le point C. Celui-ci est relevé pour un courant d'excitation  $J_{ecc1}$  tel que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  soit égal au courant d'induit  $I_1$  de l'essai en déwatté. [5]

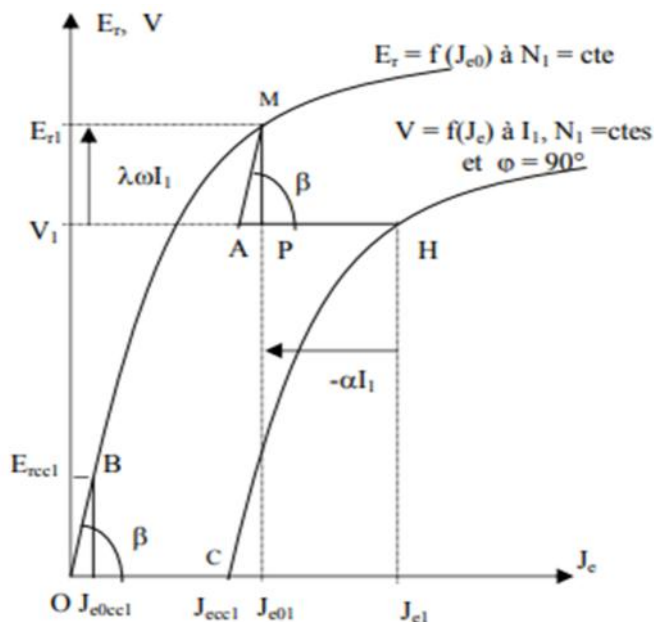


Fig. I.7 Détermination graphique des paramètres

## I.7 Avantages et inconvénients de la machine synchrone [10]

### I.7.1 Avantages

- Sa vitesse est constante quel que soit la charge.
- Elle fonctionne en compensateur synchrone, ce qui la rend capable d'améliorer le facteur de puissance des installations.
- Elle peut supporter des chutes de tension relativement importantes.
- Très bon rendement entre 93% et 97%.
- L'entrefer peut être choisi relativement important.

**I.7.2 Inconvénients**

- Elle présente des difficultés au démarrage.
- Pour le fonctionnement moteur ; s'il vient à décrocher, elle s'arrête et il faut alors reprendre tout le processus de démarrage.
- La présence de l'inducteur à courant continu rend la machine synchrone (moteur) plus coûteuse qu'une machine asynchrone, et nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.
- Utilisation de deux sources de tensions alternatives et continue.

**Chapitre II**

**Méthode des éléments**

**finis**

## II.1 Introduction

La modélisation des phénomènes électromagnétiques est un outil qui permet d'étudier le comportement des machines électriques. Un bon nombre de méthodes numériques a été mis en œuvre pour une modélisation efficace des machines électriques. L'une de ces méthodes est la méthode des éléments finis qui a fait ses preuves comme outil efficace afin de trouver des résultats approchés à l'expérimental ; elle permet aussi de tenir compte des géométries complexes et des non linéarités des systèmes [6].

## II.2 Principe de la modélisation des machines électriques [12]

Les machines électriques tournantes sont des systèmes physiques régis par des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques, acoustiques, etc. Dans le contexte de la commande en couple ou en vitesse de ces machines, seuls les phénomènes électromagnétiques et électromécaniques sont pertinents pour la mise en œuvre d'un modèle simplifié et représentatif.

La modélisation des machines électriques en vue de leur commande exige la prise en compte de certaines hypothèses simplificatrices, et se base sur 3 types d'équations :

- ) Equations magnétiques : il s'agit des équations qui décrivent les flux en fonction des courants qui parcourent les enroulements (théorème d'Ampère).
- ) Equations électriques : la relation entre les tensions et les courants est décrite par la loi d'Ohm généralisée avec la loi de Faraday.
- ) Equations mécaniques : la deuxième loi de Newton décrit la variation de la vitesse de l'arbre de la machine en fonction du couple (résultant de la force de Laplace).

### II.3 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode numérique la plus utilisée pour le calcul du champ électromagnétique est la méthode des éléments finis qui est une méthode très attractive dans la conception et l'analyse des dispositifs électromagnétiques. C'est une méthode très générale pour la résolution des divers problèmes rencontrés en pratique : stationnaires ou non, linéaires ou non, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [7].

L'objectif de cette méthode est de remplacer un modèle décrit dans un espace continu par un modèle discret équivalent en utilisant une approximation simple des variables inconnues sur des domaines, pour transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques dont la résolution fournit une solution approchée du problème [8].

D'une manière générale, la méthode des éléments finis peut être définie comme une technique numérique d'approximation des solutions des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

#### II.3.1 Formulation intégrale [11]

La méthode des éléments finis est basée sur la substitution à la forme différentielle que représentent les équations aux dérivées partielles et les conditions aux limites par une formulation intégrale du phénomène à étudier. La formulation intégrale est de type projectif en une association avec une base de données de fonction.

#### II.3.2 Les Equations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électromagnétiques sont régis par les quatre équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu.

) Equation de Maxwell-Faraday

$$\text{rot}\vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

) Equation de Maxwell-Ampère

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

) Equation de conservation de flux magnétique

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

) Equation de Maxwell-Gauss

$$\operatorname{div} \vec{D} = \dots \quad (\text{II.4})$$

) Les relations du milieu

$$\vec{B} = \sim(H) \vec{H} \quad \text{ou} \quad \vec{H} = \nu(B) \vec{B} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \nu \cdot \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

) La loi d'ohm

$$\vec{J} = \dagger \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| $\vec{B}(T)$                        | Induction magnétique    |
| $\vec{D}(C.m^{-2})$                 | Induction électrique    |
| $\vec{E}(V.m^{-1})$                 | Champ électrique        |
| $\vec{H}(A.m^{-1})$                 | champ magnétique        |
| $\vec{J}(A.m^{-2})$                 | densité de courant      |
| $t(s)$                              | Temps                   |
| $\nu(F.m^{-1})$                     | Permittivité            |
| $\sim(H.m^{-1})$                    | Perméabilité magnétique |
| $\dots(C.m^{-3})$                   | Charge volumique        |
| $\dagger(S.m^{-1})$                 | conductivité électrique |
| $\nu = \left(\frac{1}{\sim}\right)$ | réductivité magnétique  |

### II.3.3 Conditions aux limites [9]

Les conditions aux limites décrivent les interactions entre le système à étudier et l'extérieur. Elles peuvent être du type imposées (condition de Dirichlet), dérivées imposées (condition de Neumann), ou une combinaison des deux (mixte).

- ) **Condition de Dirichlet** : cette condition impose la valeur exacte de l'inconnue sur une ou plusieurs frontières extérieures du domaine de résolution.

$$A = g_0 \quad (\text{II.8})$$

Avec :  $A$  : fonction inconnue du problème

$g_0$  : Constante

- ) **Condition de Neumann** : c'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié.

$$\frac{\partial}{\partial n} = g_0 \quad (\text{II.9})$$

Habituellement, on parle de Neumann homogène sur les plans de symétrie, quand  $\frac{\partial}{\partial n} = 0$ , défini le long de la frontière du domaine.

- ) **Condition mixte dite de Robin** : c'est la combinaison de deux types de conditions aux limites ; elle s'exprime par :

$$aA + b\frac{\partial}{\partial n} = g \quad (\text{II.10})$$

Avec :  $a$  et  $b$  : constantes définies sur le domaine d'étude.

$g$  : la valeur de l'inconnue sur la frontière.

En plus des conditions précédentes, il peut exister des conditions cycliques ou anticycliques (périodicité ou anti-périodicité) :

$$A|_F = K \cdot A|_{F+d} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$d$  : période spatiale (suivant le contour )

$K=1$  : cyclique

$K=-1$  : anticyclique

Ces deux conditions sont utilisées pour exploiter la symétrie inhérente dans certains problèmes afin de réduire les dimensions du domaine d'étude, ainsi que dans ceux à frontières ouvertes.

### II.3.4 Discrétisation et approximation [9]

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées éléments finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul.

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision et les résultats escomptés dépendent de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en domaine.

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

L'inconnue  $A$  est décrite dans chaque élément  $e$  par une combinaison linéaire des valeurs  $A_i^e$  aux nœuds.

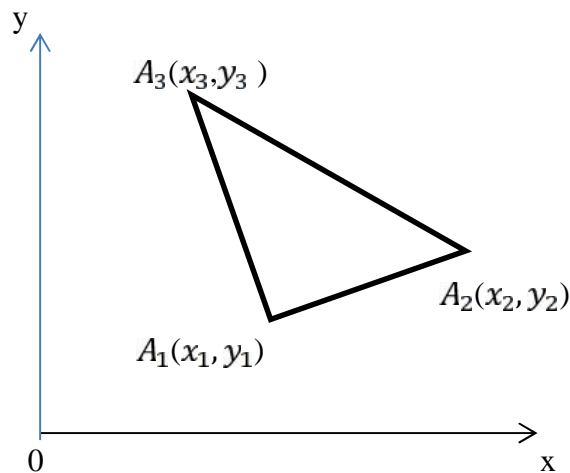
$$A^e = \sum_{i=1}^3 r_i^e A_i^e \quad (\text{II.12})$$

Les  $\mathfrak{S}_i$  sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$r_i^e(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés.

Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions :



**Fig. II.1** Élément triangulaire

$$\begin{cases} \alpha_1 = (1/2 \cdot U)[(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ \alpha_2 = (1/2 \cdot U)[(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\ \alpha_3 = (1/2 \cdot U)[(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Où :  $\zeta$  est l'aire de l'élément.

$$2\zeta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) \quad (\text{II.15})$$

D'où :

$$\begin{aligned} \zeta &= [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)]/2 \\ &= 1/2 [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

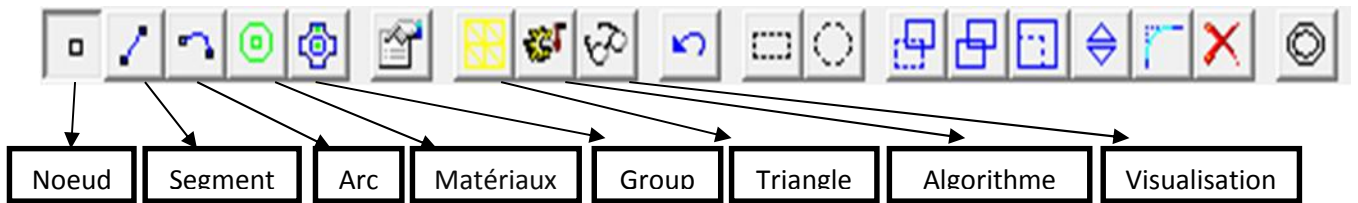
#### II.4 Présentation du logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (FiniteElementMethodMagnetics) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence dans des domaines 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par David Meeker, est disponible gratuitement sur internet.

