

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

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
Département D'Electrotechnique

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté par
**CHERFIOUI Samira
ADEM Razika**

Mémoire dirigé par **M. KIMOUCHE Abdelghani**

Thème

**Etude et simulation d'un alternateur
automobile**

Mémoire soutenu publiquement le 25/09/2018 devant le jury composé de :

M. BOUTORA Youcef
MCA, UMMTO, Président

M. KIMOUCHE Abdelghani
MAA, UMMTO, Encadreur

M. KHALDI Rabah
MAA, UMMTO, Examineur

M.MIOUAT Azzouz
MAA, UMMTO, Examineur

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier dieux tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. Kimouche Abdelghani** pour son dévouement ces conseil et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

Ainsi que nous remercions pour toute l'aide et le soutien qu'il nous a offert tout au long de nous études.

Notre vif remerciement vont également au membre du jury pour l'intérêt qu'il ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leur propositions.

Nous ne pouvons pas oublier de remercier **Mr. Enteghar Lounes** trouvent ici toute ma gratitude pour leur soutien moral et leur encouragement durant ce travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Etat de l'art d'un alternateur à griffe

I.1	INTRODUCTION.....	1
I.2.	Présentation de la machine synchrone.....	1
I.2.1	Machines synchrones à aimants permanents.....	1
I.2.1.1	Différents structures de machines synchrones à aimant permanent	2
I.2.2	Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)	3
I.3	L'électricité dans l'automobile	5
I.4	Alternateur	5
I.4.1	L'alternateur synchrone avec rotor bobiné à pôles saillants	5
I.5	Alternateur à griffe	6
I.5.1	Structure de l'alternateur à griffe	7
I.5.1.1	Le rotor.....	8
I.5.1.2	Le stator.....	8
I.5.1.3	Redresseur de l'alternateur à griffe	9
I.5.1.4	Régulateur de l'alternateur à griffe	10
I.5.1.5	Refroidissement de l'alternateur a griffe.....	10
I.6	Principe de fonctionnement de l'alternateur à griffe	10
I.7	Caractéristique de l'alternateur à griffe.....	11
I.7.1.	Caractéristique à vide.....	11
I.7.2	Caractéristique en court circuit	12
I.7.3	Caractéristique en charge	12
I.8	les différentes pertes de l'alternateur	14
I.8.2	Les pertes joules	14
I.8.3	Les pertes fer	15
I.9	Conclusion.....	15
Chapitre I : Du modèle physique vers le modèle discret		
II.1.	Introduction	16
II.2.	Forme locale des équations de Maxwell	16
II.2.1	Les discontinuités des vecteurs du champ.....	18
II.3.	Les modèles du champ électromagnétique.....	18

Sommaire

II.3.1	Modèle magnétostatique	19
II.3.1.	formulation magnétostatique en potentiel vecteur	20
II.3.1.2.	Formulation magnétostatique en potentiel vecteur magnétique réduit.....	21
II.3.2	Modèle magnétodynamique	22
II.3.2.1	Formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique.....	24
II.3.2.2.	<i>Formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique modifié</i>	<i>25</i>
II.4.	Méthode des éléments finis	26
II.4.1	Espace des solution admissibles [25] [26]	27
II.4.2.	Elément géométriques	28
II.4.3	Fonction d'interpolation.....	28
II.5.	conclusion.....	29
Chapitre III : Simulation d'un alternateur à griffe		
III.1	Introduction	30
III.2	Description de logiciel maxwell.....	30
III.3	Exploitation de logiciel de calcul numérique maxwell 3D.....	30
III.4	Structure de la machine à griffe	31
III.4.1	Stator	32
III.4.2	Rotor.....	32
III.4.3	Bobine rotor.....	33
III.4.4	L'enroulement statorique	33
III.4.5	Modèle complet.....	34
III.5	Réduction du modèle d'étude.....	35
III.5.1	Conditions aux limites.....	35
III.5.2	Le maillage	36
III.5.3	Matériaux magnétiques	36
III.6	Résultat et interprétation	37
III.7	Partie expérimentale	40
III.7.1	Schéma bloc	40
III.8	Confrontation des résultats Simulation-expérimental	41
III.8	Conclusion.....	41

