

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la 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 ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Bechouche aissa
ZORELI NACER

Thème

Etude par Eléments Finis d'une Machine Synchrone à poles lisses

Mémoire soutenu publiquement le 24 septembre 2014 devant le jury composé de :

M BELACEL.M.T UMMTO, Président

M y,BOUTORA UMMTO, Rapporteur

M SARAQUI.R UMMTO, Examineur

M RADJA.N, UMMTO, Examineur

Dédicace

B .AISSA

Je dédie ce modeste travail :

A très chers parents qui m'ont soutenu de mieux qu'ils peuvent.

A tous mes frères et sœurs.

A tous mes amis(es).

Z.NACER

Je dédie ce modeste travail :

A très chers parents qui m'ont soutenu de mieux qu'ils peuvent.

A tous mes frères et sœurs.

A tous mes amis(es).

Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'invention de la machine de Gramme dans les années 1870, les améliorations technologiques n'ont pas cessé d'accroître les performances des machines électriques.

Ces améliorations sont de plusieurs ordres pour ce qui est des machines synchrones : excitation, structure mécanique, mode de régulation, etc. Les constructions ont toujours essayé dans la mesure du possible de rendre leurs machines fiables vis-à-vis des pannes et de certaines conditions de fonctionnement. En effet la recherche d'une machine électrique avec un haut rendement est l'un des points fondamentaux.

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 (géométries complexes et multiples, non linéarité des circuits magnétiques mis en jeu, phénomènes couplés, mouvement relatif) rend leur étude difficile et l'utilisation de modèles analytiques insuffisante. Le recours aux méthodes numériques est donc indispensable ; l'une des méthodes les plus utilisées est la méthode des éléments finis [2].

En employant la méthode des éléments finis, il est devenu possible d'avoir une description électromagnétique très précise de la machine, mais les deux problèmes principaux sont le temps de calcul dans des simulations par éléments finis et le grand nombre de paramètres de la machine électrique. Pour cette raison, les éléments finis sont très utiles pour réaliser la perspicacité pendant l'étape de conception de la machine. Et pour cela on dispose de divers logiciels de calcul comme, par exemple, le logiciel libre FEMM (finite elements magnetic method) pour le calcul avec la méthode des éléments finis des problèmes à deux dimensions.

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, le couple de denture et le couple statique, et déterminer des inductances de notre machine.

Introduction générale

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine synchrone.
- Le deuxième chapitre est consacré au calcul par éléments finis.
- Le troisième chapitre concerne l'étude de la machine sous environnement FEMM.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

I.1 Introduction

La machine synchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation est directement liée à la pulsation des courants induits.

Elle est généralement utilisée comme génératrice (alternateur) ou comme moteur à vitesse d'entraînement constante et peut être également utilisée comme compensateur afin d'améliorer le facteur de puissance des installations électriques.

L'alternateur transforme l'énergie mécanique que lui fournit la machine qui l'entraîne en énergie électrique. Il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux et constitue le support principal dans la production d'énergie électrique.

La machine synchrone assure également la conversion énergétique inverse en transformant l'énergie électrique en énergie mécanique en fonctionnement moteur. Il est utilisé pour l'entraînement des engins de grandes puissances comme les navires et les trains à grande vitesse TGV.

I.2 Définition

Le terme 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 permanents, soit par une circulation des charges électriques. 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 du moteur de quelques watts, aux alternateurs de plusieurs Méga Watts. Néanmoins, la structure de ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements uniformément répartis, tels que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique, soit sinusoïdale ou trapézoïdale. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine synchrone.

I.3 Constitution de la machine synchrone

Une machine synchrone comporte deux parties magnétiques séparées par un entrefer

I.3.1 Stator (induit)

C'est la partie fixe de la machine, il est constitué de trois enroulements décalés de $2/3$ électriques, disposés dans des encoches de façon à créer un champ tournant qui a le même nombre de pôles que l'enroulement inducteur.

Son circuit magnétique statorique est généralement construit avec des tôles feuilletées.

I.3.2 Rotor (inducteur)

C'est la partie tournante de la machine, elle est séparée du stator par un entrefer qui est soit constant (machine synchrone à pôles lisses), soit variable (machine synchrone à pôles saillants).

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu (apporté par l'intermédiaire de bagues et de balais) créant un champ magnétique fixe à 2p pôles.

I.3.3 L'arbre

Il assure la transmission de l'énergie mécanique et le guidage des masses tournantes ; il est en acier forgé, il doit être dimensionné pour supporter les différents régimes de fonctionnement. Les machines comportent un ou deux bouts d'arbre pour l'accouplement.

I.3.4 Les balais

Ce sont des pièces conductrices, généralement fixées, qui assurent la liaison électrique par un contact glissant entre la partie fixe et la partie mobile.

I.3.5 Les paliers

Ce sont des organes réalisés en acier soudé, destinés à supporter l'arbre tournant et pouvant limiter son déplacement axial. Ils reçoivent des roulements à billes ou à rouleaux. Un dispositif de graissage assure la lubrification.

I.3.6 Les flasques

Ce sont des pièces massives ou ajourées. Fixées à la carcasse servant à protéger les enroulements.

I.3.7 Les portes balais

Organe servant à porter les balais, et permettant de les maintenir en contact avec la surface mobile.

I.3.8 Les bagues collectrices

Ce sont des organes conducteurs sur lesquels s'appuient les balais, destinées à permettre le passage du courant du circuit induit au circuit inducteur pour une machine auto-excitée.

I.3.9 La carcasse

Ce sont des pièces ensembles, soutenant et renfermant le paquet statorique, assurant la protection contre les chocs extérieurs. Sur la carcasse, on dispose d'une plaque signalétique indiquant les caractéristiques de la machine et son régime de fonctionnement. [1]

I.3.10 La boîte à bornes

C'est un dispositif permettant le raccordement des extrémités des conducteurs de la machine avec le réseau extérieur.

I.4 Classification des machines synchrones

Il existe trois grandes familles de rotors, ayant pour rôle de générer le champ d'induction statorique ;

I.4.1 Machines synchrones à pôles lisses

Le rotor de la machine synchrone à pôles lisses est cylindre en acier ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Celui-ci en générale deux ou quatre pôles. Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour des machines de fortes puissances destinées à tourner à grandes vitesses. [2](Figure I.1) ;

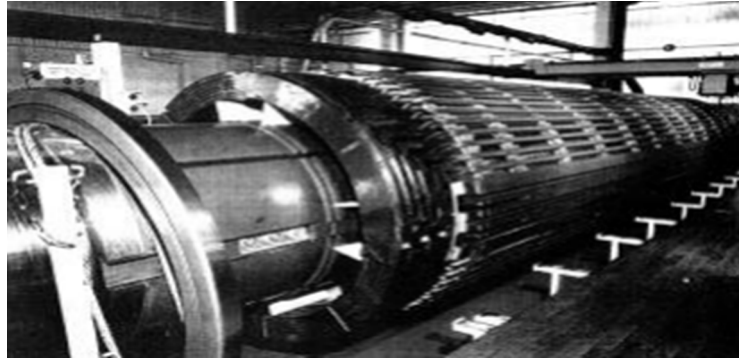


Figure I.1 : Rotor à pôles lisses

I.4.2 Machines synchrones à pôles saillants

En plaçant des pièces polaires sur une culasse avec des enroulements d'excitation constituées par des bobines et on obtient un rotor constitué de $2p$ pôles. On utilise ce type de machines dans les centrales hydrauliques[3] voire la (figure I.3)

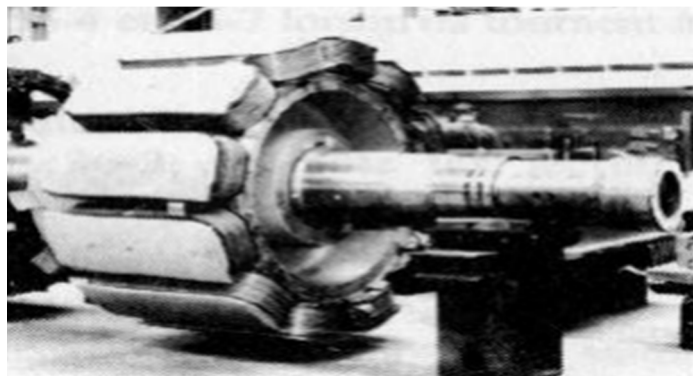


Figure I.2:Rotor à pôles saillants

I.4.3 Machines synchrone à rotor à aimant permanent

Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19^{ème} siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants. L'utilisation d'aimants permanents est aujourd'hui quasiment systématique pour les puissances inférieures à 10KW et s'étendent maintenant vers les fortes puissances

[4]. Au-delà, le coût d'utilisation d'aimants devient souvent prohibitif. Seules quelques applications très spécifiques, comme par exemple la propulsion navale ou les contraintes d'encombrement sont majeures, envisagent l'utilisation des aimants pour des fortes puissances. On voit la (figure I.4)



Figure I.3: Rotor à aimant permanent

I.5 Fonctionnement des machines synchrones

Les machines synchrones peuvent fonctionner en générateur ; elles sont alors appelées alternateur. Elles peuvent fonctionner également en moteur (moteur synchrone) et en compensateur synchrone.

I.5.1 Principe de fonctionnement de l'alternateur (générateur)

Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation de façon mécanique (turbine, moteur à combustionetc) 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 force électromotrice triphasée, dont la composante fondamentale est de pulsation $\omega = p\Omega_r$. Dans les réseaux électriques, l'ensemble des alternateurs des différentes centrales sont connectés en parallèle sur le même réseau, et produisent des courants des tensions de même fréquence [5].

I.5.2 Principe de fonctionnement d'un moteur synchrone triphasé

Lorsque le bobinage statorique du moteur synchrone est connecté à une source de tension triphasée de pulsation ω , ces courants engendrent dans l'entrefer un champ tournant à la même vitesse $\Omega_s = \omega$ avec ω pulsation des courants et p le nombre de paire de pôle de la machine.

Le rotor du moteur synchrone triphasé est alimenté en courant continu par un système de contact glissant (bagues), ce qui crée un champ magnétique rotorique qui suit le champ tournant statorique avec un décalage δ lié à la charge (plus la charge est importante, plus δ est grand).

Si le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique, les deux champs ont tendance à s'aligner l'un en face de l'autre et il en résulte un couple mécanique.

Si le champ rotorique tourne à une vitesse différente du champ statorique, le couple change sans cesse de signe selon que le champ statorique précède ou suit le champ rotorique et le couple moyen est nul. Le moteur synchrone ne développe donc un couple moyen non nul que lorsque son rotor tourne à la même vitesse du synchronisme imposée par la fréquence des courants dans le stator [5].

I.5.3 Compensateur synchrone

Un moteur synchrone fonctionnant sans charge et absorbant un courant réactif en avance ou en retard par rapport à la tension du réseau est appelé compensateur synchrone. Cette machine est utilisée pour améliorer les $\cos \phi$ et pour régler la tension des lignes de transport et des réseaux.

Pour améliorer le facteur de puissance, le compensateur synchrone fonctionne en régime surexcité et fournit au réseau un courant capacitif qui compense le courant en retard des moteurs asynchrones et des transformateurs. Cela permet de décharger les lignes d'alimentation des courants inductifs qui sont en retard, ce qui diminue les pertes dans le réseau et améliore l'utilisation des alternateurs des centrales électriques. [6]

I.6 Domaine d'application des machines synchrones

La quasi-totalité des générateurs de courant alternatif sont des alternateurs ; leurs puissances apparentes étant comprises entre quelque centaines de VA et plus de 1600 MVA.

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

Ils constituent le support principal dans la production d'énergie électrique. Le moteur synchrone effectue la conversion énergétique inverse, il transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur équipe également certains dispositifs dont la vitesse de rotation doit être rigoureusement constante (horloges synchrones).

Dans de plus en plus d'applications et à tous les niveaux de puissances, le moteur synchrone équipé d'un convertisseur électronique adéquat, remplace le moteur synchrone autopiloté ou moteur à courant continu sans balais.

I.7 Mode d'excitation des machines synchrones

Il existe deux modes d'excitation :

I.7.1 Mode d'excitation direct (auto-excité)

L'énergie nécessaire à l'excitation de la machine synchrone est prélevée à l'enroulement de l'induit, le redressement du courant alternatif obtenu depuis l'induit étant assuré par des redresseurs à semi-conducteurs commandés (thyristors). Il existe deux systèmes :

- 1) Système d'excitation balais – bagues assurant la liaison électrique entre l'induit et l'inducteur.

- 2) L'excitation de l'inducteur principal est assurée par une excitatrice, dont l'induit est monté sur l'arbre de l'alternateur et l'inducteur fixe. Le redressement du courant d'excitation est assuré par des redresseurs semi – conducteurs tournants, ce système est dit : système sans balais-bagues [7].

I.7.2 Mode d'excitation indirect (indépendant)

L'énergie nécessaire à l'alimentation de l'enroulement d'excitation est fournie par une source indépendante de la machine, par exemple, en utilisant une génératrice à courant continu [7].

I.8 Avantages et inconvénients des machines synchrones

I.8.1 Avantages

- Leur vitesse est constante quelque soit la charge (ne dépend que de la fréquence)
- Elles fonctionnent en compensateur synchrone, ce qui les rend capables d'améliorer le facteur de puissance des installations
- Elles peuvent supporter des chutes de tensions relativement importantes (de l'ordre de 50%, ceci grâce à la possibilité de surexcitation), sans décrocher, en effet, le couple est proportionnel à la tension, alors que dans le cas d'un moteur asynchrone il est proportionnel au carré de la tension.
- Elles ont un très bon rendement, qui peut aller de 93% jusqu'à 97% pour des puissances nominales allant de 1000 à 3000 MW, le rendement croissant avec la puissance nominale mais dépendant aussi de la vitesse nominale.