Le logiciel FEMM se compose de trois programmes :

- ) *Femm.exe* : est un post et préprocesseur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie du problème, les propriétés matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse, la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux...le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours définis par l'utilisateur.
- ) *Triangle.exe* : découpe les régions du problème en éléments triangles, ce qui constitue une étape importante de l'analyse par éléments finis.
- ) *Fkern.exe* : est un solveur qui résout les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié.

### II.4.1 Barre de menu principal



### II.4.2 Dessin de la géométrie de la structure à étudier

Afin de placer un nœud aux coordonnées X et Y, on sélectionne l'icône **Nœud**, on peut utiliser le clic **gauche** de la souris, ou bien en utilisant la touche **Tab**. Pour supprimer un nœud ou sélectionné celui-ci avec le clic droit de la souris, puis on actionne la touche **Supp** ou **Del**.

Pour tracer des segments de droite reliant les différents nœuds, on sélectionne l'icône **Segment** puis avec la souris activez le nœud de départ et celui d'arrivée, un segment apparaît. On fait de même pour les arcs de cercle, en sélectionnant l'angle d'ouverture.

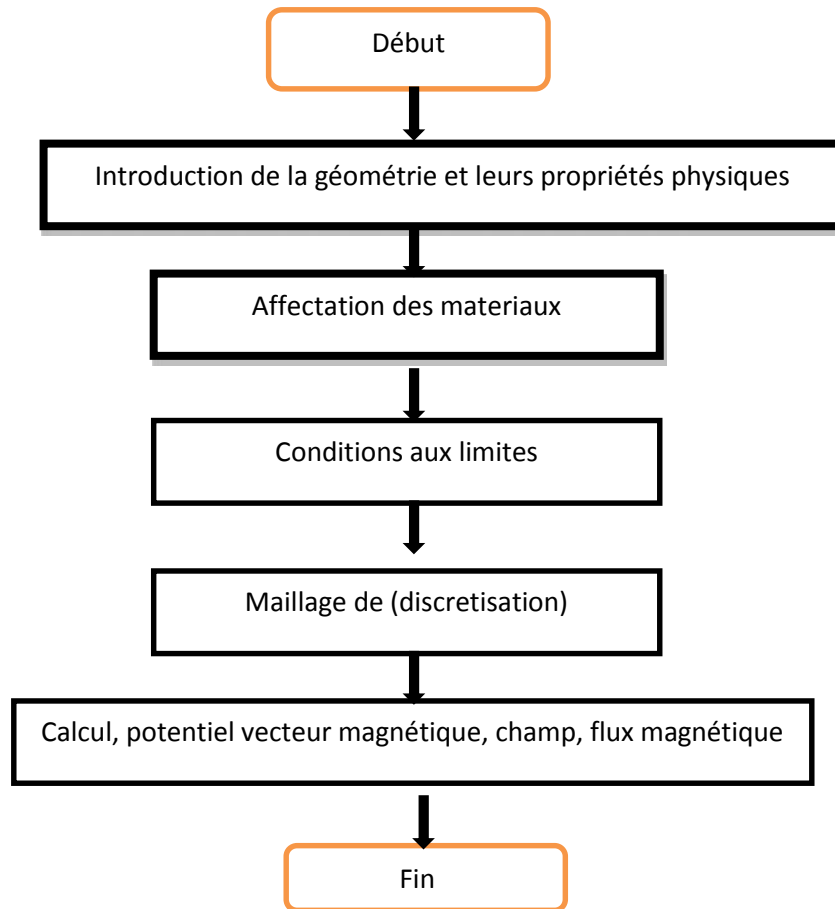
Après avoir saisi le schéma de simulation, on définit les différents matériaux à utiliser, sélectionner le menu **Propriétés** puis **materiallibrary** et sélectionner le matériau à utiliser **addselectedmateriallibrary**.

La condition aux limites est une étape importante pour le calcul ; elle consiste à définir pour le contour, une condition aux limites, par exemple, un potentiel nul.

Sélectionner le menu **Propriétés** puis **Boundary** et **AddProperty**.

### II.4.3 Lua Script

Lua script est langage de programmation étendu, conçu pour des procédures générales de programmation avec des facilités de description des données. Lua script a une partie de programme directement interprété par FEMM. Voir l'organigramme suivant (page 19).



**Fig.II.2** Organigramme

Après avoir suivis toutes ces étapes, on obtient la géométrie avec ces caractéristiques suivant a la page 20.



# **Chapitre III**

## **Etude des caractéristiques de la machine**

### III.1 Présentation de la machine étudiée

La machine qui nous a été proposée est une génératrice synchrone de type D65 Wittenbach. Cette machine existe dans le laboratoire de « constructions machine » de l'UMMTO dont la plaque signalétique est la suivante :

) **Plaque signalétique de la machine synchrone à pôles lisses**

**Type :**  $A \quad 71 - 4$

**Puissance apparente :**  $150 \text{ V}$

**Vitesse de rotation :**  $\vartheta_r = 1500 \text{ tr/min}$

**Fréquence :**  $f = 50 \text{ Hz}$

**Courant nominal :**  $I_n = 0.23 \text{ A} : Y$

**Courant d'excitation :**  $I_e = 1.6 \text{ A}$

**Tension nominale :**  $U_n = 380 \text{ V}$

**Tension d'excitation :**  $U_e = 40 \text{ V}$

## III.1.1 Dimensions géométriques et grandeurs nominales

| Intitulé                              | Notation       | Valeur (mm)           |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Largeur max de l'encoche statorique   | Benc1          | 4.71                  |
| Largeur min de l'encoche statorique   | Benc2          | 3.5                   |
| Hauteur de la dent statorique         | Hz1            | 13                    |
| Ouverture de l'encoche statorique     | Bfs            | 2                     |
| Hauteur de la clavette statorique     | Hks            | 1                     |
| Hauteur de la fente statorique        | Hfs            | 1                     |
| Ouverture de l'encoche rotorique      | Bfr            | 2.5                   |
| Hauteur de la clavette rotorique      | Hkr            | 2                     |
| Hauteur de la dent rotorique          | Hz2            | 13.5                  |
| Diamètre extérieure du stator         | Dext1          | 107                   |
| Section totale de l'encoche rotorique | Senc2          | 31.27 mm <sup>2</sup> |
| Epaisseur de l'entrefer               | E              | 0.52                  |
| Diametre extérieur du rotor           | Dext2          | 61.56                 |
| Diamètreintérieur du rotor            | Dint2          | 16                    |
| Longueur de la machine                | Lu             | 80                    |
| Largeur max de l'encoche rotorique    | Benc1          | 4.5                   |
| Largeur min de l'encoche rotorique    | Benc2          | 0.7                   |
| Angle entre 2 encoches rotorique      | $\forall_{gr}$ | 20°                   |
| Angle entre 2 encoches statorique     | $\forall_{gs}$ | 30°                   |
| Puissance apparente                   | Sn             | 150VA                 |
| Courant nominal                       | In             | 0.23A                 |
| Tension nominal                       | Un             | 380V                  |
| Courant d'excitation                  | Ie             | 1.6A                  |
| Tension d'excitation                  | Ue             | 40V                   |
| Vitesse nominale                      | Nn             | 1500tr/min            |

### III.1.2 Moteur universel : (machine d'entraînement)

La machine d'entraînement est un moteur universel qui épouse la structure d'un moteur à courant continu à excitation série qui peut être alimenté en continu et en alternatif.

#### ) Plaque signalétique de la machine d'entraînement

|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| Type :                | KGR 56-2                  |
| Tension nominale :    | $U_n = 220 \text{ V}$     |
| Courant nominale :    | $I_n = 1.4 \text{ A}$     |
| Fréquence :           | $f = 50 \text{ Hz}$       |
| Vitesse de rotation : | $N = 1500 \text{ tr/min}$ |

## III.2 Cartographie du champ magnétique

### III.2.2. A vide $I_a=I_b=I_c=0 \text{ A}$

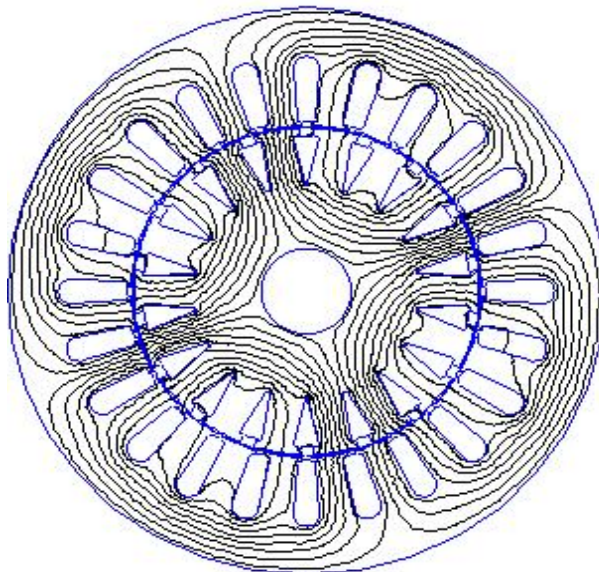


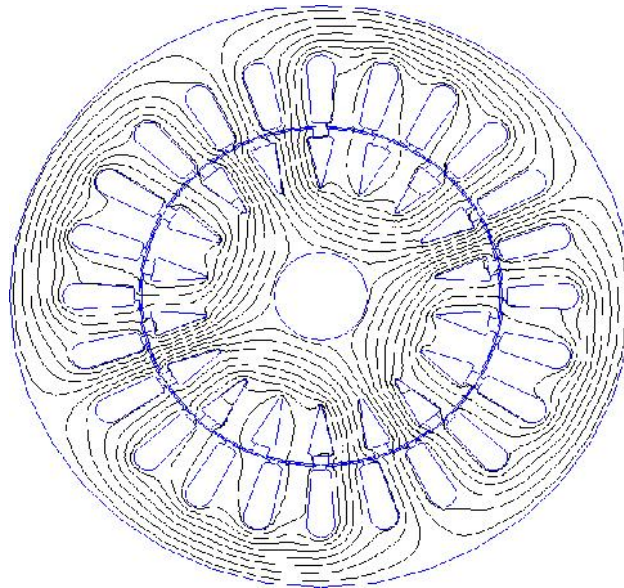
Fig. III.1 Répartition des lignes du champ à vide