Conclusion générale

Liste des figures

Fig. I.1 : Machine munies de pièce polaire.....	[2]
Fig. I.2 : Machine sans piece polaire.....	[3]
Fig.3 : Structures du rotor d'une MSRB	[3]
Fig. I.4 : stator d'une MSRB.....	[4]
Fig. I.5 : machine synchrone à rotor bobiné à pôle saillant.....	[6]
Fig. I.6 : Eléments de l'alternateur principale.....	[4]
Fig. I.7 Un alternateur à griffes.....	[7]
Fig. I.8 : présente une vue éclatée de l'alternateur à griffes avec aimants.....	[7]
Fig. I.9. Le rotor de l'alternateur à griffes.....	[8]
Fig. I.10. Vue de stator complet.....	[9]
Fig.11. Coupe du stator.....	[9]
Fig. I.12. L'alternateur sur la batterie dans le cas d'un redressement double triphasé triangle.....	[9]
Fig. I.13 Le porte balais de l'alternateur a griffe.....	[10]
Fig. I.14 caractéristique à vide.....	[11]
Fig. I.15 caractéristique en court circuit à 1800 tour/min.....	[12]
Fig. I.16. Température en fonction de la vitesse de rotation.....	[12]
Fig. I.17. Caractéristique de l'alternateur initial (5A).....	[13]
Fig. II.1 problème général magnétostatique.....	[19]
Fig. II.2 problème général magnétodynamique.....	[23]
Fig. II.3 Eléments géométriques.....	[28]
Fig. III 1 : Schéma de bobinage de stator.....	[31]
Fig.III.2 : stator de la machine.....	[32]
Fig.III.3 : rotor de la machine.....	[32]
Fig.III.4 : la bobine rotorique.....	[33]

Liste des figures

III.5 : Un seul enroulement statorique.....	[33]
Fig.III.6 : une phase de stator.....	[33]
Fig.III.7 : Les trois enroulements statorique.....	[34]
Fig.III.8 : modèle complet d'alternateur à griffe.....	[34]
Fig.III.9 : Le modèle réduit sans la boîte d'air.....	[35]
Fig.III.10 : le modèle avec la boîte d'aire.....	[35]
Fig.III.11: Maillage de l'alternateur à griffe.....	[36]
Fig.III.12 : $B=f(H)$	[36]
Fig.III.13 : Le flux magnétique dans les trois phases de la machine.....	[37]
Fig.III.14 : la tension dans les trois phases de la machine.....	[37]
Fig.III.15 : Le flux dans les trois phases de la machine.....	[38]
Fig.III.16 : la tension induit aux bornes des trois phases de la machine.....	[38]
Fig.III.17 : L'induction dans la machine à griffe.....	[39]
Fig.III.18 : Schéma bloc de l'essai à vide.....	[40]
Fig.III.19 : le matériel de l'essai expérimental.....	[40]

TableauII.1 Propriétés de différents types d'interpolation.....	[29]
Tableau III.1 : les parametre de la machine.....	[31]
Tableau III.2 : Resultatats de l'essai à vide.....	[41]
TableauIII.3 résultat de simulation.....	[41]

Nomenclature

t : le temps(s).

E : Champ électrique (V/m).

H : Champ magnétique (A/m).

D : Induction électrique ou déplacement électrique (C/m²).

B : Induction magnétique (T).

ρ : Densité de charge électrique volumique (C/m³).

J : La densité du courant électrique (A/m²).

B_r : Induction magnétique rémanente (T).

μ : Perméabilité magnétique (H/m).

ε : Permittivité électrique (F/m).

σ : Conductivité électrique (S/m).

J_s : La densité de courant d'excitation de source.