L'entrefer mécanique peut être choisi relativement important (du fait qu'on dispose du courant d'excitation pour le magnétiser) ce qui augmente la sécurité mécanique.

I.8.2 Inconvénients

- Elles présentent des difficultés de démarrage.
- Si le moteur vient de décrocher, il s'arrête et il faut reprendre tout le processus de démarrage.
- La présence de l'inducteur à courant continu rend le moteur plus coûteux qu'un moteur asynchrone, il nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.
- Utilisation de deux sources de tension, alternative et continue.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la constitution de la machine synchrone en rappelant les différents types de cette dernière, les différentes utilisations ainsi que les avantages et les inconvénients de la machine synchrone.

I.1 Introduction

La conception des dispositifs électromagnétiques requiert une connaissance sans cesse améliorée des phénomènes électromagnétiques. Les méthodes de calcul empiriques ou analytique basées sur des modèles simplificateurs deviennent insuffisantes, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des caractéristiques non linéaires. La résolution de tels problèmes nécessite le recours à des méthodes numériques.

La modélisation numérique des systèmes électromagnétiques dans les aspects d'analyses de performances, le contrôle et la surveillance des systèmes existants, le développement ; la conception et l'optimisation de nouveaux dispositifs a connu une avancée considérable. Ceci est dû principalement à une croissance continue des besoins industriels à travers la recherche de nouveaux modèles d'une part, et le développement des moyens informatiques d'autre part. [8]

La méthode numérique la plus courante 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. [9]

Dans ce qui suit, nous présentons la méthode des éléments finis, et son application à la modélisation des dispositifs électromagnétiques. Les principales étapes de mise en œuvre de cette méthode sont donc présentées.

II.2 Présentation de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis tient son origine dans l'analyse des structures [10]. Bien que les premiers calculs effectués avec cette méthode soient fournis par Courant [11] en 1943, la méthode des éléments finis n'a vu son application pour les problèmes d'électromagnétisme que depuis la fin des années 60. Les premières applications dans ce domaine reviennent à P. Silvester et M.V.K. Chari. [9]

L'évolution de la méthode est intimement liée au développement de l'ingénierie et de l'informatique. Son application dans des domaines variés comme l'aéronautique est un témoignage du haut degré de précision de la méthode. [11]

D'une manière générale, cette méthode 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.

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 sous-domaines, pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques dont la résolution fournit une solution approchée du problème. [11]

II.3 Formulation des équations d'électromagnétisme

II.3.1 Equations de Maxwell

Les équations locales de l'électromagnétisme ou « équations de Maxwell » décrivent le comportement local dans le temps et dans l'espace des grandeurs électriques et magnétiques et leurs interactions mutuelles. Les quatre équations suivantes présentent la forme la plus générale des équations de Maxwell.

Quatre grandeurs vectorielles caractérisent le champ électromagnétique, ces grandeurs, qui dépendent de l'espace et du temps sont le champ électrique \vec{E} , le champ magnétique \vec{H} , l'induction magnétique \vec{B} et l'induction électrique \vec{D} , ces quatre grandeurs sont régies par les équations de Maxwell, c'est-à-dire en présence d'éventuelles charges et courants de conduction.

II.3.1.1 Forme intégrale des équations de Maxwell

- **Première équation de Maxwell**

Cette équation décrit le théorème de Gauss, qui relie le flux de l'induction électrique D à travers une surface fermée S à la charge électrique totale contenue à l'intérieur de volume V . S'appuyant sur cette même surface. [12]

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_i \quad (\text{II.1})$$

Avec :

\vec{D} : Vecteur déplacement électrique [C/m^2].

$\sum q_i$: Somme de charges électriques contenues dans un volume V .

$$\sum q_i = Q = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (\text{II.2})$$

ρ : Densité de charge volumique [C/m^3].

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (\text{II.3})$$

- **Deuxième équation de Maxwell**

D'après le théorème d'Ampère, qui traduit la relation entre le courant électrique et le champ magnétique on a [12]:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i = I \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.5})$$

En présence de courant de déplacement on aura :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_D \quad (\text{II.6})$$

\vec{J}_c : Vecteur densité de courant de conduction.

\vec{J}_D : Vecteur densité de courant de déplacement.

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

D'où :

$$\oint_C \vec{H}.d\vec{l} = \iint_S \vec{J}_c.d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{D}.d\vec{S} \quad (\text{II.7})$$

• **Troisième équation de Maxwell**

Elle exprime la loi de Faraday sous forme différentielle. D'après la loi de Lenz la f.e.m induite est :

$$e = - \frac{d \phi}{dt} \quad (\text{II.8})$$

D'autre part, on a :

$$e = \int_C \vec{E}.d\vec{l} \quad (\text{II.9})$$

Et :

$$\phi = \iint_S \vec{B}.d\vec{S} \quad (\text{II.10})$$

D'où :

$$\int_C \vec{E}.d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.d\vec{S} \quad (\text{II.11})$$

• **Quatrième équation de Maxwell**

Cette équation exprime le principe de la conservation de flux magnétique (le flux à travers une surface fermée est nul).

$$\iint_S \vec{B}.d\vec{S} = 0 \quad (\text{II.12})$$

II.3.1.2 Forme différentielle des équations de Maxwell

Les quatre équations de Maxwell seront présentées ci-dessous sous la forme générale :

➤ Equation de maxwell-Faraday : $\overrightarrow{rot}.\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (II.13)

➤ Equation de maxwell-Ampère : $\overrightarrow{rot}.\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (II.14)

➤ Equation de conservation de flux magnétique : $div.\vec{B} = 0$ (II.15)

➤ Equation de maxwell-Gauss : $div.\vec{D} = \rho$ (II.16)

Avec :

\vec{E} (V.m⁻¹) Champ électrique.

$\vec{B}(T)$	Induction magnétique.
$\vec{H}(A.m^{-1})$	Champ magnétique.
$\vec{J}(A.m^{-2})$	Densité de courant.
$\vec{D}(C.m^{-2})$	Induction électrique.
$\rho(C.m^{-3})$	Charge volumique.
$\frac{d\vec{D}}{dt}(A.m^{-2})$	Densité de courant de déplacement

La résolution de ces équations permet de décrire totalement les systèmes électromagnétiques en liant les valeurs électriques entre elle. En électrotechnique, les fréquences de fonctionnements sont relativement basses. Il est donc possible de négliger le terme associé à la densité de courant de déplacement $\left(\frac{d\vec{D}}{dt} = 0\right)$. On parle alors de champ quasi-statique. Les équations de Maxwell dans ces cas se réduisent à [13] :

$$\overrightarrow{rot}.\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (II.17)$$

$$\overrightarrow{rot}.\vec{H} = \vec{J} \quad (II.18)$$

$$div.\vec{B} = 0 \quad (II.19)$$

$$div.\vec{D} = \rho \quad (II.20)$$

II.3.2 Relations du milieu

On sait que l'induction magnétique dépend du champ magnétique, mais également d'autres caractéristiques de la matière, telles la température, traitements mécaniques subis antérieurement, etc..... On exprime généralement cette liaison par la relation :

$$\vec{B} = \mu . \vec{H} \quad (II.21)$$

Avec ; $\mu = \mu_0 \mu_r$

Où :

$\mu_0 (Hm^{-1})$: Perméabilité magnétique de vide $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$

μ_r : Perméabilité magnétique relative de milieu

$\mu (Hm^{-1})$: Perméabilité magnétique absolue

De même, le déplacement électrique dépend du champ électrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (II.22)$$

Avec : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

Où :

$\varepsilon_0 (F.m^{-1})$: Permittivité électrique de vide ; $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$

ε_r : Permittivité relative de milieu.

$\varepsilon (F.m^{-1})$: Permittivité électrique.

II.3.3 Loi d'Ohm

Dans les milieux conducteurs, la densité de courant est reliée au champ électrique par la loi d'ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.23})$$

Où :

$\sigma (S.m)$: Conductivité électrique

En faisant intervenir le courant de source, cette loi s'exprime par :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (\text{II.24})$$

Où :

\vec{J}_s : Densité de courant de source.

Dans le cas d'un milieu en mouvement :

$$\vec{J} = \sigma \left(\vec{E} + (\vec{v} * \vec{B}) \right) + \vec{J}_s \quad (\text{II.25})$$

Où :

v : Vitesse de déplacement du milieu conducteur.

II.3.4 Equation de continuité

Cette équation exprime le fait que les charges électriques sont conservées. Elle est décrite à partir de l'équation de Maxwell-Ampère. On a :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.26})$$

En appliquant la divergence aux deux membres de l'équation (II.26), on aura :

$$div(\overrightarrow{rot} \vec{H}) = div \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.27})$$

Comme :

$$div(\overrightarrow{rot} \vec{H}) = 0 \quad (\text{II.28})$$

Et :

$$\operatorname{div}\left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) = \operatorname{div}\vec{J}_c + \frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{div}\vec{D}) \quad (\text{II.29})$$

D'après l'équation de Maxwell-Gauss ($\operatorname{div}\vec{D} = \rho$), on aboutit à l'équation de continuité suivante :

$$\operatorname{div}\vec{J}_c + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.30})$$

II.3.5 Relations de passage

La résolution des équations de Maxwell nécessite la connaissance des conditions aux limites et des relations de passage d'un milieu à un autre pour les champs mis en jeu.

- Si les différents matériaux sont présents, la loi intégrale du gauss exige cela :

$$\eta(\epsilon_a E_a - \epsilon_b E_b) = \sigma_s \quad (\text{II.31})$$

Dans l'interface de différents matériaux, σ_s est la densité de charge extérieure et η dénote la composante normale de \vec{E} .

- Une densité de courant extérieur dans une surface S cause une discontinuité de l'intensité de champ magnétique \vec{H} . La loi d'Ampère exige cela :

$$\eta(\vec{H}_a - \vec{H}_b) = K \quad (\text{II.32})$$

Dans l'interface d'une surface. K est la densité de courant extérieur et η dénote de la composante normale de \vec{H} .

- L'état de continuité lié à la conservation de charge est :

$$\eta(\vec{J}_a - \vec{J}_b) + \frac{d\sigma_s}{dt} = 0 \quad (\text{II.33})$$

- L'état de continuité lié à la loi de Faraday est :

$$\eta(\vec{E}_a - \vec{E}_b) = 0 \quad (\text{II.34})$$

- L'état de continuité lié à la loi intégrale de gauss du flux magnétique est :

$$\eta(\vec{B}_a - \vec{B}_b) = 0 \quad (\text{II.35})$$

II.3.6 Passage des champs aux potentiels

Les potentiels électromagnétiques sont introduits lorsque le rotationnel ou la divergence d'un champ électromagnétique est nul [Coulomb 1981]

Etant donné que la divergence de l'induction magnétique B est nulle

$$\text{div}\vec{B}=0 \tag{II.36}$$

Ce qui permet d'introduire un potentiel vecteur magnétique A tel que :

$$\vec{B}=\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \tag{II.37}$$

En électrostatique, le rotationnel du champ électrique nul

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}=0 \tag{II.38}$$

Implique un champ gradient d'un potentiel scalaire électrique V tel que :

$$\vec{E}=-\overrightarrow{\text{grad}}\vec{A} \tag{II.39}$$

II.3.7 Conditions de Jauge

Afin d'assurer l'unicité de la solution en \vec{A} , la condition de jauge doit être satisfaite, on distingue :

- Condition de Jauge de Coulomb, qui est exprimée par : $\text{div}\vec{A}=0$
- Condition de Jauge de Lorentz, qui est exprimée par : $\text{div}\vec{A}=-\sigma.\mu.V$

II.3.8 Formulations électromagnétiques

En général, il y a deux classes des champs électromagnétiques :

- Champs statiques indépendants de temps.
- Champs variables dépendants de temps.

Ils peuvent être les champs scalaires et de vecteur. Un champ scalaire typique par exemple est la distribution potentielle électrostatique $V(x,y,z)$ entre les électrodes chargées et l'intensité de champ magnétique $H(x,y,z)$ entourant un conducteur portant courant est un champ typique de vecteur [13].

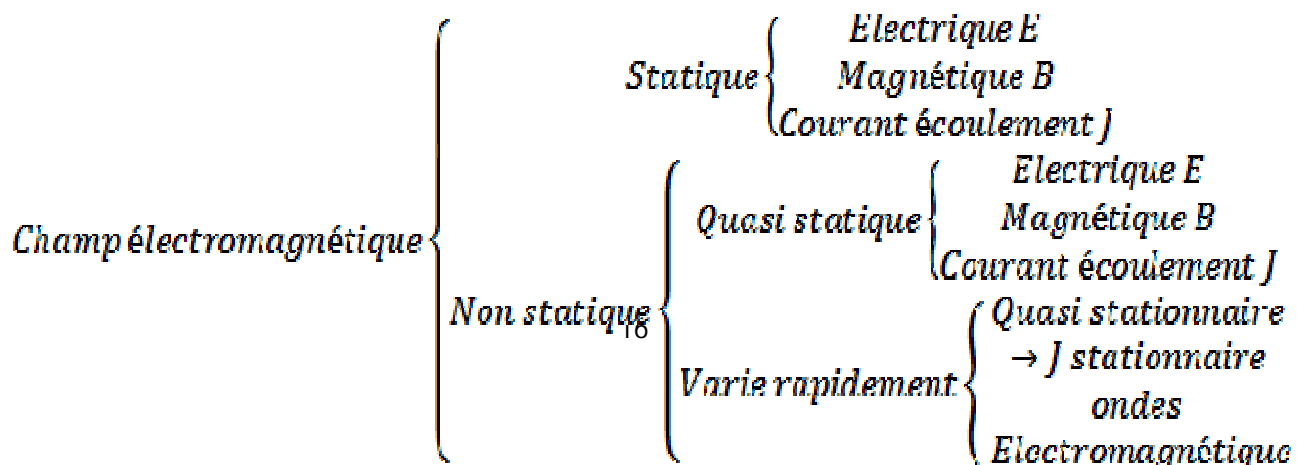


Figure II.1: Différents champs électromagnétiques.