### III.2.2. En charge

$$I_b = -I$$

$$I_a = I_c = I/2$$

$$\text{Avec } I = 0.23 \cdot \sqrt{2} \cdot 146$$

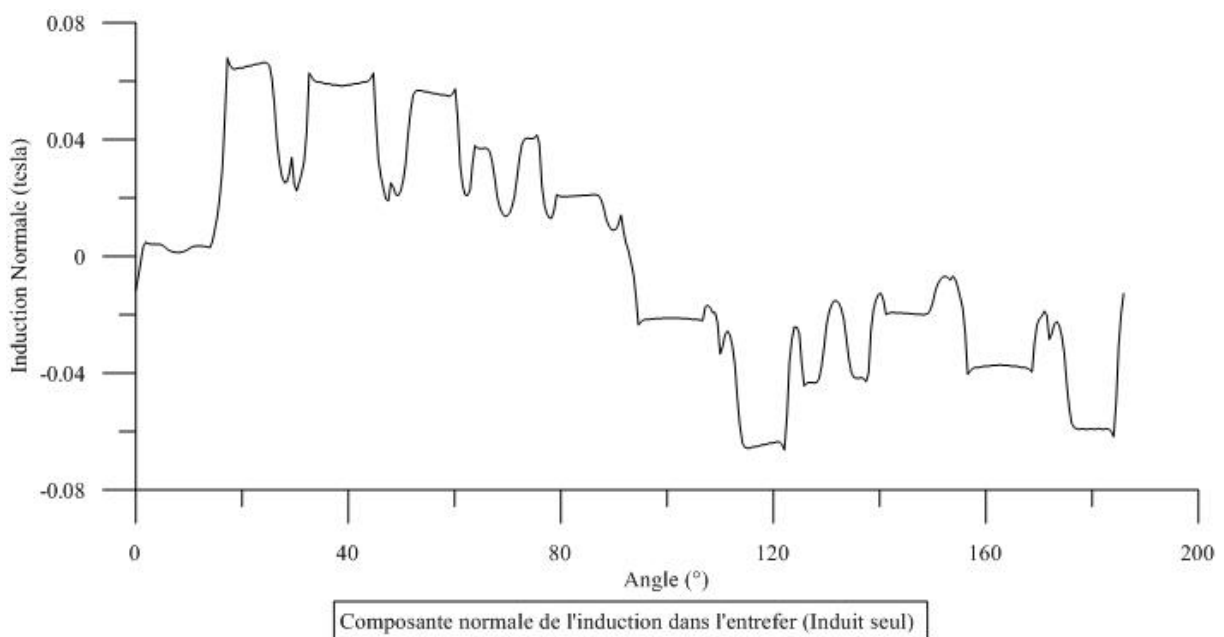


**Fig. III.2** Répartition des lignes du champ en charge

### III.3. Courbe de l'induction et de potentiel dans l'entrefer

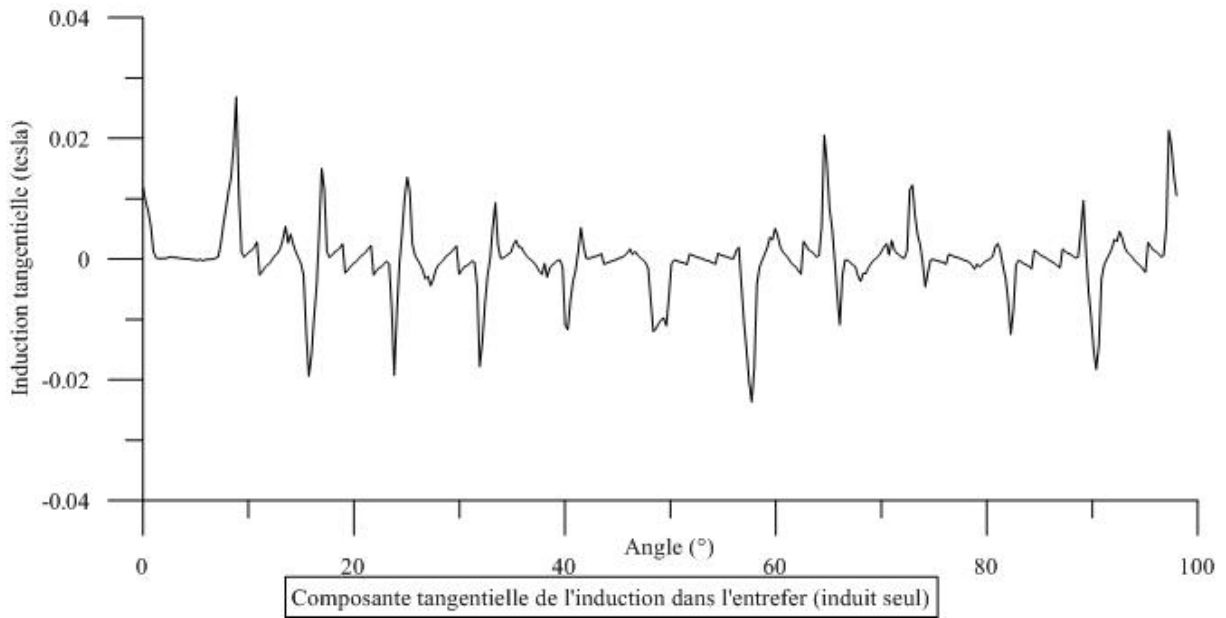
#### III.3.1. Cas d'induit seul

##### III.3.1.1. Composante normale



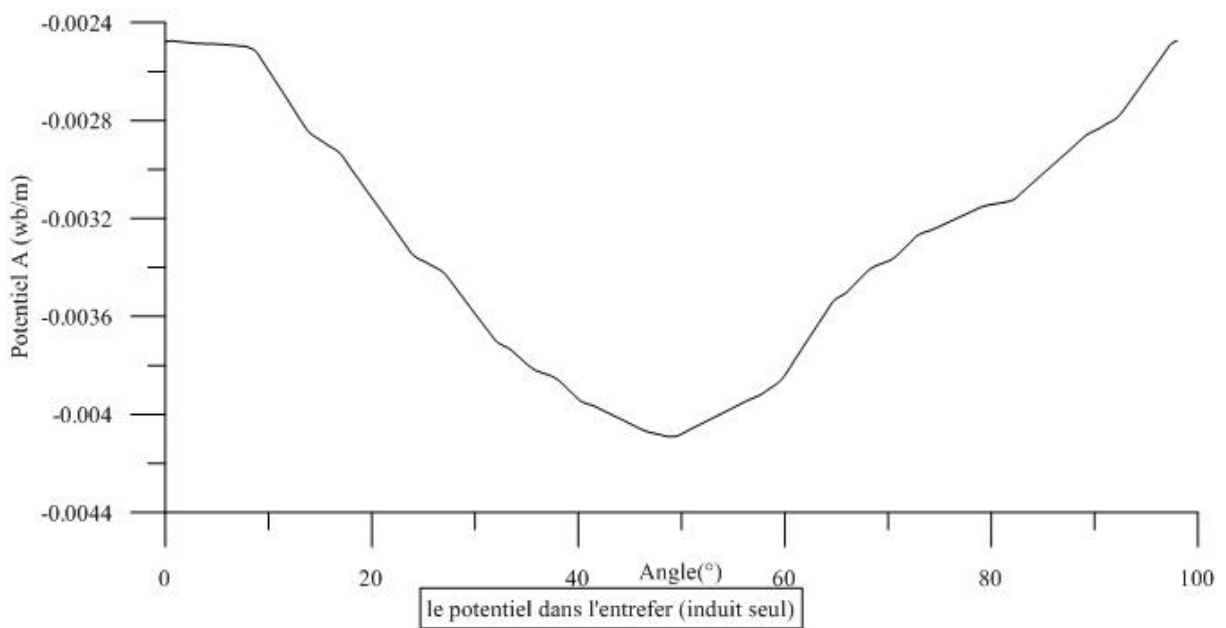
**Fig. III.3** La composante normale de l'induction dans l'entrefer