A : Potentiel vecteur magnétique.

J_s : La densité de courant d'excitation de conducteur.

μ_0 : La perméabilité du vide.

Introduction générale

La puissance électrique dans les véhicules à propulsion thermique est fournie par l'alternateur à griffes [15], cette machine est présente dans le secteur automobile depuis les années 1970, et depuis ces années, la consommation électrique des véhicules n'a cessé d'augmenter [15].

La machine à griffes fonctionne suivant le même principe que les machines synchrones traditionnelles. Entraînée par le moteur à combustion interne du véhicule, en mode alternateur, elle a pour rôle d'alimenter en courant continu tous les récepteurs reliés aux réseaux de bord, et plus particulièrement de charger la batterie [10].

L'analyse tridimensionnelle des dispositifs électromagnétique passe par la maîtrise des phénomènes électromagnétique sont sauvant complexe, nécessitant sans cesse l'amélioration des modelés utilisés. [27] Les travaux de recherches ont lieu à différents niveau : représentation les lois de comportement des matériaux magnétique, technique de maillage, choix des formulations les mieux adaptées.

Depuis quelques années, un effort particulièrement important a porté sur la prise en compte des phénomènes tridimensionnels couplés par les recherches techniques générales et robustes, capables de résoudre des problèmes pratiques de plus en plus élaborés [27].

L'objectif de ce travail est de simuler le comportement électromagnétique d'un alternateur à griffe en basant sur la formulation magnétodynamique.

Beaucoup de formulation peuvent être envisageable pour palier à ce genre de problème, notre étude est focalisée sur la formulation magnétodynamique. La résolution des équation de la magnétodynamique est faite par la méthode des élément fini.

En fini, par une simulation élément fini à lieu avec le logiciel Maxwell 3D.

La présentation de travail à été structure en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous verrons le contexte général dans lequel s'est déroulée cette étude. Il s'agira de présenter l'état de l'art de l'alternateur à griffes en donnant un

descriptif détaillé de ses différents organes, et on va parler sur les différentes pertes existant dans l'alternateur à griffe.

Le deuxième chapitre présente les bases de la modélisation en électrotechnique. La première partie rappelle les équations de Maxwell et les différents modèles rencontrés dans la pratique :

La magnétostatique et la magnétodynamique. L'introduction de la notion du potentiel vecteur magnétique va nous permettre d'établir diverses formulations, exprimant sous une forme plus appropriée les équations de Maxwell.

La deuxième partie rappelle brièvement le principe de la méthode des éléments finis qui permet le passage de la formulation continue à la formulation discrète.

Dans le troisième chapitre, nous proposons pour application l'alternateur à griffe sur lequel le modèle magnétodynamique sera testé avec le logiciel Maxwell 3D. Dans ce cadre, nous étudions le comportement électromagnétique de tout le système. En matière de résultats, le flux magnétique, l'induction magnétique et la tension dans les trois phases sont présentés et discutés.

I.1 Introduction

Dans ce chapitre à pour but de présenter le principe, la structure, le fonctionnement de la machine à griffe utilisé comme génératrice d'électricité dans les véhicule terrestre et décrire les différent partie qui la constituent on a présente aussi les différent caractéristique Principale de l'alternateur à griffe. On a parlé des différentes pertes existent dans l'alternateur à griffe, les pertes mécanique et aéraulique, les pertes joules les pertes fer.

I.2. Présentation de la machine synchrone

Machine synchrone est une machine électrique soit produisant un courant électrique, soit absorbant un courant électrique, elle appelée alternateur si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant alternatif. En fonctionnement moteur sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit. , ces machines sont généralement triphasées. Le rotor souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source de courant continu ou équipé d'aimants permanents [2].

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Les machines synchrones se composent d'un rotor, qui est la partie tournant et un stator la partie fixe. L'application machine synchrone est due au fait que le rotor est le champ magnétique tournant au stator tournant à la même vitesse, le stator généralement constitue par trois phases décalées de 120 degrés. Le rotor produit un champ magnétique dans l'entrefer avec des aimants permanents ou des bobines alimentées par un courant continu.