On comprend que les champs qui varient lentement sont des champs ne mènent pas aux redistributions courantes. Ceci signifie qu'il n'y ait aucun effet de courant de Foucault car les dimensions du conducteur portant courant sont plus petites que la profondeur de pénétration du champ. Les courants à ces fréquences sont distribués comme dans le cas de courant continu uniformément au-dessus de la surface entière du conducteur. Des effets de courant de Foucault sont considérés dans les domaines avec la dépendance variable rapide de temps, due au de basse fréquence étant comme quasi stationnaires.

Des champs à haut fréquence comme concentrés sur les problèmes d'antennes menées aux ondes électromagnétique qui ne sont pas considéré dans notre domaine.

Décidant si le courant de déplacement peut être négligé ou pas, dépend de la longueur d'onde du problème considéré dans le domaine de fréquence. S'il est grand comparant aux dimensions physiques de problème L , le courant de déplacement est négligeable [13].

II.3.8.1 Formulation magnétostatique

Les lois fondamentales des champs magnétostatique sont la loi d'Ampère et la loi de la conservation du flux magnétique :

$$\overrightarrow{rot}\vec{H}=\vec{J} \quad (II.40)$$

$$div\vec{B}=0 \quad (II.41)$$

$$\vec{B}=\mu\vec{H} \quad (II.42)$$

Etant donné que la divergence de B est nulle, On peut introduire un potentiel vecteur magnétique

$$\left(\vec{A}\right) \text{ tel que : } \vec{B}=\overrightarrow{rot}\vec{A} \quad (II.43)$$

En introduisant l'équation (II.42) et (II.43) dans (II.40) on obtient :

$$\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\vec{A}\right)=\mu\vec{J} \quad (II.44)$$

En appliquant l'identité de vecteur :

$$\overrightarrow{rot}\left(\overrightarrow{rot}\vec{A}\right)=\overrightarrow{grad}(div\vec{A})-\nabla^2\vec{A} \quad (II.45)$$

La condition de Jauge de Coulomb permet de poser :

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.46})$$

Donc : $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = -\nabla^2 \vec{A}$ (II.47)

De (II.47) et (II.44), on aura :

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (\text{II.48})$$

Sachant que : $\vec{J} = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$

Avec : $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0$

D'où : $\vec{J} = \vec{J}_s$

Donc l'équation (II.48) est donnée par :

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}_s \quad (\text{II.49})$$

C'est l'équation magnétostatique en termes de potentiel vecteur magnétique avec terme source.

• **En coordonnées cylindriques**

Dans le plan [r,z],

On a : $\vec{A} = (0, A_\varphi, 0)$, $\vec{J}_s = (0, J_{s\varphi}, 0)$

$$\nabla^2 \vec{A} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial z} \right] \quad (\text{II.50})$$

En remplaçant (II.50) dans (II.49), on aura :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial z} \right] = -\mu J_{s\varphi} \quad (\text{II.51})$$

• **En coordonnées cartésiennes**

Dans le plan [x,y],

On a : $\vec{A} = (0, 0, A_z)$, $\vec{J}_s = (0, 0, J_{sz})$

$$\nabla^2 \vec{A} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial A_z}{\partial y} \right] \quad (\text{II.52})$$

En remplaçant (II.52) dans (II.49), on aura :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial A_z}{\partial y} \right] = -\mu \cdot J_{sp} \quad (\text{II.53})$$

II.3.9 Condition aux limites

Les conditions aux limites associées sont :

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

$$A = g_0 \quad (\text{II.54})$$

Avec : A : Fonction inconnu de problème.

g_0 : Constante.

- **Condition de Dirichlet**

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnu sur la limite du domaine étudiée.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = g_0 \quad (\text{II.55})$$

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

- **Condition mixte Dirichlet-Neumann**

C'est la combinaison de deux types de condition aux limites, elle s'exprime par :

$$aA + b \frac{\partial A}{\partial n} = g \quad (\text{II.56})$$

Où : a et b : constantes définies sur le domaine d'étude ;
g : la valeur de l'inconnu sur la frontière ;

- **Condition de périodicité**

Elles sont dites cycliques et anti cyclique.

$$A|_{\Gamma} = K.A|_{\Gamma} + d\Gamma \quad (\text{II.57})$$

Avec :

$d\Gamma$: Période spatial (suivant le contour Γ)

$K=1$: Cyclique.

$K=-1$: Anticyclique.

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

II.4 Discrétisation et approximation

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 forme des éléments est directement liée à la dimension du problème pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres [11].

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. [11]

$$A^e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i^e A_i^e \quad (\text{II.58})$$

Les α_i sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$\alpha_i^e(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés [10,11].

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

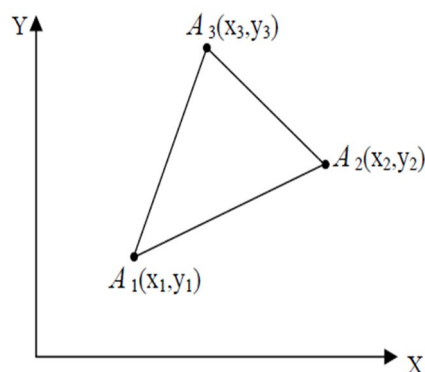


Figure II.2. Élément triangulaire

$$\alpha_1 = \frac{1}{2.\Delta} [(x_2.y_3 - x_3.y_2) + (y_2 - y_3).x + (x_3 - x_2).y]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2.\Delta} [(x_3.y_1 - x_1.y_3) + (y_3 - y_1).x + (x_1 - x_3).y]$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2.\Delta} [(x_1.y_2 - x_2.y_1) + (y_1 - y_2).x + (x_2 - x_1).y]$$

Où : Δ est l'aire de l'élément.

$$2.\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1.y_2 - x_2.y_1) + (x_3.y_1 - x_1.y_3) + (x_2.y_3 - x_3.y_2)$$

D'où :

$$\Delta = [(x_1.y_2 - x_2.y_1) + (x_3.y_1 - x_1.y_3) + (x_2.y_3 - x_3.y_2)] / 2$$

$$= \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$$

II.5 Formulation éléments finis

Comme nous l'avons précédemment évoquée, la méthode des éléments finis à pour but de remplacer un problème mathématique définis dans un milieu continu et sous forme d'équations différentielles ou intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.

La figure II.2 permet de distinguer un certain nombre de méthodes (résidus pondérés ou méthodes variationnelle) utilisées afin d'obtenir la forme intégrale du problème mathématique initial. Un système physique peut être formulé de façon équivalente par une formulation variationnelle ou par un système d'équations différentielles .La transformation puis la discrétisation de cette forme intégrale conduit à une équation matricielle qui sera résolue numériquement[13] .

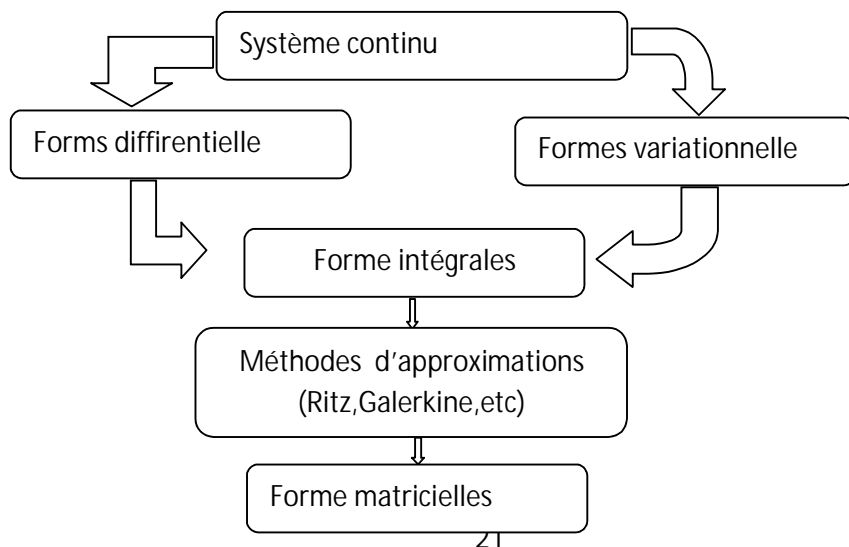


Figure. II.3 : Méthodes d'approximations

II.5.1 Formulation intégrale

Une des originalités de la méthode des éléments finis réside dans le fait qu'elle est basée sur une formulation intégrale du phénomène analyse plutôt que sur la forme différentielle que représente l'équation aux dérivées partielles et les conditions aux limites [11].

Deux types de formulations existent ;

- la formulation variationnelle dont l'utilisation exige la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système .la minimum de la fonctionnelle correspond a la solution de l'équation aux dérivées partielles sous les conditions aux limites .la recherche fonctionnelle est une tache très difficile dans certain cas surtout pour les problèmes les moins étudiés [11].

Dans le cas des phénomènes magnétostatiques, la fonctionnelle d'énergie est donnée par [11] :

$$\mathfrak{S} = \iint_{\Omega} \left(\int_0^B v B dB \right) d\Omega - \iint_{\Omega} J A d\Omega \quad (\text{II-60})$$

- La formulation résidus pondérés est établie directement à partir de l'équation physique à résoudre contrairement à la méthode variationnelle ; ceci est l'avantage principale de cette méthode qui est comparativement plus simple et plus facile à comprendre et à appliquer [11]

Soit le résidu : $R(A) = L(A) - Fv$

Ou R : le résidu de l'approximation ;

$L(A)$: l'opérateur différentiel ;

Fv : fonction défini sur le domaine d'étude Ω ;

A : l'inconnu ;

La méthode des résidus pondérés consiste à recherche la fonction (A) qui annulent la forme intégrale pour toutes fonctions de pondération de tout le domaine d'étude (Ω).

$$\iint_{\Omega} \Psi.R(A)d\Omega = 0 \tag{II-61}$$

Avec :

Ψ : Fonction de pondération ou de projection ;

Dans le cas de l'équation (II-53), l'intégrale devient :

$$\iint_{\Omega} \Psi \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J \right\} = 0 \tag{II-62}$$

Après un intégration par partie et l'application des propriétés intégrales, on peut transformer l'équation (II-62) en :

$$\iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Gamma} v \frac{\partial A}{\partial n} \Psi d\Gamma = \iint_{\Omega} J.\Psi d\Omega \tag{II-63}$$

En tenant compte des conditions aux limites de type Neumann ou Dirichlet sur la surface le terme :

$\int_{\Gamma} v \frac{\partial A}{\partial n} \Psi d\Gamma$ s'annule, ou obtient donc :

$$\iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) d\Omega = \iint_{\Omega} J.\Psi d\Omega \tag{II-64}$$

La méthode des résidus pondérés diffère selon le choix des fonction de pondération, parmi ces méthodes : la méthode de Galerkin qui consiste à choisir comme fonction de pondération Ψ , la fonction d'interpolation α l'application de cette méthode à l'équation (II-64)

$$W = \iint_{\Omega} \left\{ v \frac{\partial a_i}{\partial x} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial a_k}{\partial x} A_k + v \frac{\partial a_i}{\partial y} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial a_k}{\partial y} A_k \right\} = a_i \iint_{\Omega} J.\Psi d\Omega \tag{II-65}$$

L'intégrale sur un élément donne l'expression suivant (sous forme matricielle) :

$$(A) = [] . [] - [] + [] \tag{II-66}$$

Ou [] : est une matrice carré (3*3) dont le terme général est donnée par :

$$S_{ij}^e = \iint_{\Omega_e} v \nabla \bar{a}_i \nabla \bar{a}_j d\Omega_e \quad (\text{II-67})$$

[] : Est la matrice source (vecteur sollicitation), c'est une matrice colonne de dimension 3 dont le terme générale est donné par :

$$F_i^e = \iint_{\Omega_e} J a_i d\Omega_e \quad (\text{II-68})$$

Et [] : est une matrice carré (3*3) dont le terme général est donné par :

$$F_{ij}^e = \iint_{\Omega_e} J a_i a_j d\Omega_e \quad (\text{II-69})$$

L'assemblage des matrices élémentaires [] conduit à la matrice globale (de rigidité) [S], il en est de même pour les vecteur sollicitations élémentaires pour obtenir un vecteur sollicitation global [F] ainsi que les matrices élémentaires [] pour obtenir à la matrice [T] ; on aboutit donc à la relation matricielle globale suivant :

$$[S][A] + [T] = [F] \quad (\text{II-70})$$

Dans le cas statique, la relation (II-69) se réduit à :

$$[S][A] = [F] \quad (\text{II-71})$$

II.6 Résolution

La résolution du système matriciel (II-70) est l'étape la plus importante de la méthode des éléments fini. La matrice S résultante est dans le cas général une matrice creuse, de grande taille, symétrique, non singulière (admet une matrice inverse), définie positive et à diagonale dominante.

La résolution de ce type de système nécessite un grand espace de stockage en mémoire et un grand temps de résolution. La résolution peut se faire par des méthodes numériques qui prennent deux axes distincts selon que le problème est linéaire ou non.