**III.3.1.2. Composante tangentielle**



**Fig. III.4** La composante tangentielle de l'induction dans l'entrefer

**III.3.1.3. Le potentiel**



**Fig. III.5** Le potentiel A dans l'entrefer

### III.3.2. d'inducteur seul

#### III.3.2.1. Composante normale

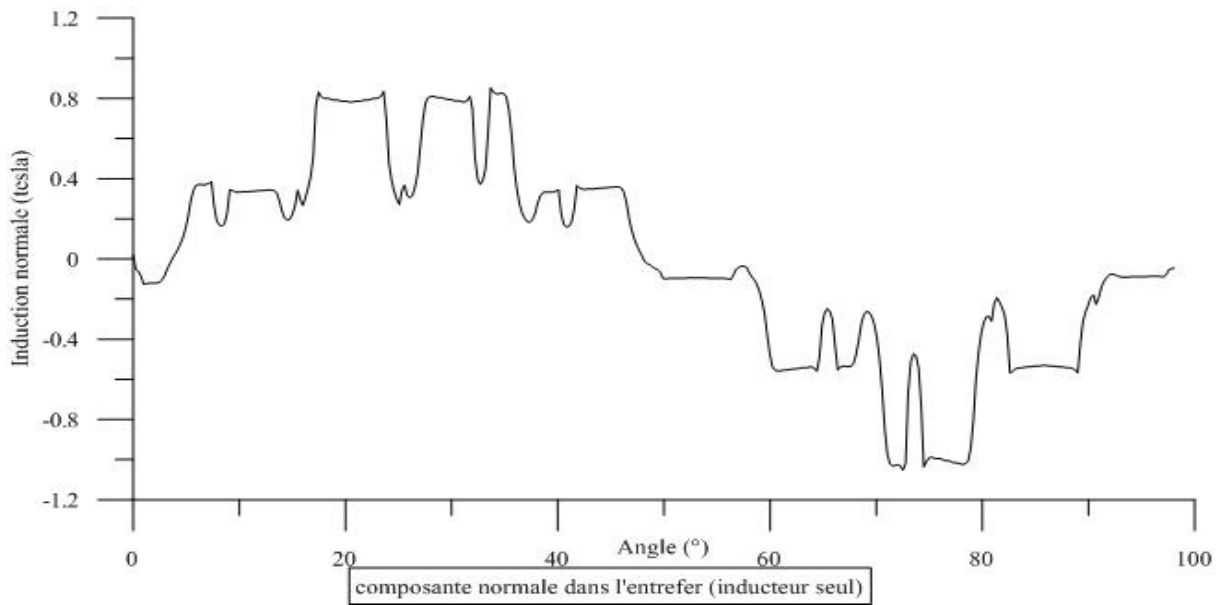


Fig. III.6 La composante normale de l'induction dans l'entrefer

#### III.3.2.2. Composante tangentielle

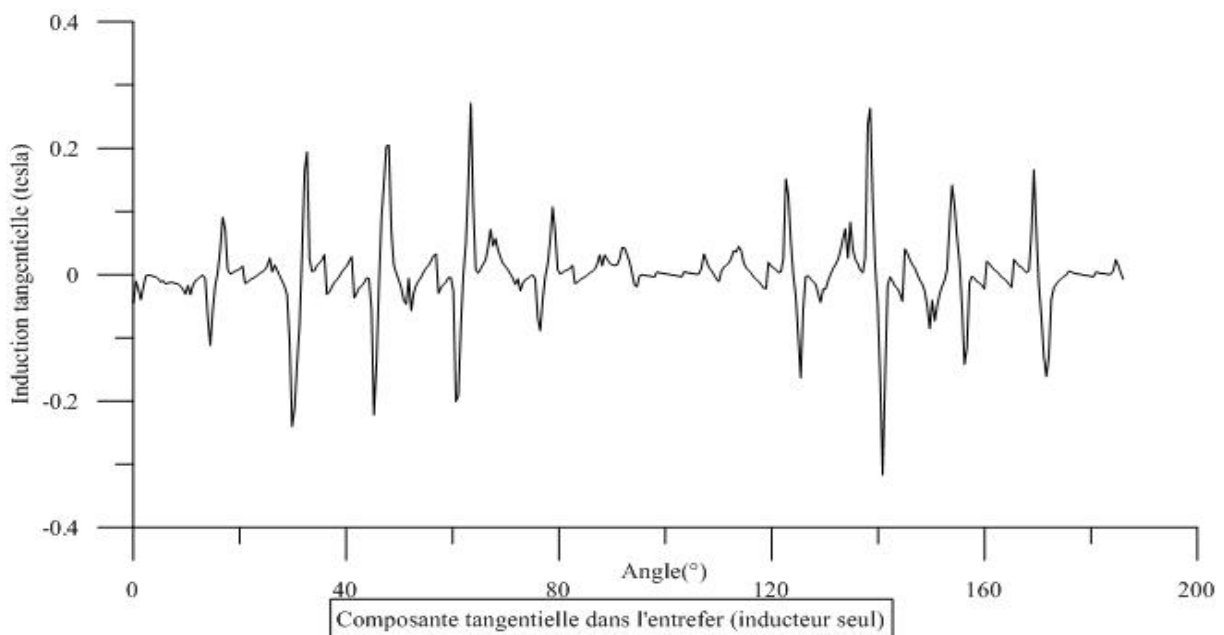


Fig. III.7 La composante tangentielle de l'induction dans l'entrefer

### III.3.3.3. Le potentiel

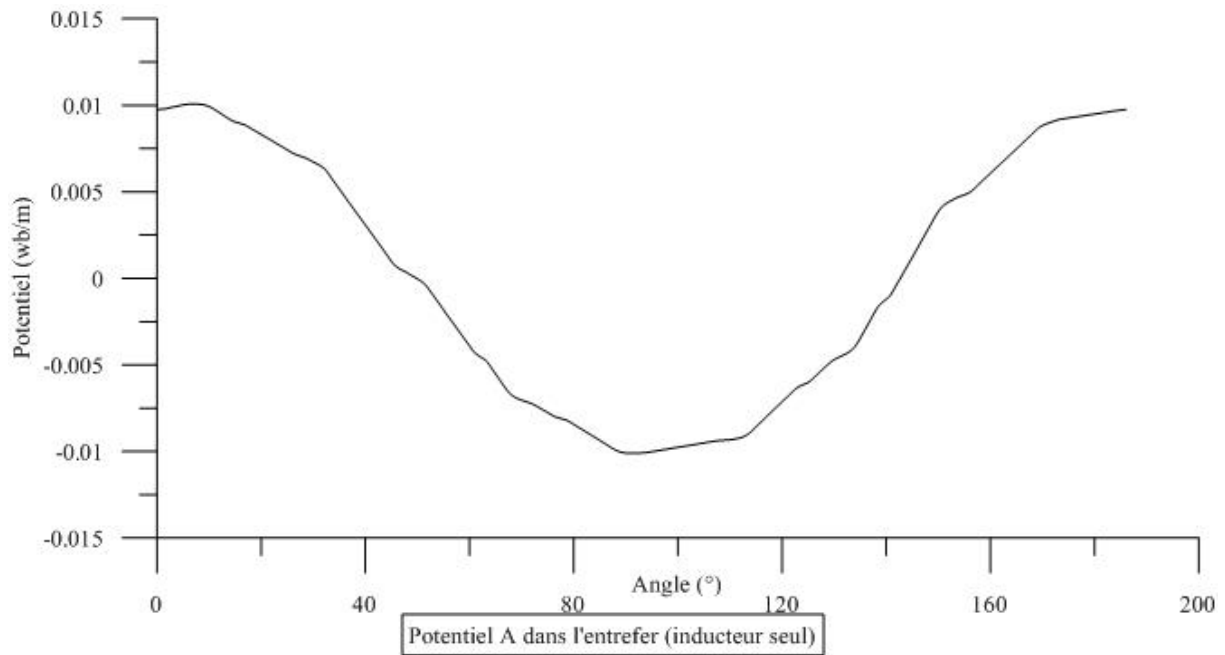


Fig. III.8 Le potentiel A dans l'entrefer

### III.3.3. Cas d'induit et d'inducteur

#### III.3.3.1. Composante normale

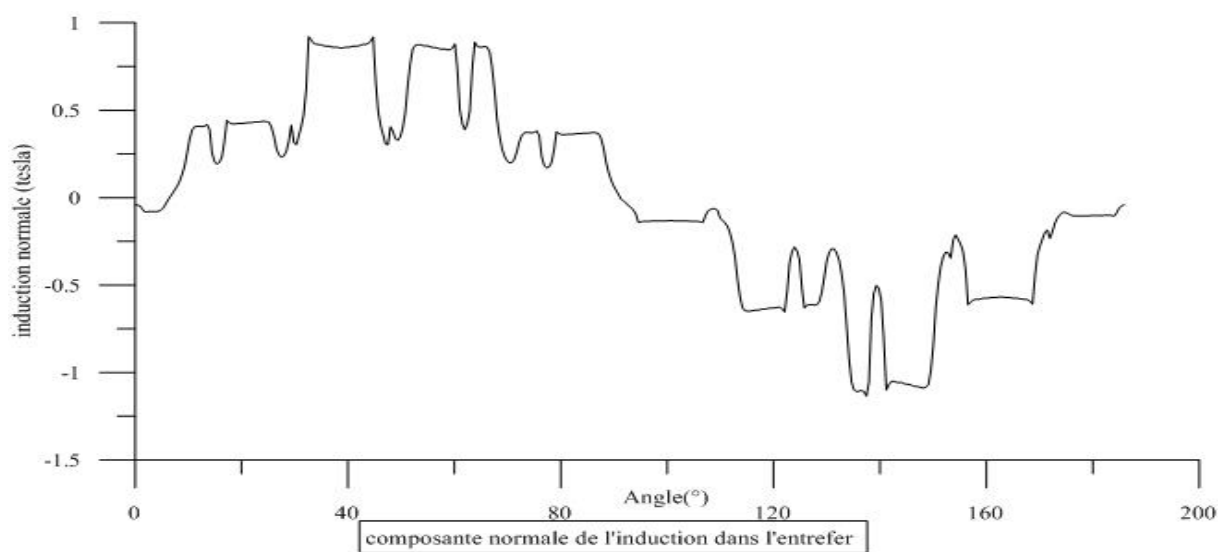


Fig. III.9 La composante normale de l'induction dans l'entrefer en charge

### III.3.3.2. Composante tangentielle

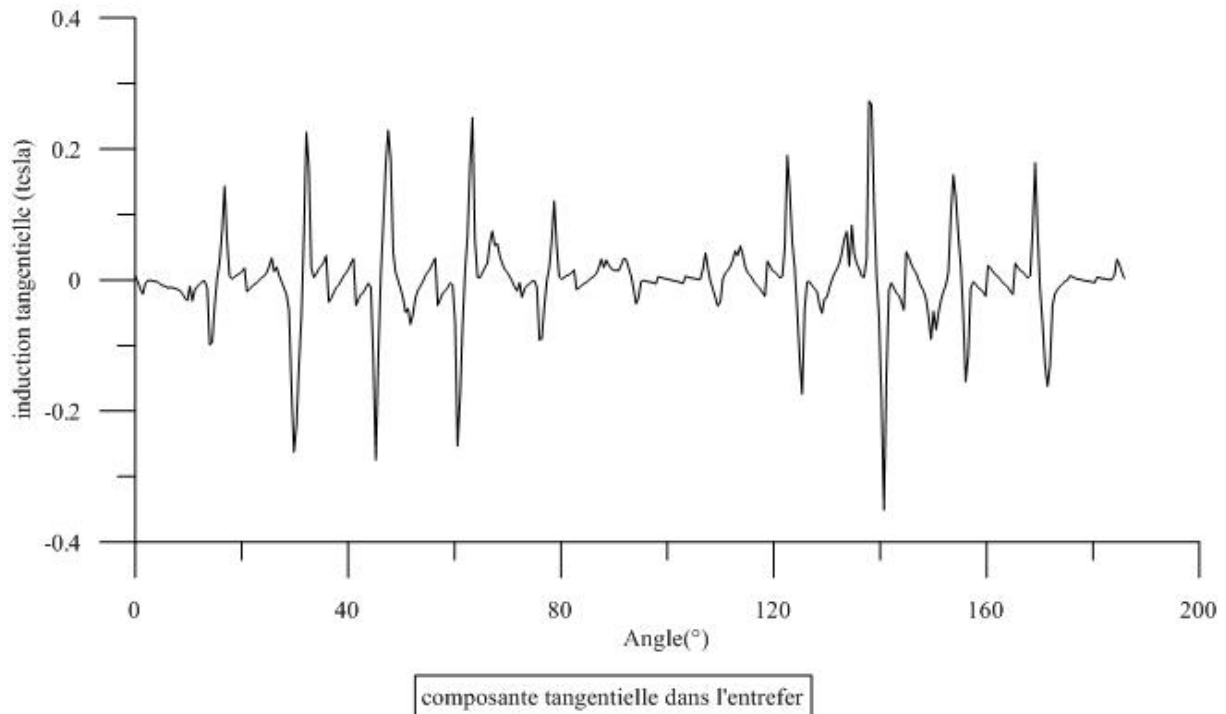


Fig. III.10 La composante tangentielle de l'induction dans l'entrefer en charge

### IV.3.3.3. Le potentiel

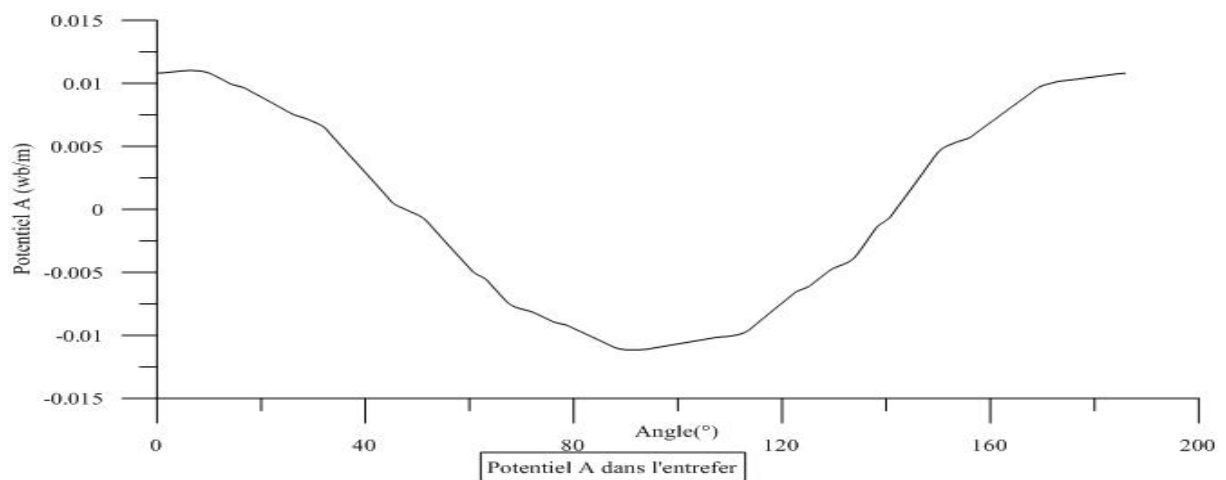


Fig. III.11 Le potentiel A dans l'entrefer

### III.4. Densité des flux magnétiques

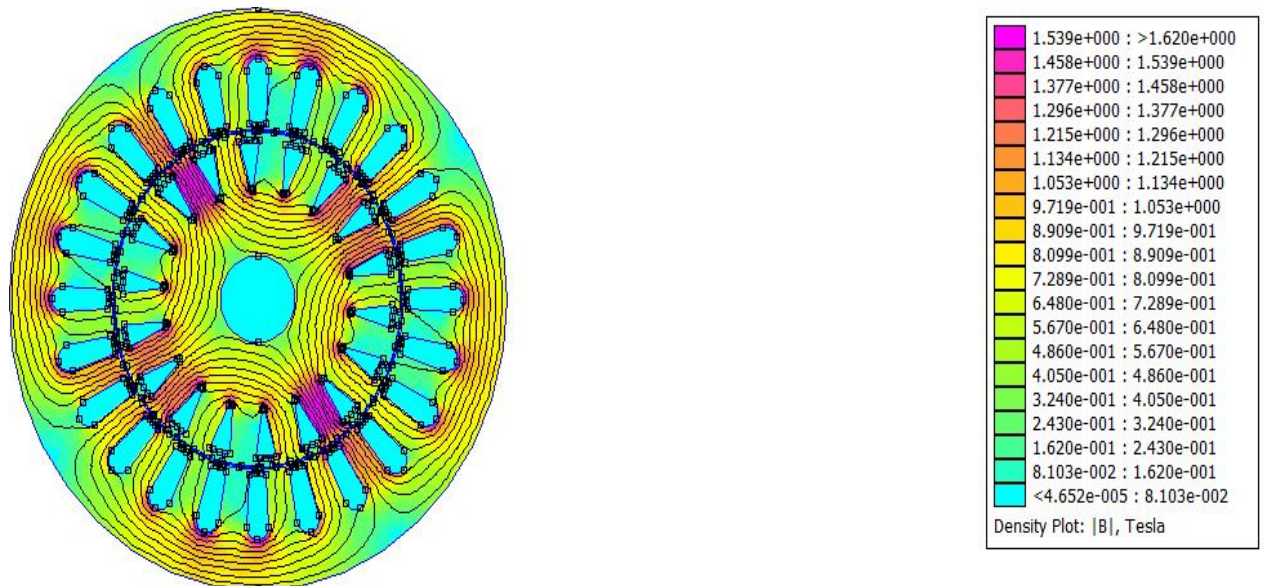


Fig. III.12 Cartographie de l'induction magnétique à vide

### III.5. Energie magnétique emmagasinée

L'aire de la courbe au dessous représente L'énergie magnétique emmagasinée dans les matériaux des tôles magnétiques. Elle se calcule à l'aide de l'expression :

$$W_e = \int_0^B H dB \quad (\text{III.1})$$

Dans le cas de la MEF à deux dimensions où le domaine d'étude est subdivisé en  $N_e$  éléments, l'expression devient :

$$W_e = \sum_{n=1}^N E_a \int_0^B H(B_n) dB \quad (\text{III.2})$$

L'intégrale de l'expression correspond à l'énergie emmagasinée par un élément du maillage, celle-ci est obtenue en utilisant la courbe de magnétisation  $B(H)$  correspondant à l'élément. Cette énergie est multipliée par l'air  $E_a$  correspondant à la surface de l'élément. La somme

sur l'ensemble des éléments du maillage donne l'énergie magnétique totale emmagasinée dans toute la section du domaine d'étude.

Une seconde expression de la coénergie qui correspond est adaptée aux matériaux non linéaires ; elle est évaluée par l'équation :

$$W_c = \vec{B} \cdot \vec{H} - W_e \quad (\text{III.3})$$

Avec la MEF à 2D, la coénergie totale le long d'une section domaine d'étude s'exprime comme suit :

$$W_c = \sum_{n=1}^N E_n \left( \frac{B_n^2}{H_n} - \int_0^{B_n} H(B_n) dB_n \right) \quad (\text{III.4})$$

Les paramètres électromagnétiques de la machine telle que les inductances et le couple électromagnétique peuvent être déterminés à partir des valeurs de l'énergie et la coénergie.

### III.6. Application du modèle de la machine

La résolution du champ magnétique nécessite toutes les données du maillage ainsi que les courbes de magnétisation des différents matériaux de la machine. Les résultats sont obtenus sous forme de données LUA console.