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples massiques importants pour des dimensions géométriques convenables [3].

I.2.1. Machines synchrones à aimants permanents

La présence des aimants au rotor nécessite une construction complexe et fragilise mécaniquement la structure du rotor. De plus, les pertes harmoniques au rotor provenant de la pulsation de flux dues aux dentures et aux harmoniques de courant peuvent entraîner la démagnétisation des aimants par un dépassement de la température maximale tolérée [4], [5].

Ces machines sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques importants associés à un rendement assez élevé et à une grande puissance massique pour des méthodes de contrôle plus simple.

Il existe plusieurs types de machines synchrones à aimants permanents : des machines de construction standard à aimantation radiale, des génératrices discoïdes à champ axial, ou encore à rotor extérieur [6], [7]. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement [6].

I.2.1.1 Différents structures de machines synchrones à aimant permanent

Parmi les structure des machines synchrone à aimant permanent, nous pouvons distingues deux types :

- 1) Machines munies de pièce polaire (rotor saillant)
- 2) Machine sans pièce polaire (rotor lisse)

Dans le premier type les pièces polaire servent à la concentration du flux d'induction magnétique permettant d'obtenir une induction normale au niveau de l'entrefer avec des aimants(Fig1)

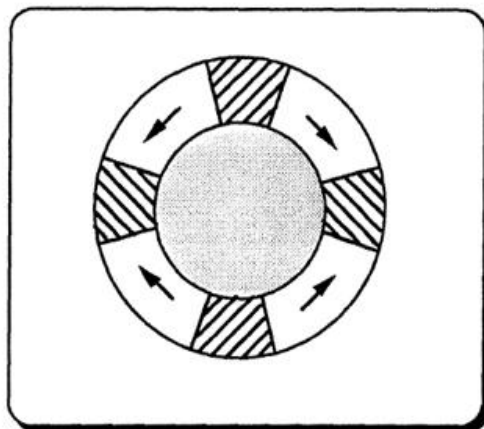


Fig. I.1 : Machine munies de pièce polaire [8]

Et dans le deuxième type l'alimentation des aimants est généralement radiale au niveau de l'entrefer(Fig.2) des structure mixtes (les aimant sont parallèles et perpendiculaire à l'entrefer) sont aussi parfois utilisées [8].

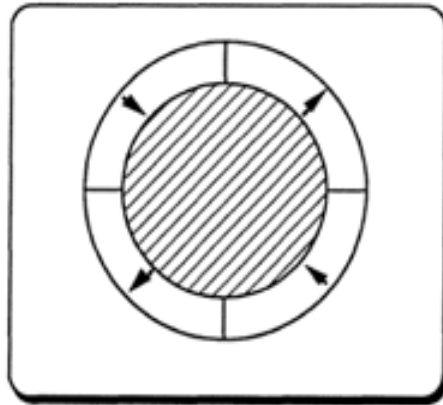


Fig. I.2 : Machine sans pièce polaire[8].

I.2.2 Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

La machine à rotor bobiné est constituée de:

- Rotor : Formé de masses polaires autour desquelles sont entourées des bobines d'excitation. Ces masses polaires peuvent être réalisées en acier massif ou par un empilage de tôles afin de réduire les pertes fer, le flux rotorique est obtenu, donc, grâce aux ampères-tours injectés dans les bobines d'excitation [16]. On alimente ces bobines par des courants continus par intermédiaire des contacte glissant balais bagues pour générer les flux magnétiques inducteur dans l'entrefer.