II.6.1 Résolution linéaire

La résolution du système matriciel (II-70) est linéaire lorsque la matrice S ne dépend pas de A. Dans ce cas, la résolution peut se faire soit par des méthodes directes qui conduisent à la solution en un

nombre fini d'étape (Gauss, Cholesky...), soit par des méthodes itératives qui conduisent à la solution par une succession d'amélioration d'une solution approchée, le nombre d'itérations nécessaires étant difficiles à prévoir, car dépendant de la structure de la matrice (Gardiens, Conjugués) [11].

Beaucoup de programmes actuels utilisent les méthodes directes pour leur précision et leur temps de résolution qui est souvent prévisible [11,14].

De plus, pour ces méthodes, le temps de résolution dépend fortement des coefficients des matrices, de la précision désirée et d'autres facteurs liés à la nature du pré-conditionnement utilisé [11].

II.6.2 Résolution non linéaire

Les non-linéarités peuvent apparaître dans la formulation d'un problème physique lorsque les paramètres physiques supposés constants sont fonction de l'inconnu du problème. Dans le cas des problèmes électromagnétiques non linéaires, la réductivité magnétique varie en fonction du potentiel vecteur magnétique et donc de l'induction magnétique. Dans ce cas, est nécessaire d'approximer la réductivité magnétique non linéaire en utilisant une fonction d'interpolation.

Parmi les méthodes d'interpolation existantes, on peut citer [11] :

- Interpolation de Marocco;
- Interpolation par des splines cubiques ;
- Interpolation hyperbolique;
- Interpolation polynomiale ;

pour la résolution, on doit mettre en place un processus itératif jusqu'à stabilisation. La majorité des méthodes conditionnent à résoudre un système linéaire à chaque itération, parmi ces méthodes on trouve [11] :

- la méthode de substitution ;
- la méthode de Newton Raphson;
- la méthode incrémentale ;

Le choix d'une méthode de résolution directe permet de réduire le cumul d'erreur du à l'itérativité du processus de résolution en non linéaire, ce qui nous conforte dans le choix d'une méthode de résolution directe, à savoir la méthode de Cholesky

II.7 Conclusion

Dans le deuxième chapitre a fait l'objet d'une représentation des principales étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis. Dans le chapitre suivant l'application de cette méthode particulièrement pour les machines à aimants permanents sera présentée.

Introduction

Pour prévoir le comportement et les mécanismes régissant le fonctionnement d'un système physique, une modélisation est nécessaire.

L'objectif de toute démarche est d'affiner le modèle en analysant avec précision les phénomènes électriques et magnétique. On distingue souvent deux méthodes : analytiques et numériques (parfois une troisième méthode consiste à coupler les deux !).[5]

Notre approche consiste à déterminer les paramètres d'un modèle de simulation qui reflète le fonctionnement de la machine. Pour atteindre notre objectif, nous nous proposons d'étudier une machine synchrone à pôles lisse de faible puissance 150VA. Notre machine existe au niveau du laboratoire de machines électrique du département Electrotechnique (UMMTO) et sa construction géométrique a été préalablement étudiée dans un travail antécédent.

Ce chapitre traite de la mise en place d'un modèle magnétostatique en 2D de la machine synchrone à pôles lisses tout en tenant compte des paramètres géométriques de la machine et la nature des matériaux utilisés à l'aide d'un logiciel libre (FEMM).

III.1 Modèle magnétique de la machine

Le fonctionnement des machines électriques est directement lié à la distribution des lignes de champs magnétique au sein de leur structure. La connaissance de cette distribution permet de déterminer les grandeurs nécessaires à leur dimensionnement comme le flux, les inductances, le couple électromagnétique, ...etc.

Avec les méthodes analytiques, la résolution des systèmes électromagnétiques ayant des caractéristiques non linéaires présente des problèmes de calcul, du fait qu'elles ne permettent pas de tenir compte des spécifications géométriques de la machine, ainsi que de la nature de ses matériaux. De nos jours, l'accroissement de possibilités de calcul et l'évolution des méthodes numériques ont permis de prendre compte des phénomènes de plus en plus complexes et de fournir des solutions satisfaisantes pour un grand nombre de problèmes. La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour le calcul du champ magnétique dans les machines électriques.[17]

III.2 PRESENTATION DU LOGICIEL FEMM

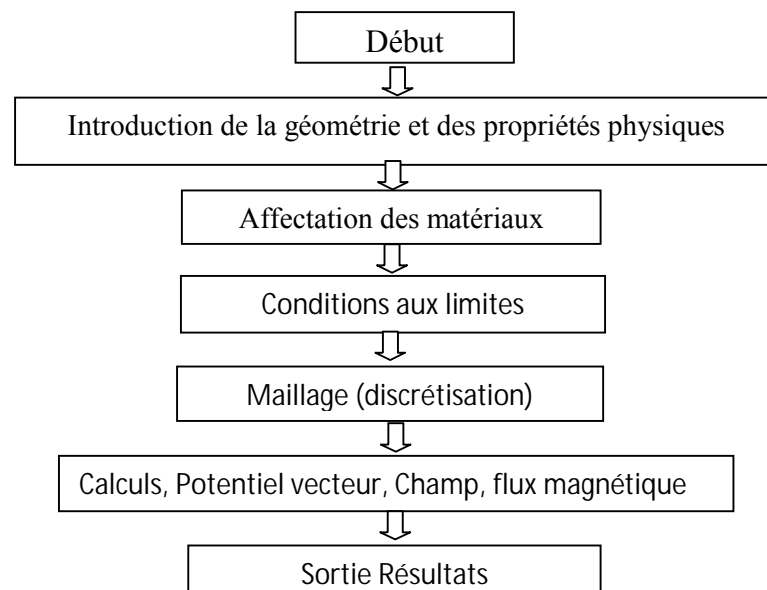
Le logiciel **FEMM** (*Finite Element Method Magnetics*) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme à basse fréquence dans des domaines 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par *David Meeker*, est disponible gratuitement sur *Internet*. [18]

Le logiciel **FEMM** se compose de trois programmes :

- ❖ *femm.exe* : est un post et pré-processeur 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.

Le langage *LUA* est également intégré dans les pré et post-processeurs. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console *LUA* pour commander les étapes de calculs. Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière *automatique* par un programme en *Lua* sans l'intervention manuelle de l'utilisateur.

Ainsi, la résolution par la méthode des éléments finis de l'équation régissant le fonctionnement de notre système *non linéaire* se fera en utilisant un programme de calcul sous environnement **FEMM** (programmation par langage *LUA*). Les différentes étapes de mise en œuvre de ce programme sont résumées dans l'organigramme suivant :



III.3 Présentation de la structure de machine étudiée

III.3.1 Constitution

La machine étudiée est une machine synchrone à pôles lisses. Son diamètre extérieur est de 107mm et sa longueur utile est de 80mm. Elle possède deux paires de pôles. La coupe transversale de la figure II.3 montre les différentes parties de la machine. Celle-ci est constituée de:

- ✓ Un stator cylindrique en tôles magnétiques à 24 encoches, comportant un enroulement triphasé à une seule couche à bobines concentriques. Chaque phase comporte deux bobines montées en série. Le nombre de conducteurs par bobine (estimé) est de 146.
- ✓ Un rotor lisse en matériau en tôles magnétiques à 18 encoches, comportant un enroulement imbriqué dont 2 encoches non bobinées. Le nombre de conducteurs par bobine (estimé) est de 130

III.3.2 Dimensions géométriques et grandeurs nominales

Les principaux paramètres géométriques sont donnés par le tableau suivant :

Tableau(III.1) : Paramètres géométrique de la machine

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	H _{z1}	13
Ouverture de l'encoche statorique	B _{fs}	2
Hauteur de la clavette statorique	H _{ks}	1
Hauteur de la fente statorique	H _{fs}	1
Ouverture de l'encoche rotorique	B _{fr}	2.5

Hauteur de la clavette rotorique	Hkr	2
Hauteur de la dent rotorique	Hz2	13.5
Diamètre extérieur du stator	Dext1	107
Section totale de l'encoche rotorique	Senc2	31 ,27mm ²
Epaisseur de l'entrefer	E	0.52
Diamètre extérieur du rotor	Dext2	61.56
Diamètre intérieur du rotor	Dint2	16
Longueur de la machine	lu	80
Largeur max de l'encoche rotorique	B enc1	4.5
Largeur min de l'encoche rotorique	B enc2	0.7
Angle entre 2 encoches rotorique	θ_{gr}	20°
Angle entre 2 encoches rotorique	θ_{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	40 V
Vitesse nominale	Nn	1500Tr /min

III.3.3 Tracé de la structure sous Lua

La constitution de la géométrie de la machine est réalisée grâce un programme en langage Lua en suivant les étapes suivantes :

-Définir un nouveau document

Newdocument(doctype)

(0)Pour le magnétique

(1)Pour l'électrostatique

(2)Pour l'écoulement de la chaleur

(3)Pour l'écoulement de fluide

mi pour le magnétique

ei pour l'électrostatique

hi pour l'écoulement de la chaleur

ci pour l'écoulement de fluide

- Définir le problème mi_probdef(frequency,units,type,precision,(depth),(minangle),acsolver)

- Ajouter les nœuds mi_addnode(x,y)

-Ajouter les segments mi_addsegment(x1, y1, x2,y2)

- ajouter les arcs mi_addarc (x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)

-sélectionner les arcs et les segments mi_selectarcsegment(x,y)

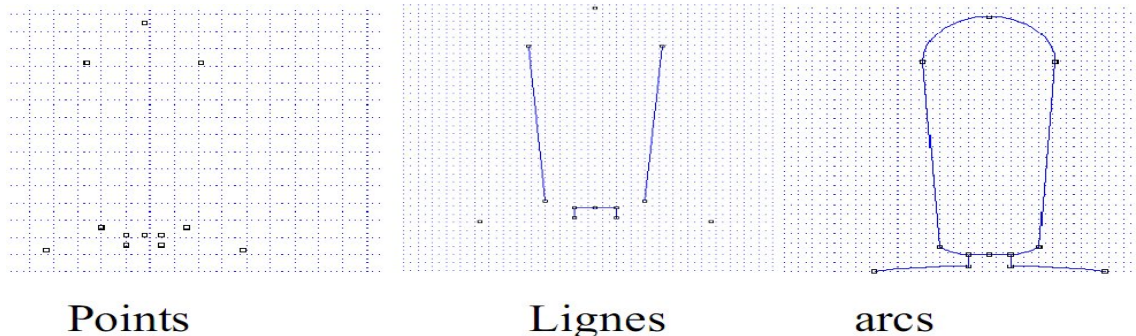


Figure III.1 : Tracé d'une encoche statorique

- sélectionner le groupe

mi_selectgroup(n)

```

-Copier en rotation      mi_copyrotate(bx ,by,angle, copies,(editaction))
-ajouter les matériaux  mi_addmaterial("materialname",mu_x,Hc,J ,Cduct,
                      lam_d,Phi_hmax,lam_fill,Lam_ Type,Phi_hx_Phi_hy )
-ajouter le block       mi_addblocklabel(x,y)
                        mi_selectlabel(x,y)
sélectionner le block   mi_setblockprop("blockame",automesh,meshsize, "incircuit",
                        magdirction, group,turns")
-ajouter un circuit     mi_addcirprop("circuitname", i, circuittype)
                        mi_selectlabel(x,y)
-Fixer les conditions aux limites  mi_addcirprop("propname",A0,A1,A2,Phi,Mu,Sig,c0,c1,Bdry
                        Format)
                        mi_selectarcsegment(x,y)
                        mi_setarcsegmentprop(maxsegdeg, "propname",hide,group)
-sauvegarder, mailer, analyser et afficher  mi_zoomnatural()
                                                mi_saveas("name.fem")
                                                mi_createmesh()
                                                mianalyze()
                                                mi_loadsolution()

```

- Pour le mouvement

```

open("name.fem")
tet=
pas=
for i=1,n do
tet=tet+pas
mailer,analyser
mi_selectgroup(n)
mi_selectgroup(n)
mi_moverotate(x,y,pas)
mo_seteditmode("mode")
mi_clearselected( )
mi_saveas("temp.fem")
end

```

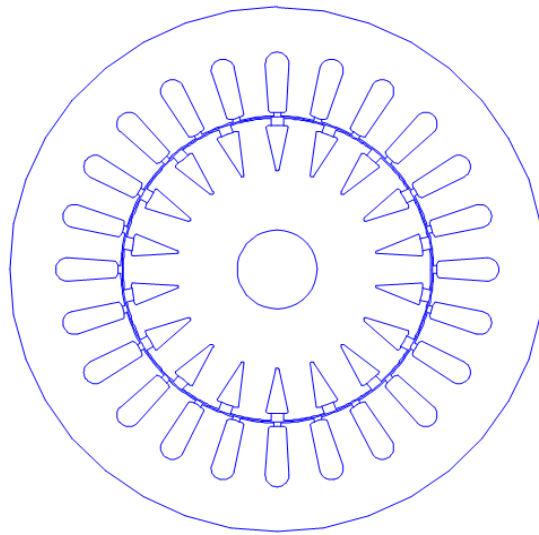


Figure III.2 : Vue d'une coupe de la machine

III.4 Maillage de la machine

Le maillage consiste à découper un domaine complexe en sous domaines simples (éléments). L'instruction « mesh » du logiciel FEMM permet de lancer automatiquement le maillage. Le maillage de la structure est une opération délicate ; en effet, la finesse du maillage conditionne la précision des résultats évoluant du plus fin vers le plus grossier et de l'intérieur vers l'extérieur de la structure. La figure (II.10) présente le maillage de la machine.