La résolution du champ magnétique pour différentes positions du rotor, permet de déterminer les variations des paramètres électromagnétiques (fem, inductances et le couple électromagnétique) en fonction de la position du rotor.

Le maillage effectué sur la machine comporte 67496 Nœuds et 134792 Eléments.

#### III.6.1. Force électromotrice de la machine :

Pour calculer la fem de la machine, on fait appel aux solutions de champ magnétique créées uniquement par le bobinage rotorique (les courants des bobinages statoriques sont nuls) et on s'intéresse à l'effet de ce champ sur les bobinages statoriques ; ce dernier est déterminé pour chaque position du rotor  $\forall i$  et  $\forall i + \forall$  avec un angle de rotation égal à  $2^\circ$  mécanique. Vu la symétrie de la machine ce flux est cyclique, on se limitera donc à une rotation  $180^\circ$  mécanique.

Les solutions du champ magnétique sont utilisées pour déterminer le flux par spire et par unité de longueur à travers une bobine statorique. Ce flux de champ se calcul par la combinaison des équations de Maxwell et de Stokes, qui donne l'expression :

$$\theta_s = \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S \text{rot} \vec{A} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (\text{III.5})$$

D'après cette équation l'intégrale de potentiel vecteur  $\vec{A}$  est égale au flux  $\theta_s$  du champ à travers une surface délimité par un contour C.

Dans notre cas (2D), le flux entre deux points est égal à la différence de leur potentiel magnétique multiplié par la longueur utile de la machine comme le montre la figure....

$$\theta = (A_{z2} - A_{z1}) \cdot L_u \quad (\text{III.6})$$

$$\theta_p = \theta_s \cdot N_b \cdot N_s \quad (\text{III.7})$$

$N_b$  : nombre de bobine par phase.

$N_s$  : nombre de conducteurs par encoche.

$\theta_{ph}$  : le flux par phase.

$$e_{ph} = \frac{d\theta_p}{dt} \quad (\text{III.8})$$

L'expression peut s'écrire comme suit :

$$e_{ph} = \frac{d\theta_p}{dt} = \frac{\Delta\theta_p}{\Delta\theta} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (\text{III.9})$$

En introduisant l'incrément de la position du rotor  $\Delta\theta_r$ , l'expression de la fem peut s'écrire sous la forme suivante :

$$e_{ph} = \frac{\Delta\theta_p}{\Delta\theta} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = e_{ph} \cdot \omega_r \quad (\text{III.10})$$

Avec:

$\theta$  : Angle de rotation mécanique.

$\omega_r$  : Vitesse de rotation mécanique en rd/s.

eph : Variation du flux envoyé par l'enroulement rotorique a travers une phase statorique qui correspond a la fem par unité de vitesse.

### III.6.2. Courbe de la fem à vide

La variation de flux magnétique dans une spire d'une bobine est obtenue grâce aux solutions de champ magnétique pour différentes positions du rotor.

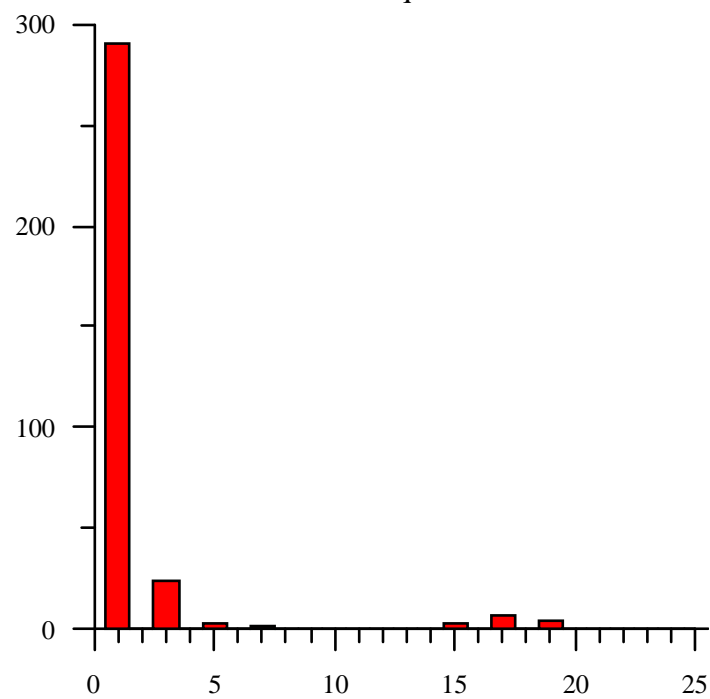
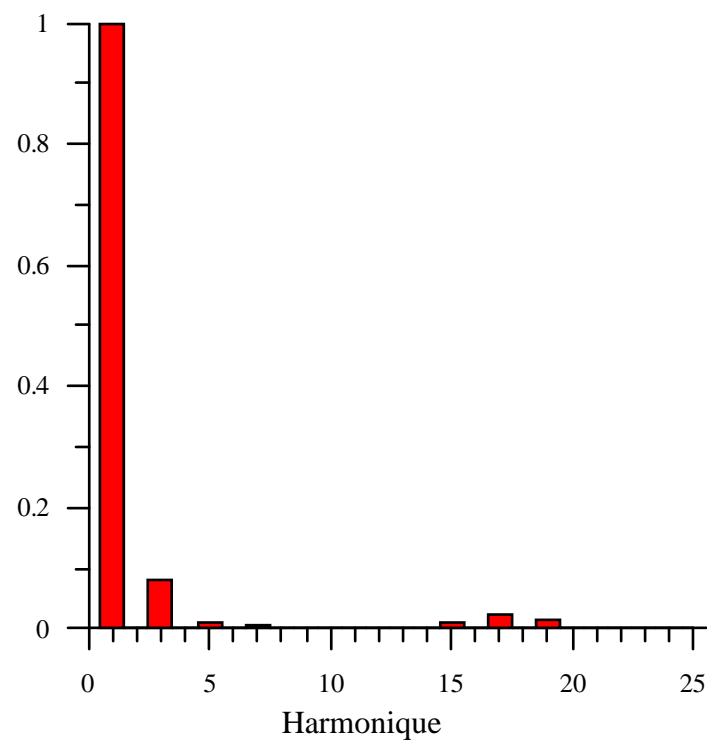
Sachant que le nombre de spire par bobine ( $N_s=146$  spires) et le nombre de bobine par phase ( $N_b=2$  bobines) sont connues, on déduit par une différence numérique l'allure de la fem à vide en fonction de la position du rotor.



**Fig. III.13** Courbe de la fem à vide

Nous constatons que la courbe de la fem à vide a une forme sinusoïdale d'amplitude 324 V qui correspond a une valeur efficace 229 V.

### III.6.3. Taux d'harmoniques



A travers l'analyse du spectre d'harmoniques de la fem, on relève un fondamental de valeur maximale de 290 V et des harmoniques de rang multiples de 3.

### III.6.4. Détermination des inductances de la machine

L'inductance du champ magnétique créée par un courant circulant dans un bobinage peut être évaluée par plusieurs méthodes. Cependant, trois méthodes peuvent être dégagées :

- La méthode basée sur le flux du champ magnétique embrassé par le bobinage
- La méthode basée sur l'énergie emmagasinée à travers le circuit magnétique
- La méthode de l'énergie de perturbation

Néanmoins, les auteurs ont montré que la méthode de l'énergie de perturbation utilisant le concept de la coénergie est très difficile à appliquer, pose des problèmes numériques selon le choix de l'incrément de courant, nécessite plusieurs solutions du champ magnétiques et un temps de calcul beaucoup plus important.

Dans notre travail on se contente d'utiliser la méthode de l'énergie magnétique emmagasinée.

### III.6.5. Méthode de l'énergie magnétique emmagasinée

En exploitant l'énergie magnétique emmagasinée à travers le circuit magnétique de la machine, on peut calculer ses inductances propres ;

#### -Inductance propre d'une phase

On alimente une seule phase statorique par un courant  $I$ , on calcule le champ magnétique qu'elle crée et on évalue ainsi l'énergie magnétique emmagasinée  $W_e$ .

$$\text{Sachant que } W_e = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{III.11})$$

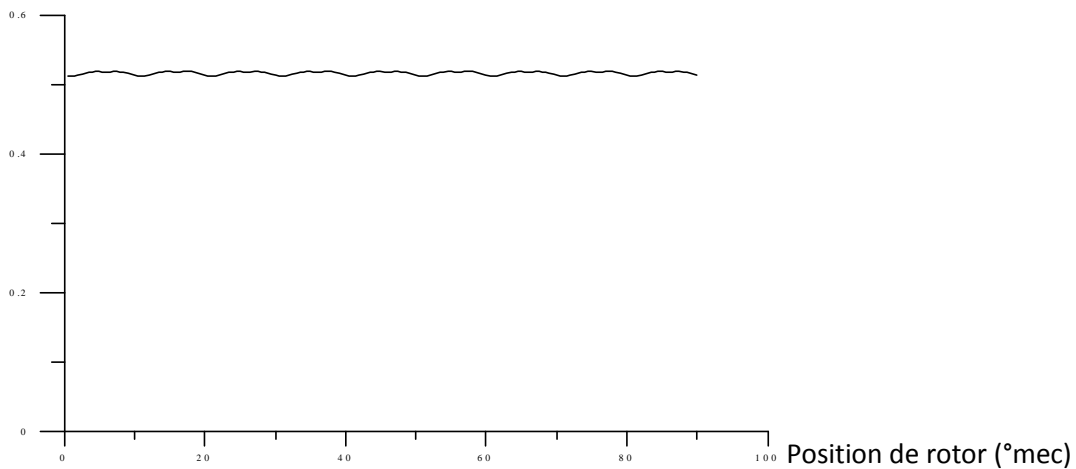
L'inductance propre  $L$  d'une phase peut être déterminée par l'expression suivante :

$$L = 2 \cdot \frac{W_e}{I^2} \quad (\text{III.12})$$

**-Courbe de l'inductance propre d'une phase de la machine ;**

La fig. III.14, représente l'allure de l'inductance propre d'une phase en fonction de la position du rotor ( $^{\circ}$ mécanique). On constate que les inductances de machine sont presque constantes. L'inductance moyenne d'une phase est 0.51 H

Inductance (H)



**Fig. III.14** Inductance propre d'une phase

**Conclusion**

Nous avons traité dans ce chapitre la simulation de la machine synchrone à pôles lisses par la méthode des éléments finis à l'aide de logiciel FEMM en nous servant de programmes écrits en lua que nous avons compilés sous environnement femm. Le programme principal permet de dessiner la structure complète, de lui affecter les différents matériaux, les courants ainsi que les conditions aux limites. Deux sous-programmes sont destinés au calcul de la femm et de l'inductance propre de la machine. La rotation de la machine est prise en compte.

Nous avons ainsi pu tracer la caractéristique à vide de notre machine à excitation nominale, ainsi que la variation de l'inductance propre d'une phase qui est relativement constante.

Une analyse du spectre d'harmoniques de la fem relève un fondamental de valeur maximale de 290 V et des harmoniques de rang multiples de 3.

Dans cette étude, nous avons étudié la machine synchrone à pôles lisses 150 VA en utilisant un logiciel de programmation lua script qui nous a permis d'écrire un programme qui prend en considération la géométrie et les propriétés physiques de notre machine. La simulation de ce programme est assurée avec le logiciel FEMM qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des champs électromagnétiques.

Notre travail a été consacré à l'évolution de quelques paramètres tels que l'induction magnétique (l'induction normale et tangentielle) et le potentiel dans l'entrefer à vide et en charge. Ensuite nous avons calculé la force électromotrice (f.e.m) de la machine à travers un programme compilé sous environnement FEMM, et nous avons pu faire une analyse spectrale de la fem à vide où on a constaté la valeur max du fondamental et des harmoniques de rang 3 qui s'ajoutent.

Par la suite, nous avons tracé la caractéristique à vide de notre machine à excitation nominale, ainsi que la variation de l'inductance propre d'une phase (le calcul de celle-ci a été effectué par la méthode de l'énergie magnétique emmagasinée à travers son circuit magnétique) où nous avons constaté qu'elle varie légèrement en fonction de la position du rotor.

Pour conclure nous espérons que notre travail sera un apport pour les futurs étudiants qui se pencheront sur la détermination des caractéristiques des paramètres des machines électriques et en particulier les machines synchrones.

- [1] :G.L.Toussaint, M.Lavabre : édition Alegria 1993 : « cours d'électrotechnique, machine à courant alternatif (Ms et Mas)»
- [2] : Dalila Sator-Namane, « machine asynchrone et synchrone, convertisseurs électromécanique» édition ellipses
- [3] : Aissa Bechouche ,Zoreli Nacer, «Etude par éléments finis d'une machine synchrone a pôles lisses» mémoire de fin d'étude de Master académique, UMMTO, 2014
- [4] : Guerouaz El Madjid, Sab Arezki, « Etude et couplage de la machine synchrone au réseau», UMMTO, 2011
- [5] :GeorgesL.LOUM, «Détermination analytique des paramètres de Potier d'une machine synchrone par laméthode des pentes» Article in J3eA January 2009,<https://www.researchgate.net/publication/41708901>
- [6] :H.BenAhmed, N.Bernard, G.Feld, B.Multon,«Machines synchrones–Modélisation en régimepermanent», Techniques de l'ingénieur, D 3521,11/2006.
- [7]: P.Silvester, M.V.KChri«Finite element solution of saturable magnetic field», IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol.PAS-89,N°7,Sep/Oct1970
- [8]K.Boukerrouche, F.Ferhaoui: « Détermination des paramètres d'une machine synchrone a aimants permanents par la méthode des éléments finis» Mémoire d'ingénieure en electrotechnique, UMMTO, 2009
- [9] : R. Saraoui : « Etude d'une machine synchrone avec la méthode des éléments finis». Mémoire de Magister en Electrotechnique Mai 2010, UMMTO
- [10] : Y. Boutikane, M.Benabdi, «Etude des performances d'une machine Synchrone apôles lisses 150 VA», UMMTO, 2009
- [11] :A.Ben Slimane, N.Mehalla, «Contribution à l'étude de l'influence de type de bobinage d'une machine synchrone apôles lisses 150 VA», UMMTO, 2015
- [12] : M.Koteich« Modélisation et Observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique» Université Paris-Saclay, 2016
- [13]: [www.pdfactory.com](http://www.pdfactory.com)
- [14]:[www.technique-ingenieur.fr](http://www.technique-ingenieur.fr)

**Programme Lua****--construction géométrique de la machine**

```
newdocument(0)
```

```
D1ext=107
```

```
D1int=62.6
```

```
mi_probdef(0,"millimeters","planar",1.e-09,80,30,"newton")
```

```
mi_addnode(0,53.5)
```

```
mi_addnode(0,-53.5)
```

```
mi_addarc(0,53.5,0,-53.5,180,10)
```

```
mi_addarc(0,-53.5,0,53.5,180,10)
```

**--créer les encoches statoriques**

```
mi_addnode(2.355,41.945)
```

```
mi_addnode(1.75,32.3)
```

```
mi_addsegment(2.355,41.945,1.75,32.3)
```

```
mi_addnode(0.75,31.9)
```

```
mi_addnode(0,44.3)
```

```
mi_addnode(0.75,31.291)
```

```
mi_addarc(0.75,31.9,1.75,31.9,45,10)
```

```
mi_addarc(2.355,41.945,0,44.3,90,10)
```

```
mi_addsegment(0.75,31.3,0.75,31.9)
```

```
mi_addnode(4.08546,31.032224)
```

```
mi_addarc(4.08546,31.032224,0.75,31.291,6.12715,10)
```

```
mi_addnode(0,31.9)
```

```
mi_addsegment(0,31.9,0.75,31.9)
```

**--sélection des dents statoriques**

```
mi_seteditmode("segments")
```

```
mi_selectsegment(2.05,37.12)
```

```
mi_selectsegment(0.375,31.9)
```

```
mi_selectsegment(0.75,31.6)
```

---

```
mi_setsegmentprop(0,0,0,0,2)
mi_clearselected()
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(1.25,31.9)
mi_setarcsegmentprop(10,"None",0,2)
mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(1.61,42.5)
mi_setarcsegmentprop(10,"None",0,2)
mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(2.41773,31.1543887)
mi_setarcsegmentprop(2,"None",0,2)
mi_clearselected()
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(2)
mi_mirror(0,0,0,100,4)
mi_selectgroup(2)
mi_copyrotate(0,0,15,23)
mi_clearselected()
--création de rotor
r21=30.78 --rayon extreme de rotor
r22=8 --rayon interne de rotor
mi_addnode(0,r22)
mi_addnode(0,-r22)
mi_addarc(0,r22,0,-r22,180,10)
mi_addarc(0,-r22,0,r22,180,10)
--création des dents rotoriques
mi_addnode(1.25,r21)
mi_addnode(1.25,r21-1.5)
mi_addsegment(1.25,r21,1.25,r21-1.5)
```