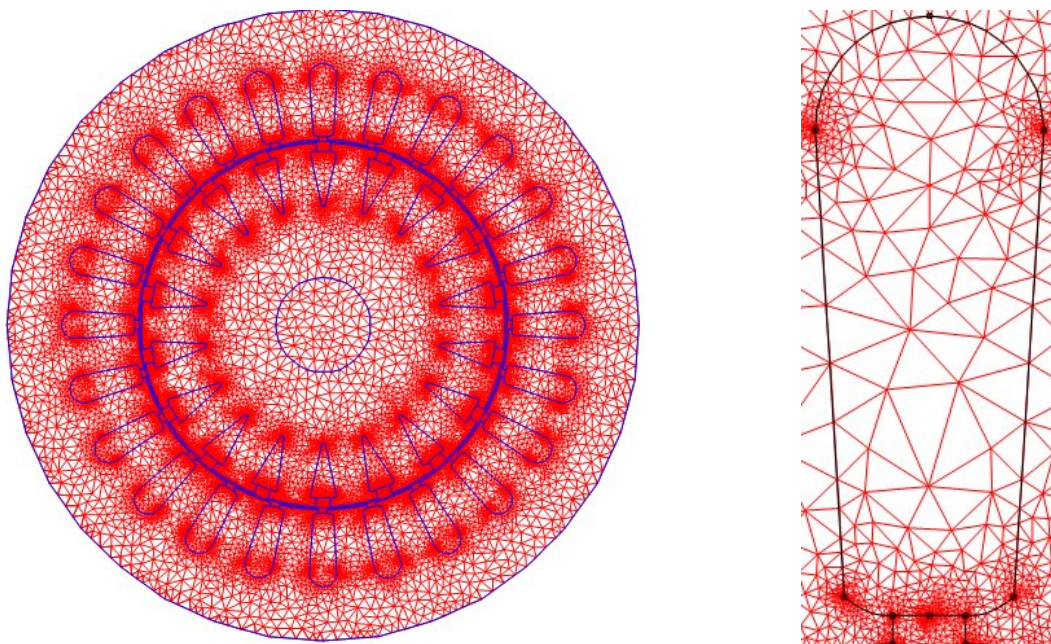


Figure III.3 : Maillage de la structure étudié

III.5 Tracé des équipotentiels

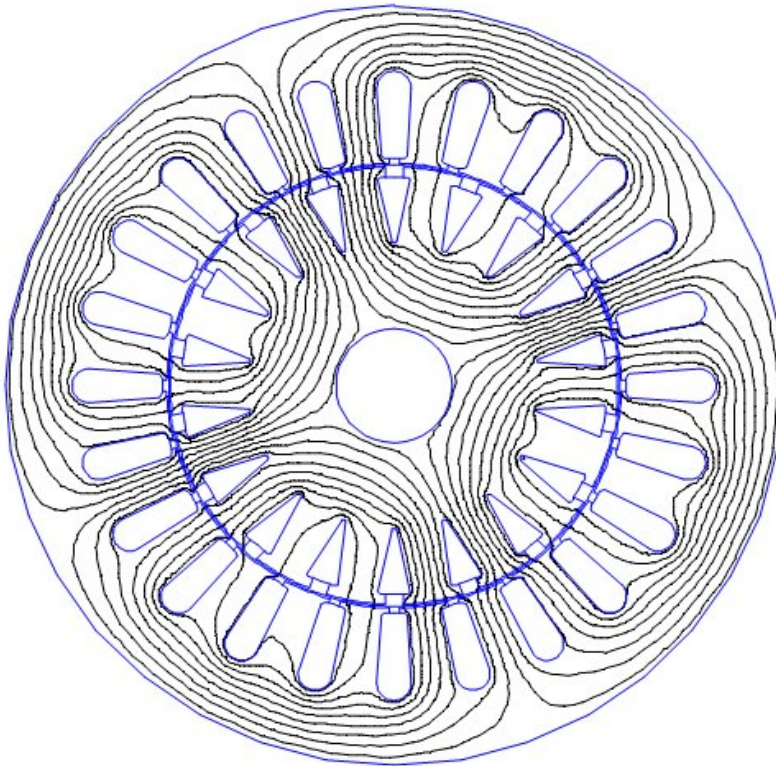


Figure III.4: Distribution des lignes de champ magnétique

III.6 densités des flux magnétiques

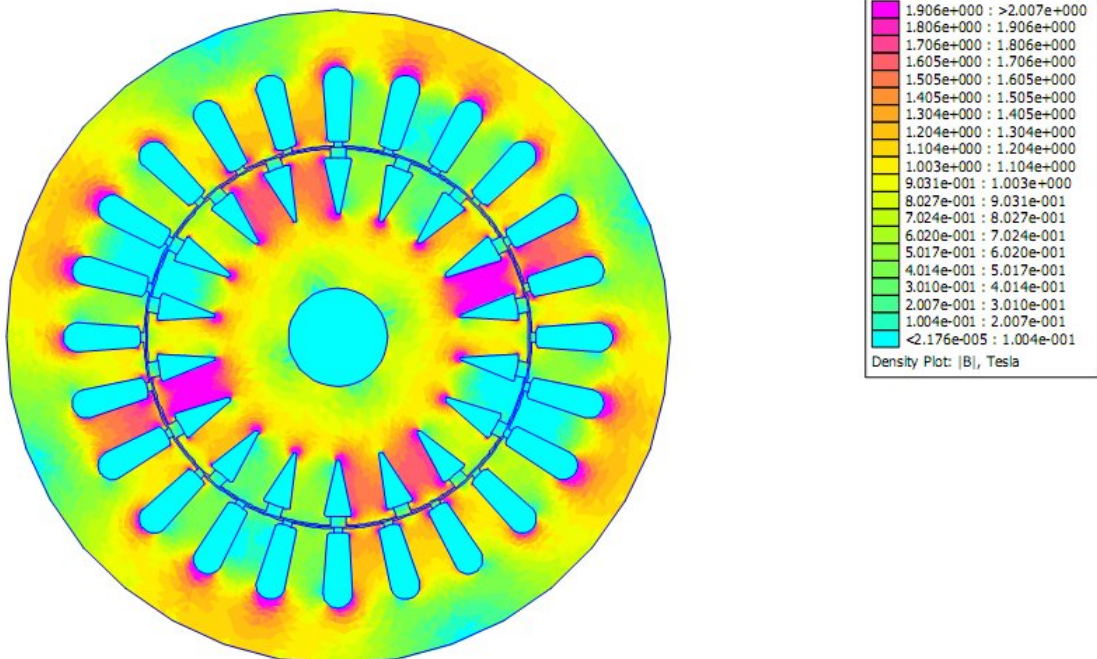


Figure III.5 : cartographie du champ magnétique à vide

III.7 Induction magnétique le long de l'entrefer

Nous relevons la variation des composantes radiales et tangentielles de l'induction magnétique pour un rayon de 31mm (entrefer).

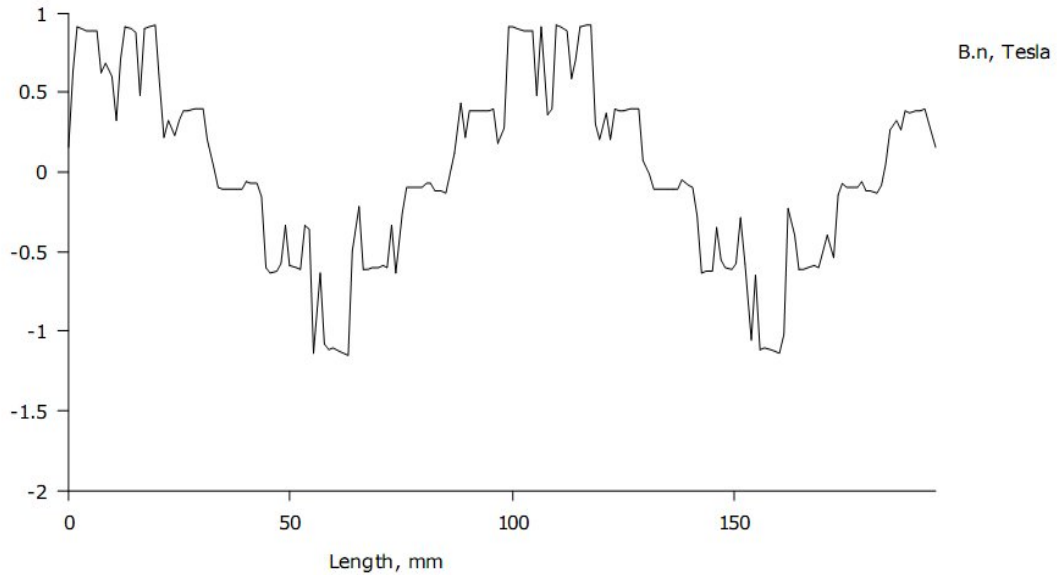


Figure III.6 : Composante normale de l'induction dans l'entrefer

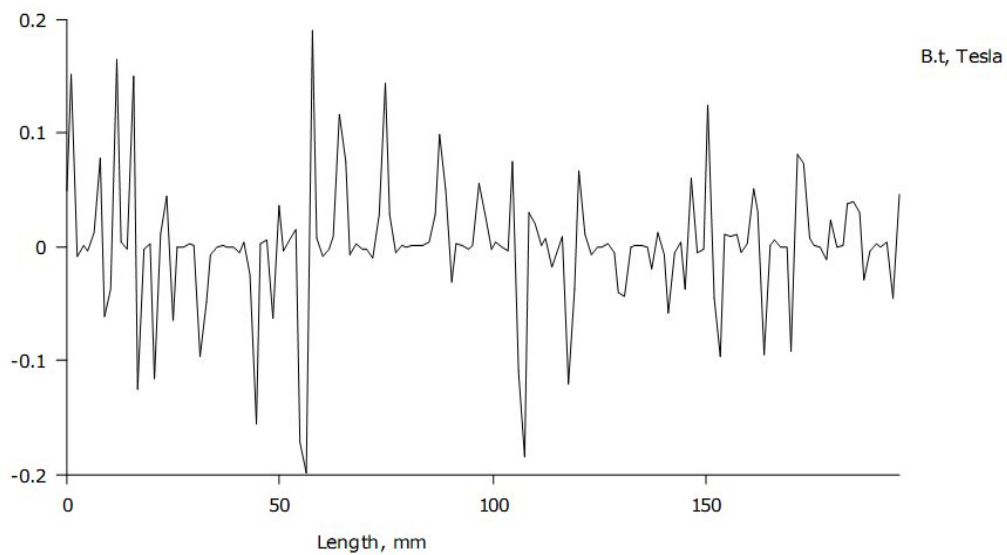


Figure III.7 : composante tangentielle de l'induction dans l'entrefer

III.8 Energie magnétique emmagasinée

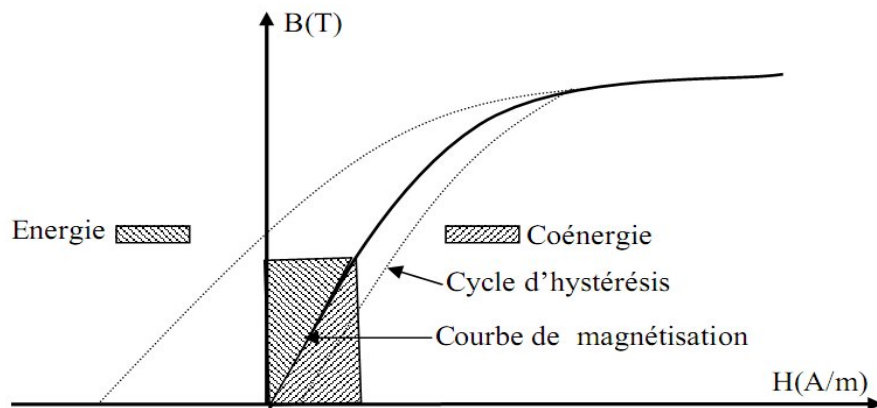


Figure III.8 : Courbe de magnétisation B(H)

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 III.8 devient :

$$W_e = \sum_{n=1}^{N_e} E a_n \int_0^{B_n} H(B_n) dB \quad (\text{III.2})$$

L'intégrale de l'expression III.12 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'aire 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 :

$$W_c = \sum_{n=1}^{N_e} E a_n \left(\frac{B_n^2}{\mu_0 \mu_n} - \int_0^{B_n} H(B_n) dB_n \right) \quad (\text{III.4})$$

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.9 Application du modèle à 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.[17]

Le maillage effectué sur la machine comporte 75053 Nœuds et 149908 Eléments.

III.9.1 Force électromotrice de la machine

Pour calculer la fem de la machine on fait appel aux solutions de champ magnétique créés 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 θ_i et $\theta_i + \theta$ avec un angle de rotation égal à 1° mec. Vu la symétrie de la machine ce flux est cyclique, on se limitera donc à une rotation de 180° mec.