---

```
mi_addnode(2.25,r21-2.25+0.5)
mi_addnode(0.35,r21-10.9+0.5)
mi_addarc(2.25,r21-2+0.5,1.25,r21-2.5+0.5,30,10)
mi_addsegment(0.35,r21-10.9+0.5,2.25,r21-2.25+0.5)
mi_addnode(0,r21-11.25+0.5)
mi_addarc(0,r21-11.25+0.5,0.35+0.5,r21-10.9,90,10)
mi_addnode(5.34489,30.31238)
mi_addarc(5.34489,30.31238,1.25,r21,7.67276,10)
mi_addnode(0,r21-2+0.5)
mi_addsegment(0,r21-2+0.5,1.25,r21-2+0.5)
```

**--sélection des dents rotoriques**

```
mi_seteditmode("segments")
mi_selectsegment(1.175,r21-2+0.5)
mi_selectsegment(1.25,(r21+r21-2+0.5)/2)
mi_selectsegment(1.3,(r21-10.9+r21-2.25)/2)
mi_setsegmentprop(0,0,0,0,3)
mi_clearselected()
mi_seteditmode("arcsegments")
mi_selectarcsegment(0.175,(r21-11.25+r21-10.9)/2)
mi_setarcsegmentprop(10,"None",0,3)
mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(1.75,(r21-2+r21-2.5)/2)
mi_setarcsegmentprop(10,"None",0,3)
mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(3.297445,(30.31238+r21)/2)
mi_setarcsegmentprop(1,"None",0,3)
mi_clearselected()
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(3)
```

---

mi\_mirror(0,0,0,100,4)

mi\_selectgroup(3)

mi\_copyrotate(0,0,20,17)

mi\_clearselected()

### **--conditions aux limites**

#### **--Dirichlet**

mi\_addboundprop("Dirichlet",0,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_selectarcsegment(53.5,0)

mi\_selectarcsegment(-53.5,0)

mi\_setarcsegmentprop(10,"Dirichlet",0,1)

#### **--ajout des matériaux**

mi\_addmaterial("air",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_addmaterial("fer",1000,1000,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_addmaterial("acier",70,70,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_addmaterial("aluminium",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_addmaterial("cuivre",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

#### **--placer les matériaux**

#### **--l'arbre**

mi\_addblocklabel(0.1,0.1)

mi\_selectlabel(0.1,0.1)

mi\_setblockprop("acier",0,0,0,0,2)

mi\_clearselected()

#### **--les encochesrotoriques**

mi\_addblocklabel(17.40,20.20)

mi\_selectlabel(17.40,20.20)

mi\_setblockprop("cuivre1",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre1",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(9.40,25.20)  
mi\_selectlabel(9.40,25.20)  
mi\_setblockprop("cuivre2",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre2",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-0.4,27.10)  
mi\_selectlabel(-0.4,27.10)  
mi\_setblockprop("cuivre3",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre3",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-9.20,24.30)  
mi\_selectlabel(-9.20,24.30)  
mi\_setblockprop("cuivre4",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre4",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-16.30,20.0)  
mi\_selectlabel(-16.30,20.0)  
mi\_setblockprop("cuivre5",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre5",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-22.9,13.80)  
mi\_selectlabel(-22.9,13.80)  
mi\_setblockprop("cuivre6",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre6",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-26.20,4.60)  
mi\_selectlabel(-26.20,4.60)  
mi\_setblockprop("cuivre7",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre7",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

---

mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-27.10,-4.60)  
mi\_selectlabel(-27.10,-4.60)  
mi\_setblockprop("cuivre8",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre8",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-23.70,-13.30)  
mi\_selectlabel(-23.70,-13.30)  
mi\_setblockprop("cuivre9",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre9",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-17.40,-20.00)  
mi\_selectlabel(-17.40,-20.00)  
mi\_setblockprop("cuivre10",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre10",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-9.20,-24.80)  
mi\_selectlabel(-9.20,-24.80)  
mi\_setblockprop("cuivre11",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre11",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-0.30,-22.90)  
mi\_selectlabel(-0.30,-22.90)  
mi\_setblockprop("cuivre12",0,0,0,0,3)  
mi\_addmaterial("cuivre12",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(9.60,-24.60)  
mi\_selectlabel(9.60,-24.60)  
mi\_setblockprop("cuivre13",0,0,0,0,3)

---

mi\_addmaterial("cuivre13",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(17.40,-20.40)

mi\_selectlabel(17.40,-20.40)

mi\_setblockprop("cuivre14",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre14",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(23.60,-13.10)

mi\_selectlabel(23.60,-13.10)

mi\_setblockprop("cuivre15",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre15",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(26.0,-4.30)

mi\_selectlabel(26.0,-4.30)

mi\_setblockprop("cuivre16",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre16",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(26.60,5.00)

mi\_selectlabel(26.60,5.00)

mi\_setblockprop("cuivre17",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre17",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(23.70,13.30)

mi\_selectlabel(23.70,13.30)

mi\_setblockprop("cuivre18",0,0,0,0,3)

mi\_addmaterial("cuivre18",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

**--les tolesrotoriques**

mi\_addblocklabel(-3.5,-9.8)

---

```
mi_selectlabel(-3.5,-9.8)
mi_setblockprop("fer1",0,0,0,0,3)
mi_addmaterial("fer1",1000,1000,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
```

**--l'entrefer**

```
mi_addblocklabel(-0.4,31)
mi_selectlabel(-0.4,31)
mi_setblockprop("air",0,0,0,0,3)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(-31.0,2.4)
mi_selectlabel(-31.0,2.4)
mi_setblockprop("air",0,0,0,0,3)
mi_clearselected()
```

**--les encochesstatoriques**

```
mi_addblocklabel(9.3,38.1)
mi_selectlabel(9.3,38.1)
mi_setblockprop("cuivre1",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre1",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(0.620,38.19)
mi_selectlabel(0.620,38.19)
mi_setblockprop("cuivre2",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre2",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(-10.2,35.8)
mi_selectlabel(-10.2,35.8)
mi_setblockprop("cuivre3",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre3",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
```

---

mi\_addblocklabel(-18.9,32.5)  
mi\_selectlabel(-18.9,32.5)  
mi\_setblockprop("cuivre4",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre4",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-26.7,27.0)  
mi\_selectlabel(-26.7,27.0)  
mi\_setblockprop("cuivre5",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre5",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-33.1,19.7)  
mi\_selectlabel(-33.1,19.7)  
mi\_setblockprop("cuivre6",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre6",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-37.9,9.6)  
mi\_selectlabel(-37.9,9.6)  
mi\_setblockprop("cuivre7",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre7",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-36.5,0.5)  
mi\_selectlabel(-36.5,0.5)  
mi\_setblockprop("cuivre8",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre8",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(-34.4,-9.3)  
mi\_selectlabel(-34.4,-9.3)  
mi\_setblockprop("cuivre9",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre9",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(-33.4,-18.3)

mi\_selectlabel(-33.4,-18.3)

mi\_setblockprop("cuivre10",0,0,0,0,2)

mi\_addmaterial("cuivre10",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(-25.8,-25.6)

mi\_selectlabel(-25.8,-25.6)

mi\_setblockprop("cuivre11",0,0,0,0,2)

mi\_addmaterial("cuivre11",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(-18.2,-33)

mi\_selectlabel(-18.2,-33)

mi\_setblockprop("cuivre12",0,0,0,0,2)

mi\_addmaterial("cuivre12",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(-9.9,-37.5)

mi\_selectlabel(-9.9,-37.5)

mi\_setblockprop("cuivre13",0,0,0,0,2)

mi\_addmaterial("cuivre13",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(-0.8,-38.1)

mi\_selectlabel(-0.8,-38.1)

mi\_setblockprop("cuivre14",0,0,0,0,2)

mi\_addmaterial("cuivre14",1,1,0,0,0,0,0,0,0)

mi\_clearselected()

mi\_addblocklabel(9.4,-36.8)

mi\_selectlabel(9.4,-36.8)

mi\_setblockprop("cuivre15",0,0,0,0,2)

---

mi\_addmaterial("cuivre15",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(17.9,-32.2)  
mi\_selectlabel(17.9,-32.2)  
mi\_setblockprop("cuivre16",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre16",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(25.8,-25.5)  
mi\_selectlabel(25.8,-25.5)  
mi\_setblockprop("cuivre17",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre17",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(31.7,-18.3)  
mi\_selectlabel(31.7,-18.3)  
mi\_setblockprop("cuivre18",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre18",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(35.8,-9.01)  
mi\_selectlabel(35.8,-9.01)  
mi\_setblockprop("cuivre19",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre19",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(36.6,-0.3)  
mi\_selectlabel(36.6,-0.3)  
mi\_setblockprop("cuivre20",0,0,0,0,2)  
mi\_addmaterial("cuivre20",1,1,0,0,0,0,0,0,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addblocklabel(37,10.8)  
mi\_selectlabel(37,10.8)

---

```
mi_setblockprop("cuivre21",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre21",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(33.9,19.3)
mi_selectlabel(33.9,19.3)
mi_setblockprop("cuivre22",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre22",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(26.2,27.0)
mi_selectlabel(26.2,27.0)
mi_setblockprop("cuivre23",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre23",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(17.4,31.1)
mi_selectlabel(17.4,31.1)
mi_setblockprop("cuivre24",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre24",1,1,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()

--les tôlesstatoriques
mi_addblocklabel(-33,39.20)
mi_selectlabel(-33,39.20)
mi_setblockprop("fer2",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("fer2",1000,1000,0,0,0,0,0,0,0)
mi_clearselected()

--les circuits rotoriques
iz=1.6*130
mi_addcircprop("z+",iz,1)
mi_selectlabel(0,26)
mi_selectlabel(9,24)
```

---

mi\_selectlabel(16,19)  
mi\_selectlabel(23,12)  
mi\_selectlabel(0,-26)  
mi\_selectlabel(-9,-24)  
mi\_selectlabel(-16,-19)  
mi\_selectlabel(-23,-12)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"z+",0,3,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addcircprop("z-",-iz,1)  
mi\_selectlabel(25,4)  
mi\_selectlabel(24.5,-4.5)  
mi\_selectlabel(21,-13)  
mi\_selectlabel(15.5,-19)  
mi\_selectlabel(-25,-4)  
mi\_selectlabel(-24.5,4.5)  
mi\_selectlabel(-21,13)  
mi\_selectlabel(-15.5,19)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"z-",0,3,0)  
mi\_clearselected()  
**--les circuits statoriques**  
 $i=0.23*146$   
**--phase a**  
 $ia=i/2$   
mi\_addcircprop("a+",ia,0)  
mi\_selectlabel(0,37.7)  
mi\_selectlabel(10.3,37.7)  
mi\_selectlabel(0,-40)  
mi\_selectlabel(-10.5,-36.8)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"a+",0,1,0)