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 calcule par la combinaison des équations de Maxwell et de Stokes, qui donne l'expression:

$$\Phi_s = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_s \text{rot} \vec{A} \cdot d\vec{S} = \oint_c \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (\text{III.5})$$

D'après cette équation l'intégrale de potentiel vecteur \vec{A} est égale au flux ϕ_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 III.9 :

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

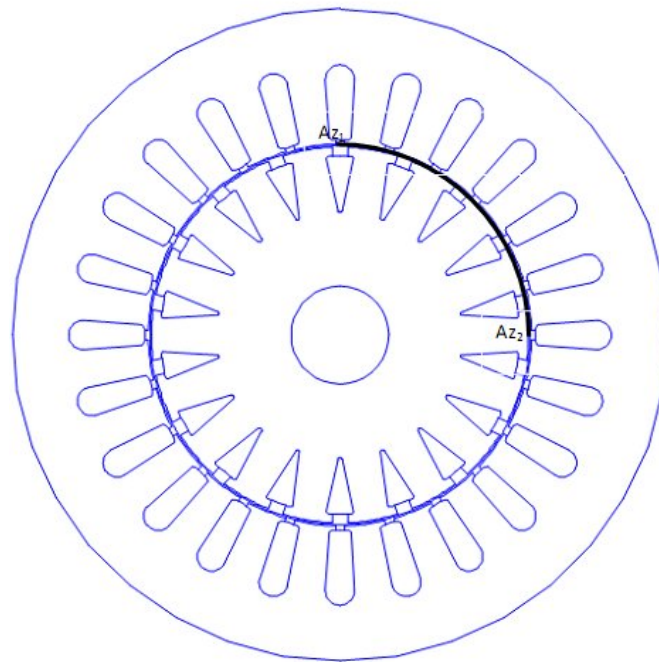


Figure III.9: Intégrale de potentiel vecteur \vec{A} le long de contour C

III.9.2 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 position du rotor.

Sachant que le nombre de spire par bobine et le nombre de bobine par phase sont connues, on déduit par une différence numérique l'allure de la fem à vide en fonction de la position de rotor.

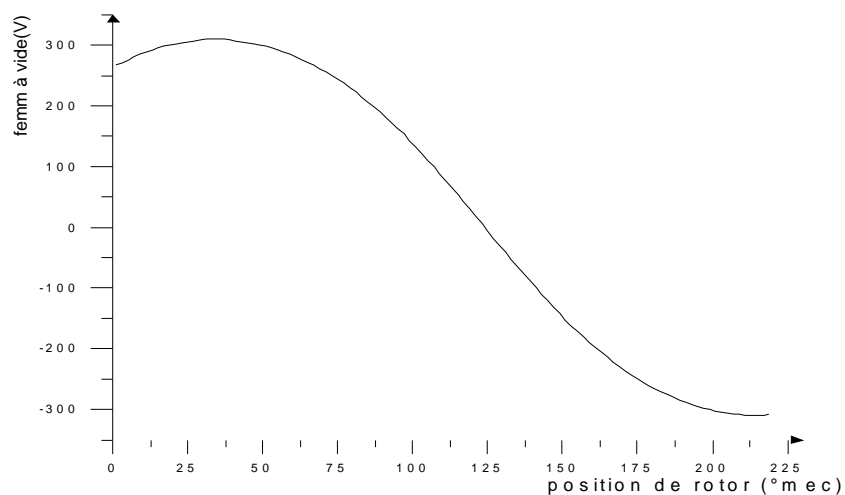


Figure 10 : Courbe de la fem à vide

Nous constatons que la courbe de la fem a une forme sinusoïdale d'amplitude 309 V qui correspond à une valeur efficace 218 V.

III.9.3 calcul des couples électromagnétiques de la machine :

Le calcul de des couples électromagnétiques peut être effectué à l'aide de la méthode du tenseur de Maxwell.

III.9.3.1 Méthode du tenseur de Maxwell

Cette méthode permet de calculer directement la force ou le couple à partir de la distribution du champ électromagnétique. Dans le cas d'un système à deux dimensions, la force et le couple sont évalués par intégration du tenseur de Maxwell (densité de force) sur un contour qui délimite la partie mobile. Pour une distribution de l'induction magnétique B connue et un contour l englobant la partie mobile, les expressions de la force F et du couple C agissant sur cette partie sont :[19]

$$F = \int_c \left[\frac{1}{\mu_0} B(B \cdot n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \cdot n \right] dl \quad (III.7)$$

$$C = r * F \quad (III.8)$$

Avec

r : le vecteur dont l'origine coïncide avec le point d'action du couple.

n : le vecteur unitaire normal au contour spécifié.

III.9.3.2 Allure de la courbe de couple de denture

Le couple de dentures représente l'attraction des dents statorique par le champ rotorique. La variation de l'épaisseur d'entrefer induite par les dentures provoque un couple parasite dit aussi couple de détente ou couple de denture.

Le couple de denture est déterminé par la méthode du tenseur de Maxwell, l'allure de ce couple en fonction de la position de rotor est alternative de période 30° mec qui correspond à un pas d'encoche et d'amplitude de 0.37Nm (environ 37%de couple nominal de la machine) il est représenté par la figure (III.11).

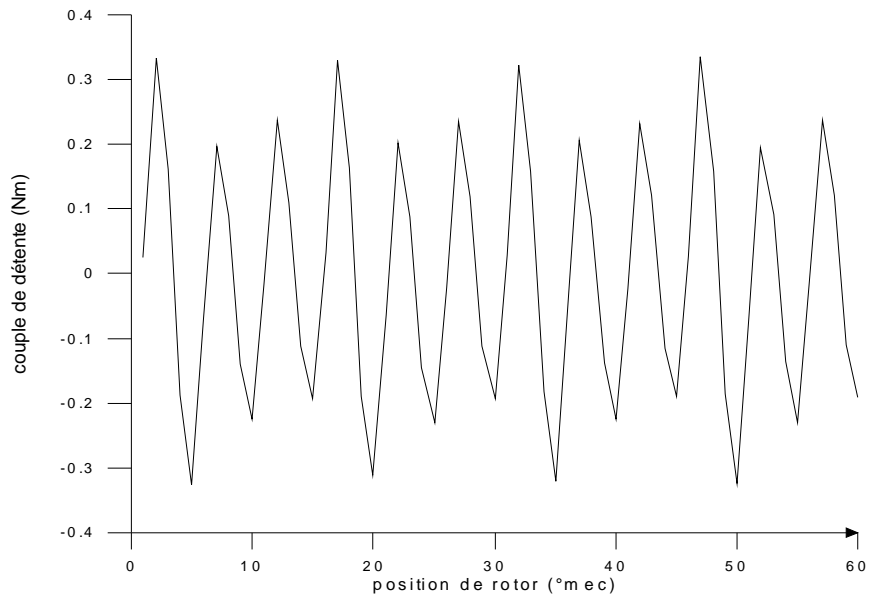


Figure III.11 : Variation de couple de denture

III.9.3.3 Allure de couple statique

Le couple statique de la machine est obtenu en alimentant le rotor et le stator et en faisant tourner le rotor. L'interaction entre les champs créés par les enroulements statoriques et rotoriques est à l'origine de ce couple. L'allure de ce couple est donnée par la figure III.12

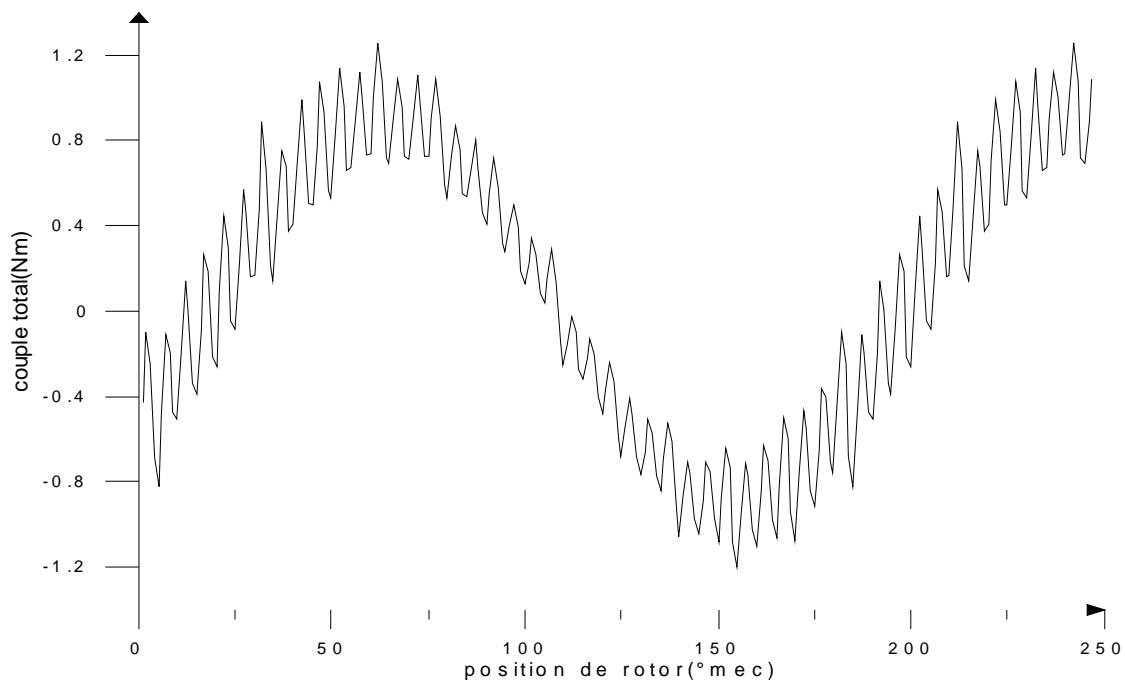


Figure III.12 : Variation de couple total de la machine

Le couple ainsi obtenu est la composition du couple de denture et du couple statique. Le couple statique (ou d'interaction) est obtenu par déduction du couple de denture du couple total obtenu en fig. III.12. Le couple statique est représenté en fig. III.13

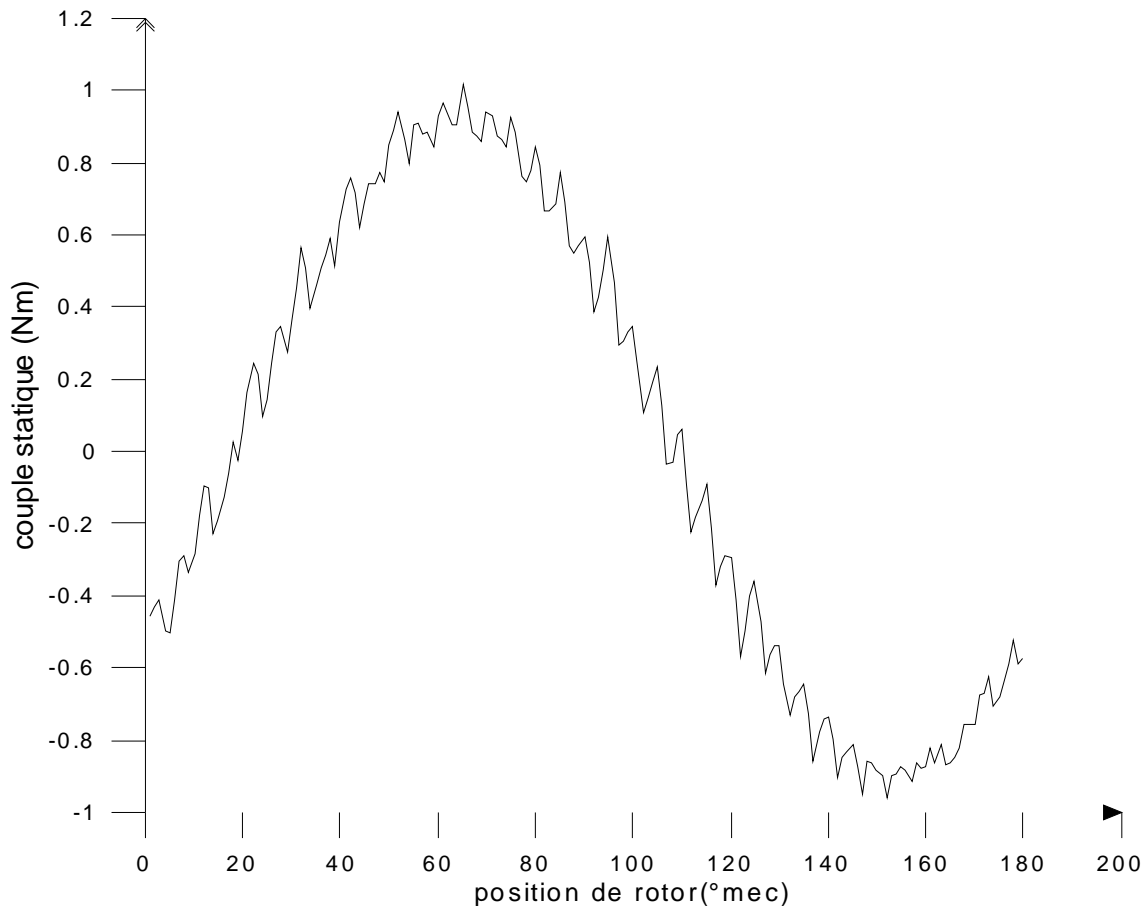


Figure III.13 : Variation de couple statique

La valeur maximale de couple statique développé par la machine est d'environ 1 Nm pour une position du rotor de 65°mec. Cela correspond approximativement à la puissance nominale de la machine.

III.9.4 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 [18]:

- ◆ La méthode basée sur le flux du champ magnétique embrassé par le bobinage
- ◆ La méthode basée sur l'énergie emmagasinée à travers le champ 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.[17]

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

III.9.4.1 Méthode de l'énergie magnétique emmagasinée

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

❖ Inductance propre d'une phase

On alimente une seule phase statorique par un courant I, on calcul le champ magnétique qu'elle crée et on évalue ainsi l'énergie magnétique emmagasinée W_{es} .