---

mi\_clearselected()  
mi\_addcircprop("a-",-ia,0)  
mi\_selectlabel(40,0)  
mi\_selectlabel(38.5,-10.5)  
mi\_selectlabel(-40,0)  
mi\_selectlabel(-38.5,10.5)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"a-",0,1,0)  
mi\_clearselected()  
**--phase b**  
ib=-i  
mi\_addcircprop("b-",-ib,0)  
mi\_selectlabel(33,19)  
mi\_selectlabel(37.2,10)  
mi\_selectlabel(-34.5,-19.3)  
mi\_selectlabel(-37.5,-10)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"b-",0,1,0)  
mi\_clearselected()  
mi\_addcircprop("b+",ib,0)  
mi\_selectlabel(18.8,-33)  
mi\_selectlabel(10.5,-36.5)  
mi\_selectlabel(-19,33)  
mi\_selectlabel(-10.5,37)  
mi\_setblockprop("cuivre",1,0,"b+",0,1,0)  
mi\_clearselected()  
**--phase c**  
ic=i/2  
mi\_addcircprop("c+",ic,0)  
mi\_selectlabel(31.5,-18.4)  
mi\_selectlabel(25.70,-25.20)

```
mi_selectlabel(-26.6,26.60)
mi_selectlabel(-32.40,19.50)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"c+",0,1,0)
mi_clearselected()
mi_addcircprop("c-",-ic,0)
mi_selectlabel(-25.50,-25.50)
mi_selectlabel(-19.00,-32.60)
mi_selectlabel(25.90,27.30)
mi_selectlabel(17.50,31.70)
mi_setblockprop("cuivre",1,0,"c-",0,1,0)
mi_clearselected()
--crée un contour
mi_addnode(0,31.04)
mi_addnode(0,-31.04)
mi_addarc(0,31.04,0,-31.04,180,1)
mi_addarc(0,-31.04,0,31.04,180,1)
mi_zoomnatural()
mi_saveas("msplisses.fem")
mi_createmesh()
mi_loadsolution()
```

**--calcul de la f.e.m à vide**

```
open("msplisses.fem")
showconsole()
clearconsole()
tet=0
pas=2
nb=2
ns=146
lu=80
mi_createmesh()
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mo_seteditmode("area")
mo_selectblock(0,38)
a1=mo_blockintegral(1)
s1=mo_blockintegral(5)
a1=a1/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(10,37)
a2=mo_blockintegral(1)
a2=a2/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(38,0)
a3=mo_blockintegral(1)
a3=a3/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(37,-10)
a4=mo_blockintegral(1)
a4=a4/s1
```

---

```
tet=tet+pas
fiso=a1+a2-a3-a4
mo_clearblock()
for i=1,90 do
mi_selectgroup(3)
mi_moverotate(0,0,pas)
mi_clearselected()
mi_saveas("temp.fem")
mi_createmesh()
mi_analyse()
mi_loadsolution()

mo_selectblock(0,38)
a1=mo_blockintegral(1)
s1=mo_blockintegral(5)
fi1=a1/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(10,37)
a2=mo_blockintegral(1)
fi2=a2/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(38,0)
a3=mo_blockintegral(1)
fi3=a3/s1
mo_clearblock()
mo_selectblock(37,-10)
a4=mo_blockintegral(1)
fi4=a4/s1
mo_clearblock()
```

```
tet=tet+1
```

```
fis=fi1+fi2-fi3-fi4
```

```
da=fis-fiso
```

```
--ef=da*9*lu*nb*ns
```

```
ef=da*210240/(0.08*pas)
```

```
print(tet,ef,fis)
```

```
fiso=fis
```

```
end
```

---

**--calcul des inductances propres**

```
open("msplisses.fem")
showconsole()
clearconsole()
pas=0.5
tet=0
for o=1,180 do
tet=tet+pas
mi_createmesh()
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mi_selectgroup(3)
mi_moverotate(0,0,pas)
mo_seteditmode("area")
mo_groupselectblock()
w=mo_blockintegral(2)
Laa=2*(w)/0.0529    --inductance propre
mo_clearblock()
print(tet,Laa)
end
```

**Résultats Obtenus après simulation du programme calcul de la f.e.m à vide0:**

|     |                   |                     |
|-----|-------------------|---------------------|
| 1,  | 113.52594663666,  | 0.0026956587027474  |
| 3,  | 124.84515331171,  | 0.0027906702349481  |
| 5,  | 121.28794921658,  | 0.0028829746103032  |
| 7,  | 73.638496892137,  | 0.0029390160843459  |
| 9,  | 81.363610847651,  | 0.0030009366405465  |
| 11, | 31.313681384911,  | 0.0030247674482976  |
| 13, | 45.691113120758,  | 0.0030595399849192  |
| 15, | 32.747441564396,  | 0.0030844619343594  |
| 17, | -7.2163191225004, | 0.0030789700628811  |
| 19, | 0.90574394223331, | 0.003079659365729   |
| 21, | -51.291839135727, | 0.003040624480542   |
| 23, | -36.616655582049, | 0.0030127579237825  |
| 25, | -48.965943316261, | 0.0029754931267381  |
| 27, | -87.0954692059,   | 0.0029092104256682  |
| 29, | -87.620178216194, | 0.0028425284026726  |
| 31, | -135.70174085776, | 0.0027392546272862  |
| 33, | -112.93066059834, | 0.0026533104411383  |
| 35, | -129.4869593187,  | 0.0025547663320677  |
| 37, | -163.98952125267, | 0.0024299645655132  |
| 39, | -173.0120815525,  | 0.0022982963147122  |
| 41, | -215.56088318423, | 0.0021342469363376  |
| 43, | -201.58047383245, | 0.0019808371389004  |
| 45, | -222.39508153413, | 0.0018115866963326  |
| 47, | -243.82321875193, | 0.0016260286911941  |
| 49, | -260.14412055616, | 0.0014280499084269  |
| 51, | -293.08737861533, | 0.0012050001530119  |
| 53, | -281.01290353165, | 0.00099113949583407 |
| 55, | -293.38979565523, | 0.00076785959046479 |

---

|      |                   |                      |
|------|-------------------|----------------------|
| 57,  | -296.79037757945, | 0.00054199172320494  |
| 59,  | -311.4216931243,  | 0.00030498891260806  |
| 61,  | -323.96665534685, | 5.8438946590666E-005 |
| 63,  | -313.81322616965, | -0.00018038390437559 |
| 65,  | -324.20383166285, | -0.00042711436987242 |
| 67,  | -294.28912955453, | -0.0006510786998226  |
| 69,  | -302.39352743321, | -0.00088121076027406 |
| 71,  | -289.18894852215, | -0.0011012936739134  |
| 73,  | -283.41179777145, | -0.0013169799735873  |
| 75,  | -281.30171159481, | -0.0015310604238117  |
| 77,  | -242.30547505692, | -0.0017154633728656  |
| 79,  | -243.41361576804, | -0.0019007096557941  |
| 81,  | -207.53001438555, | -0.0020586472618714  |
| 83,  | -205.60350344837, | -0.002215118725683   |
| 85,  | -204.29193747976, | -0.0023705920418776  |
| 87,  | -156.2705906144,  | -0.0024895194319951  |
| 89,  | -158.00210358539, | -0.0026097645640997  |
| 91,  | -113.2208071246,  | -0.0026959295619114  |
| 93,  | -125.81279020547, | -0.0027916774996629  |
| 95,  | -117.29840328588, | -0.0028809456909002  |
| 97,  | -76.298214401621, | -0.002939011303078   |
| 99,  | -80.801642190999, | -0.0030005041814578  |
| 101, | -32.533666871942, | -0.0030252634408733  |
| 103, | -44.705450667514, | -0.0030592858538622  |
| 105, | -34.842621202714, | -0.0030858023083544  |
| 107, | 8.8294157924345,  | -0.0030790828138396  |
| 109, | 0.6992729622405,  | -0.0030785506426355  |
| 111, | 50.914877816204,  | -0.0030398026382091  |
| 113, | 35.245375462097,  | -0.0030129796736261  |

---

|      |                  |                       |
|------|------------------|-----------------------|
| 115, | 49.499003124188, | -0.0029753091994068   |
| 117, | 86.858200888782, | -0.0029092070678324   |
| 119, | 87.245501717533, | -0.0028428101867688   |
| 121, | 134.81631627339, | -0.0027402102504877   |
| 123, | 114.10667961513, | -0.0026533710726984   |
| 125, | 130.70166461375, | -0.0025539025303744   |
| 127, | 163.03622428061, | -0.0024298262561882   |
| 129, | 173.17593280446, | -0.0022980333088485   |
| 131, | 216.1983021464,- | 0.0021334988323291    |
| 133, | 201.32727821071, | -0.0019802817256239   |
| 135, | 220.09578783164, | -0.0018127811260564   |
| 137, | 244.65378499382, | -0.0016265910309317   |
| 139, | 260.86788517552, | -0.0014280614379519   |
| 141, | 291.99670370889, | -0.0012058417243226   |
| 143, | 280.90208664119, | -0.00099206540267785  |
| 145, | 297.03697694946, | -0.00076600986466456  |
| 147, | 295.00124594444, | -0.00054150358921217  |
| 149, | 311.2551821176,  | -0.00030462749932054  |
| 151, | 324.50890743101, | -5.7664860484158E-005 |
| 153, | 314.61127697668, | 0.00018176533508409   |
| 155, | 319.367473004,   | 0.0004248151623322    |
| 157, | 297.14157161089, | 0.00065095030054444   |
| 159, | 302.62975680686, | 0.00088126213981907   |
| 161, | 288.87994328474, | 0.0011011098896552    |
| 163, | 282.51642204698, | 0.0013161147770578    |
| 165, | 285.95205753051, | 0.0015337343033367    |
| 167, | 240.16148405691, | 0.0017165056001837    |
| 169, | 242.65485231421, | 0.0019011744375613    |
| 171, | 207.68067826702, | 0.0020592267041268    |

173, 206.51183839546, 0.0022163894426317  
175, 199.79779265686, 0.0023684425572869  
177, 158.92950331129, 0.0024893934730489  
179, 158.06146947494, 0.0026096837846737

# Résumé

Une machine électrique tournante est un système électromécanique réversible, qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement moteur) et vice versa (fonctionnement générateur). Inventées durant le XIXème siècle, les machines électriques constituent aujourd'hui l'une des principales forces motrices de la civilisation contemporaine. Elles sont quasiment omniprésentes dans les industries : production d'énergie électrique, transport (voitures, trains, avions), robotique, machines-outils, produits électroménagers... etc

Notre travail a été consacré à l'évolution de quelques paramètres tels que l'induction magnétique (l'induction normale et tangentielle) et le potentiel dans l'entrefer à vide et en charge. Ensuite nous avons calculé la force électromotrice (f.e.m) de la machine à travers un programme compilé sous environnement FEMM, et nous avons pu faire une analyse spectrale de la fem a vide.

Ensuite, nous avons tracé la caractéristique à vide de notre machine à excitation nominale, ainsi que la variation de l'inductance propre d'une phase (le calcul de celle-ci a été effectué par la méthode de l'énergie magnétique emmagasinée à travers son circuit magnétique) ou nous avons constaté qu'elle varie légèrement en fonction de la position du rotor.

**Mots Clés :** Machine synchrone, Pôles lisses, Méthode des Éléments finis, Diagramme de potier, Diagramme de behn-eschenberg, Logiciel FEMM, Modélisation des machines électriques