Sachant que
$$W_{es} = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (\text{III.9})$$

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

$$L = 2 \cdot \frac{W_{es}}{I^2} \quad (\text{III.10})$$

❖ Inductance mutuelle entre deux phases

Dans ce cas, deux solutions du champ magnétique crée uniquement par les courants dans les phases statoriques sont nécessaires. Celle où seule la phase (a) est parcourue par le courant I_a , et celle où les deux phases (a) et (b) sont alimentées respectivement par les courants I_a et I_b . Ainsi, les énergies du champ magnétique W_{es1} et W_{es2} correspondant aux deux solutions du champ sont évaluées.[17]

Où :
$$W_{es1} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2] \quad (\text{III.11})$$

Avec :
$$W_{es2} = \frac{1}{2} [L_{aa} \cdot I_a^2 + M_{ab} \cdot I_a \cdot I_b + M_{ba} \cdot I_b \cdot I_a + L_{bb} \cdot I_b^2] \quad (\text{III.12})$$

L_{aa} et L_{bb} : inductances propres des deux phases (a) et (b)

M_{ab} et M_{ba} : inductances mutuelles entre les deux phases (a) et (b)

Sachant que les deux enroulements des deux phases sont identiques et qu'ils sont parcourus par le même courant I , alors :

$$M_{ab} = M_{ba} = M, L_{aa} = L_{bb} = L \text{ et } I_a = I_b = I$$

En remplaçant (III.12) dans (II.13), on peut écrire :

$$W_{es2} = 2.W_{es1} + 2.M.I^2 \quad (\text{III.13})$$

L'expression de mutuelle M peut s'exprimer comme suit :

$$M = \frac{W_{es2} - W_{es1}}{2.I^2} \quad (\text{III.14})$$

III.9.4.2 Lignes de champ magnétique créée par les phases statoriques

On absence de courant rotorique d'excitation on a alimenté uniquement une seule phase puis deux phases simultanément. la distribution des ligne de champs pour les deux essais sont donnés par les figures [12 ,13] respectivement.

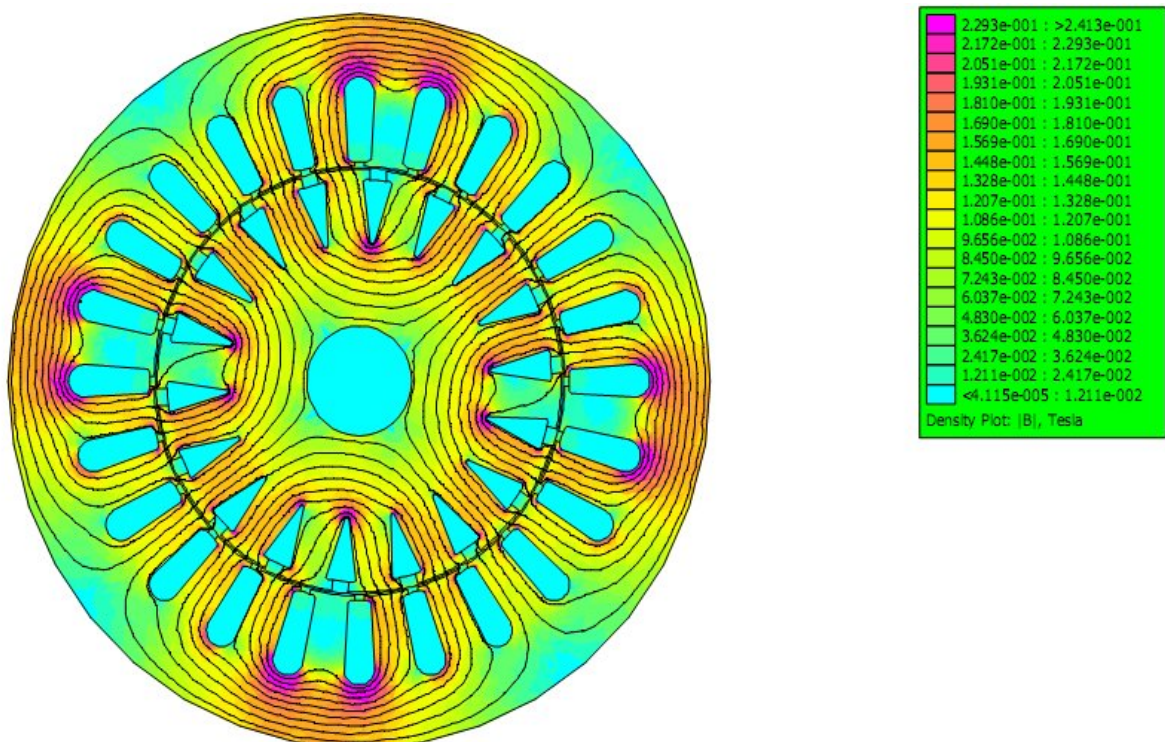


Figure III.13 : Lignes de champ créées par une seule phase statorique pour une position de rotor 7.5° mec

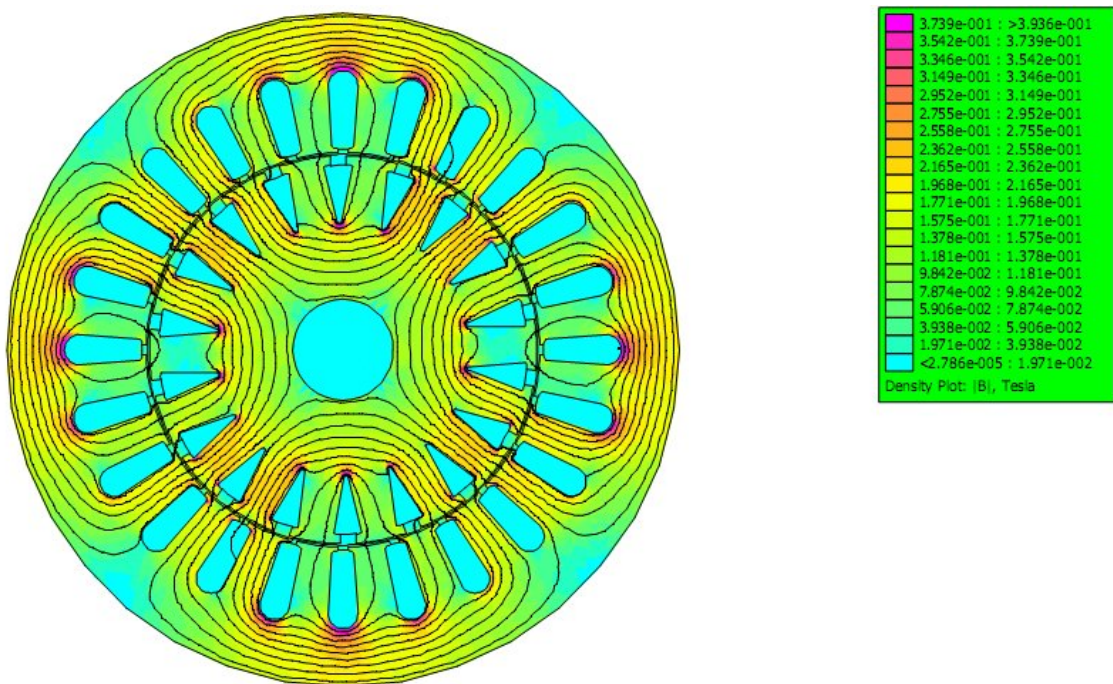


Figure14: Lignes de champ crée par deux phases statoriques pour une position de rotor de 15° mec

III.9.4.3 La forme des courbes des inductances de la machine

Les figures [III.14, III.15] présentent respectivement les allures de l'inductance propre d'une phase et l'inductance mutuelle entre deux phases avec la méthode décrite précédemment

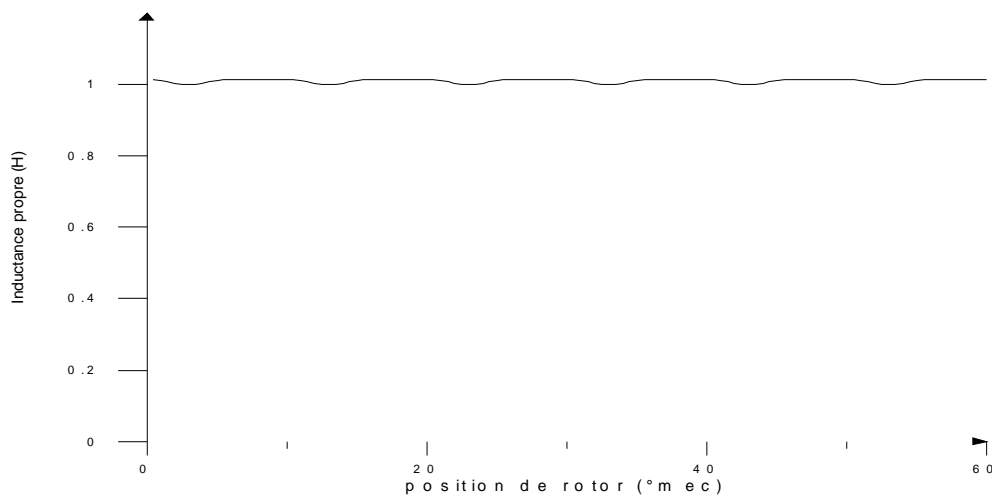


Figure III.15 : Inductance propre d'une phase

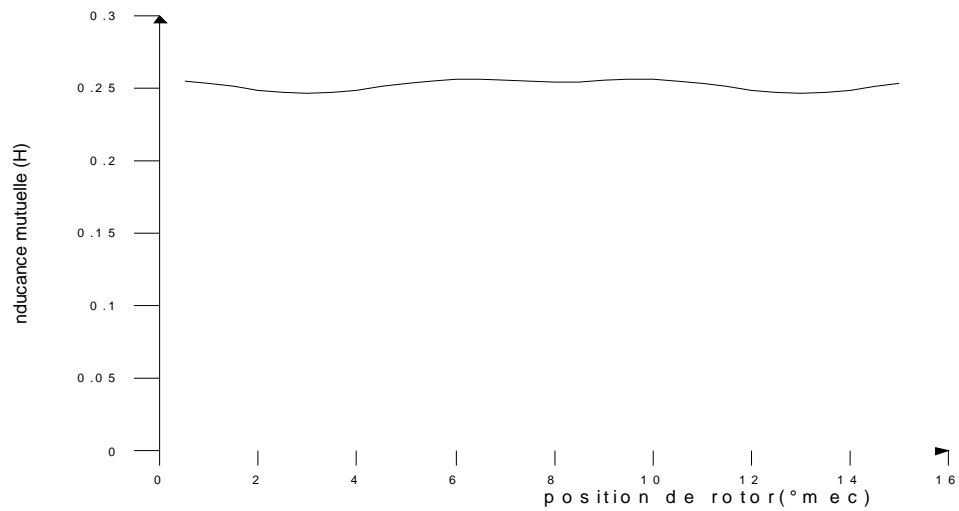


Figure III.16 : Inductance mutuelle entre deux phases

On constate que les inductances de la machine sont presque constantes. L'inductance moyenne d'une phase $L_{a0}=1.009$ H et l'inductance mutuelle moyenne $M_{ab0}=0.2526$ H. Cependant pour calculer l'inductance directe L_d et l'inductance en quadrature L_q on a recours aux relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_d = L_{a0} - M_{ab0} \\ L_q = L_{a0} - M_{ab0} \end{array} \right. \quad \text{(III.15)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_d = L_{a0} - M_{ab0} \\ L_q = L_{a0} - M_{ab0} \end{array} \right. \quad \text{(III.16)}$$

Avec :

L_{a0} : Valeur moyenne de l'inductance L

M_{ab0} : Valeur moyenne de la mutuelle M

Donc :
$$L_d = L_q = L_{a0} - M_{ab0} \quad \text{(III.17)}$$

Application numérique : $L_d = L_q = 1.009 - 0.2526 = 0.75$ H

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 le FEMM en se servons de logiciel LUA pour la programmation de la machine.

Dans ce chapitre nous avons utilisé FEMM pour voir les caractéristiques de notre modèle C'est grâce à ce logiciel que nous avons déterminé les solutions de champ magnétique ce que nous a permet de calculer et de visualiser les courbes de la fem à vide, le couple de denture et le couple statique, ainsi que les inductances propre et mutuelles de notre machine.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire, est de déterminer les paramètres électromagnétiques d'une machine synchrone à pôles lisses 150 VA à travers l'élaboration d'un programme LUA dans le but de modéliser et de reprendre la géométrie de notre machine. Pour la mise en œuvre de ce programme nous avons utilisé le logiciel FEMM qui est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis. Cela nous a permis de nous familiariser avec le logiciel FEMM et de nous initier à la programmation sous LUA.

Dans ce travail, nous avons calculé la force électromotrice (fem) de la machine et nous avons tracé la courbe de cette fem tout apportant quelques modifications sur sa structure (épaisseur de l'entrefer, nombre de conducteur par encoche statorique) afin de se rapprocher des valeurs réelle de la fem (les valeurs de départ sont estimées et non exacte).

Nous avons estimé les valeurs de couple de denture (couple de détente) et de couple statique en exploitant la méthode du tenseur de Maxwell. Les valeurs élevées de couple de denture peuvent être à l'origine des comportements vibratoires et sonores de la machine. Quand au couple statique, nous avons pu estimer les valeurs pour lesquelles notre machine peut être fonctionnelle.

Étant donné, que l'objectif principal de ce travail est de déterminer les paramètres inductifs de la machine voir les inductances propres et mutuelles des enroulements ; le calcul de celle-ci a été effectuées par la méthode de l'énergie magnétique emmagasinée à travers son circuit magnétique. Les inductances propres et mutuelles sont presque constantes, elles varient légèrement en fonction de la position du rotor, cela est du à la saturation des dents statoriques. Les résultats obtenus coïncident avec ceux des études précédentes

Pour conclure nous espérons que notre travail sera un apport pour les futurs étudiants qui se pencheront sur l'étude et la détermination des paramètres inductifs de la machine synchrone à pôles lisses.

Bibliographie

- [1] Philippe barret : « régime transitoire dans les machines tournantes électriques » édition eyrolles,1981.
- [2] André genon,willy le gros :« Machine électrique ». Edition hemes science Europe,2000.
- [3] J.LESENNE, F.NOTEL, G.SEGEUR : « introduction à l'électrotechnique approfondie».Edition technique et documentation, paris 1981 .
- [4] : N :BERNARD : « machine synchrone » ; revue 3EI,n°30,septembre 2002, pp.24-39.
- [5] :I.BOUCHE : « modélisation et simulation de défauts d'une machine synchrone à réluctance variable ».Mémoire de Magister en Electrotechnique université de Constantine 2009.
- [6] : M.KOSTENKO et L.PIOTROVESKI « machines électriques »Edition MIR.MOSCOU 1979.
- [7] : M.TANTAR ;A.SABER ;H.TEHAMI : « identification des paramètres d'un machine synchrone à inducteur bobiné »,UMMTO ,promo1999.
- [8] : M.Rachek : « modélisation par éléments finis de Systems électromagnétiques en mouvement de structure tridimensionnelles: application au couplage magnétique- mécanique et au contrôle non destructif par courante Foucault » thèse de doctorat, UMMTO,2007.
- [9] :P.Silvester, M.V.K.Chri «finite element solution of saturable magnetic field problems»,IEEE Transactions on power apparatus and systems,vol.PAS-89,N°7,Sep/Oct1970
- [10] : M.N.O. Saduki « simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems»,IEEE Transactions on education ,vol.32,No.2,May1989
- [11] : SARAOUI RACHIDA, « Etude d'une machine synchrone avec la méthode des éléments finis », Mémoire de magister, UMMTO ,2010.
- [12] :Y. BOUTOURA,R.ibtiouen,Takorabet,S.Mewani, «Bandwidth and profile minimization of sparse matrices of triangulare meshes of cylindrical geometries »,EMF2006 , Aussois ,21-23 Juin,france.
- [13] : DELCI Boualem,Bounoua Yacine,Ait yala bilbel : « Détermination des paramètres inductifs par voies numérique et expérimentale d'une machine synchrone à poles lisses 159VA » mémoire d'ingénieur d'état,UMMTO ,2012.
- [14] : Y.Boutoura, N. Takorabet , R. ibtiouen,and S.Mezani, «A new method for minimizing the bandwidth and profile of square matrices for triangular finite element mesh « ,IEEE Trans.On Magnetic.vol,43,No.4,April2007, pp.1513-1516.
- [15] :Y. BOUTOURA,R.ibtiouen,N.Takorabet,G.Olivier ; «A New fast renumbering mesh method for taking into account of movement for cylindrical structeurs in finite elements analysis'', 13th CEFC,Athenes,01-04May.2008,PP.1410-1413.
- [16] :A.Mesbah,A.Mezaret: « dimensionnement et reconnaissance d'une machine synchrone triphasée à poles lisse 150 v » (DEUA2009)

- [17] B.Boukais : « contribution à la modélisation des systèmes couple machine convertisseurs : application aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM) thèse de doctorats en électrotechnique UMMTO 2012.
- [18] D. Meeker « *Finite Element Method Magnetics 4.0 – User's Manual* ». dmeeker@ieee.org
[http://femmemberlios.de](http://fememberlios.de)
- [19] K.BOUKERROUCHE, F.FERHAOUI: «Détermination des paramètres d'une machine synchrone à aimants permanents par la méthode des éléments finis » Mémoire d'ingénieur en électrotechnique UMMTO 2009

--> 1 0.0693094113258494
--> 2 0.3837228147898222
--> 3 0.1752608000128613
--> 4 -0.1927593788302924
--> 5 -0.2949654254079382
--> 6 -0.03412274825846476

Bibliographie

--> 7 0.203660022663047
--> 8 0.142704171032169
--> 9 -0.1098925710959371
--> 10 -0.2006150848746613
--> 11 0.04318938271588425
--> 12 0.2617151727815784
--> 13 0.1305781185347466
--> 14 -0.07718687719031235
--> 15 -0.1620210838505196
--> 16 0.06884871538491948
--> 17 0.3469684585220442
--> 18 0.1586458618610284
--> 19 -0.159697875017735
--> 20 -0.3203406323024475
--> 21 -0.02902928913985643
--> 22 0.2597106451478825
--> 23 0.09886614332251374
--> 24 -0.1414495161408713
--> 25 -0.2481092343813563
--> 26 0.02338283674875066
--> 27 0.2458476116018936
--> 28 0.1625010305917809
--> 29 -0.08121748358272572
--> 30 -0.154242647338496
--> 31 0.07813276803795301
--> 32 0.3715617641305523
--> 33 0.1965149813245757
--> 34 -0.1575791235176544
--> 35 -0.2774382898552646
--> 36 -0.03219557518634924

Bibliographie

--> 37 0.2390229943296886
--> 38 0.09319953076453517
--> 39 -0.1116454326358576
--> 40 -0.2007609924449808
--> 41 -0.0004996174860800973
--> 42 0.2837925833736229
--> 43 0.126206713477684
--> 44 -0.0839391475076576
--> 45 -0.157002921363168
--> 46 0.05887968432372488
--> 47 0.3350000982866356
--> 48 0.192734295917846
--> 49 -0.14651747780785
--> 50 -0.302479681871406
--> 51 -0.003071872217418878
--> 52 0.2675720689238169
--> 53 0.120691953776683
--> 54 -0.1233141595345401
--> 55 -0.2276028756177326
--> 56 0.01747319547295566
--> 57 0.2741981578809616
--> 58 0.1287501120862475
--> 59 -0.09269381039844132
--> 60 -0.1723263998739111
--> 61 0.06165066812076402
--> 62 0.3627556247560158
--> 63 0.1590712804595857
--> 64 -0.152363909979159
--> 65 -0.2600149483968708
--> 66 -0.03660765932309937

Bibliographie

--> 67 0.2163206907816861
--> 68 0.1045311060587114
--> 69 -0.1092302385369733
--> 70 -0.201413087188687
--> 71 0.05500348390170511
--> 72 0.272311148778802
--> 73 0.1523836899485939
--> 74 -0.07965860528552747
--> 75 -0.182424558782999
--> 76 0.05404902693649009
--> 77 0.3575767483927112
--> 78 0.1624591171143046
--> 79 -0.1622974795597672
--> 80 -0.3283666220323466
--> 81 -0.01709482612140033
--> 82 0.2339532268483427
--> 83 0.1090861817418286
--> 84 -0.1377281178011234
--> 85 -0.1933566206012111
--> 86 0.001311867663295725
--> 87 0.2508444216448093
--> 88 0.1640433248390175
--> 89 -0.06750763338094291
--> 90 -0.1572335174346066
--> 91 0.08055033218986314
--> 92 0.3331391397823236
--> 93 0.1925629348577999
--> 94 -0.1476887233582328
--> 95 -0.3090205035762944
--> 96 -0.01882747382837017

Bibliographie

--> 97 0.2282683716734387
--> 98 0.07552074810594819
--> 99 -0.1254520426244349
--> 100 -0.2435967356179569
--> 101 0.01692294919327375
--> 102 0.2876794128837777
--> 103 0.1275878874548466
--> 104 -0.1151621970918202
--> 105 -0.1785716065376075
--> 106 0.0600161381248539
--> 107 0.324935006546712
--> 108 0.214219372017593
--> 109 -0.1520752418798781
--> 110 -0.274682696649993
--> 111 -0.004179782101731886
--> 112 0.2296119592035688
--> 113 0.1090245302529449
--> 114 -0.119066672842778
--> 115 -0.1963631707789147
--> 116 0.02400307526017763
--> 117 0.2732140809016947
--> 118 0.1188129679548472
--> 119 -0.0836557011111187
--> 120 -0.1750821942101934
--> 121 0.04518863168160895
--> 122 0.3627122345700496
--> 123 0.1770263551390197
--> 124 -0.1675084284659972
--> 125 -0.3056770801789258
--> 126 -0.02037269708144946

Bibliographie

--> 127 0.2094983261024742
--> 128 0.1285620724711931
--> 129 -0.1154343383146414
--> 130 -0.2171063006271215
--> 131 0.04041356055857887
--> 132 0.3003109066249175
--> 133 0.1540006317070932
--> 134 -0.08515889176207592
--> 135 -0.1766330101483065
--> 136 0.05385891260153664
--> 137 0.3465949536981157
--> 138 0.1766372481636292
--> 139 -0.154985283462354
--> 140 -0.2823899832679364
--> 141 -0.0376266595749235
--> 142 0.2481269156601086
--> 143 0.08579627146636971
--> 144 -0.1130584172372783
--> 145 -0.1867529304472657
--> 146 0.004203967216592074
--> 147 0.2536283848755672
--> 148 0.1333289495201507
--> 149 -0.0716728419044662
--> 150 -0.1795636689272186
--> 151 0.08363723422535749
--> 152 0.3755751094190342
--> 153 0.1991862036545985
--> 154 -0.159051379863583
--> 155 -0.159051379863583
--> 156 -0.03314857953673528

Bibliographie

--> 157 0.2237538085438255
--> 158 0.09753588888696319
--> 159 -0.1297404864371766
--> 160 -0.2311990242592091
--> 161 0.02152713773604425
--> 162 0.265093872360465
--> 163 0.1236814099865008
--> 164 -0.08614561008189017
--> 165 -0.1514946649800779
--> 166 0.04629429959787725
--> 167 0.04629429959787725
--> 168 0.1966853506399117
--> 169 -0.1444337553772447
--> 170 -0.2841917518916893
--> 171 0.004312752306798141
--> 172 0.1989957155576442
--> 173 0.1282660919424363
--> 174 -0.1094534818938458
--> 175 -0.23145884257088
--> 176 0.02268965440571618
--> 177 0.2672735122761454
--> 178 0.1072554961187077
--> 179 -0.08749937076053169
--> 180 -0.1970454892250011

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

```
newdocument(0)
mi_probdef(0,"millimeters","planar",1.e-8,80)
mi_addnode(0,0)

--créer le stator
r11=53.5 --rayon externe de rotor
r12=8 --rayon interne de rotor
mi_addnode(0, r11)
mi_addnode(0,- r11)
mi_addarc(0, r11,0,- r11,180,10)
mi_addarc(0,- r11,0, r11,180,10)
---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()

--creation de rotor
r21=30.78 --rayon externe 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+0.5,60,10)
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
-- Définition de la 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)

--ajouter 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(-0.0001,-0.0001)
mi_setblockprop("acier",0,0,0,0,2)
mi_clearselected()
--le encoches rotorique
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(-16.30,20.0)
mi_selectlabel(-16.30,20.0)
mi_setblockprop("cuivre4",0,0,0,0,3)
mi_addmaterial("cuivre4",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("cuivre5",0,0,0,0,3)
mi_addmaterial("cuivre5",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("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 toles rotoriques
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(-0.30,30.30)
mi_selectlabel(-0.30,30.30)
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 encoches statoriques
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(33.9,19.3)
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(-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)
mi_setblockprop("cuivre21",0,0,0,0,2)
mi_addmaterial("cuivre21",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 tôles statoriques
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=233.6
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
--phase a
ia=46.72*4
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=-23.36*4
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=23.36*4
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()
```

--créer un contours

```
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)
```

--zoomer et sauvegarder la machine

```
mi_zoomnatural(5)
mi_saveas("mac5.fem")
```

--calcul de la f.e.m à vide

```
open("mac5.fem")
showconsole()
clearconsole()
pas=1
tet=0
for i=0,18,1 do
tet=tet+1
mi_selectgroup(3)
mi_moverotate(0,0,1)
mi_saveas("temp.fem")
mi_analyse()
mi_loadsolution()
mo_refreshview()
mo_seteditmode("area")
x1n=0.3
y1n=38
x2n=10
y2n=37
x3n=40
y3n=0
x4n=37
y4n=-10
mo_selectblock(x1n,y1n)
a1=mo_blockintegral(1)
s1=mo_blockintegral(5)
fi1=a1/s1
```

```
mo_clearblock()
mo_selectblock(x2n,y2n)
a2=mo_blockintegral(1)
s2=mo_blockintegral(5)
fi2=a2/s2
mo_clearblock()
mo_selectblock(x3n,y3n)
a3=mo_blockintegral(1)
s3=mo_blockintegral(5)
fi3=a3/s3
mo_clearblock()
mo_selectblock(x4n,y4n)
a4=mo_blockintegral(1)
s4=mo_blockintegral(5)
fi4=a4/s4
mo_clearblock()
mo_refreshview()
fit=(fi1+fi2-fi3-fi4)
e=fit*50*PI*4
et=e*146
--2paires de poles
print(tet,et)
tet=(tet+pas)
end
```

```
--calcul de couple de denture (détente)
open("mac5.fem")
showconsole()
clearconsole()
pas=1
tet=0
for i=1,380 do
tet=tet+pas
mi_createmesh()
mi_analyze()
mi_loadsolution()
mi_selectgroup(3)
mi_moverotate(0,0,pas)
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(0,31.04)
mo_addcontour(0,-31.04)
mo_bendcontour(180,1)
mo_addcontour(0,-31.04)
mo_addcontour(0,31.04)
mo_bendcontour(180,1)
mo_makeplot(0,360,"pot31.3.dat",1)
Cp=mo_lineintegral(4)
mo_clearcontour()
print(tet,Cp)
end
```

```
--calcul des inductances propres et mutuelles
open("mac5.fem")
showconsole()
clearconsole()
pas=0.5
tet=0
for i=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
--Mab=(w-0.030)/0.0529 --inductance mutuelle
mo_clearblock()
print(tet,Mab)
end
```