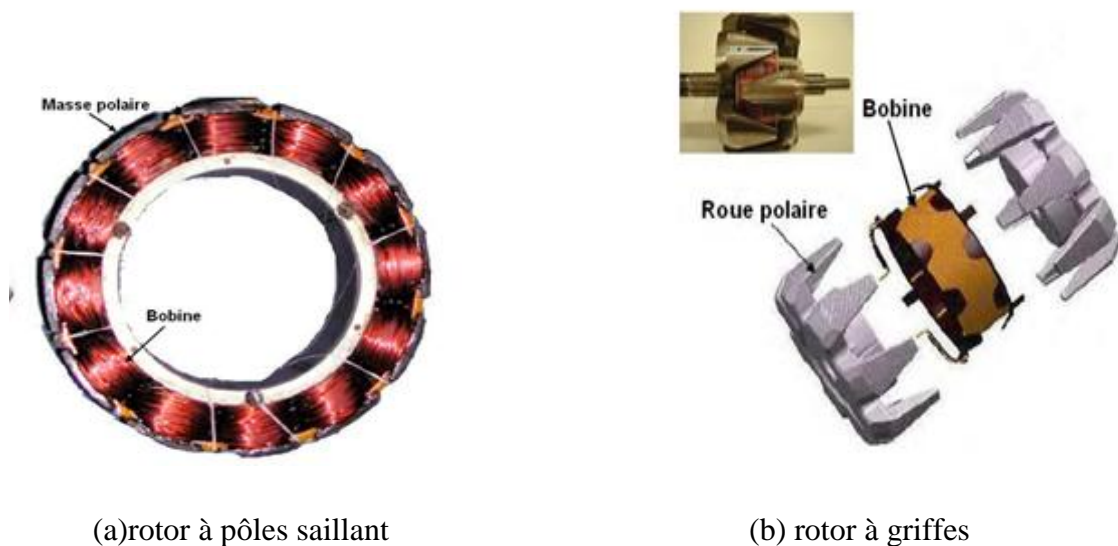


Fig.I.3 : Structures du rotor d'une MSRB [16].

Les MSRB à pôles saillants (Fig.3.a) sont moins répandues dans le secteur automobile, on les rencontre généralement dans des applications alternateurs. La machine à rotor bobiné à griffes (Fig.3.b) est la machine utilisée en majorité pour les alternateurs automobiles.

– Stator : de même structure qu'un stator d'une machine asynchrone, il est principalement constitué du paquet de fer et du bobinage. Le paquet est constitué de tôles feuilletées afin de minimiser les pertes par courants de Foucault. Des encoches sont réalisées dans le paquet ce qui permet d'y insérer les conducteurs du bobinage



Fig. I.4 : stator d'une MSRB [16].

On peut trouver deux types de ces genres des machines : la machine à pôle lisse et la machine à pôle saillants.

La machine à pôle lisse a une inductance constante quelle que soit la position de rotor, par contre la machine à pôle saillant a un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles ce qui entraîne une variation d'inductance par exemple l'alternateur automobile est considéré comme une machine à pôle saillants[1].

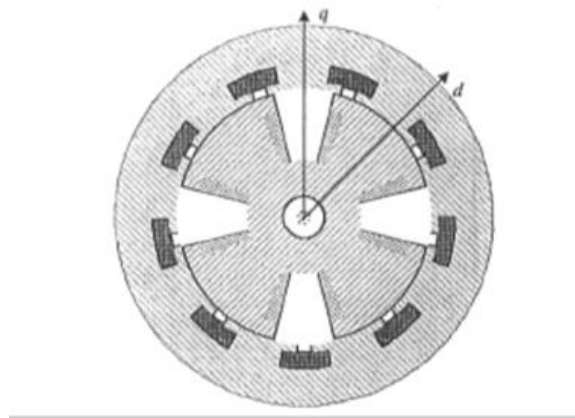


Fig. I.5 : machine synchrone à rotor bobiné à pôle saillant [1].

I.3 L'électricité dans l'automobile

L'électricité dans l'automobile d'aujourd'hui a pris beaucoup d'importance. En effet, l'électricité et l'électronique offrent la possibilité de rajouter des dispositifs permettant d'améliorer certaines caractéristiques des automobiles comme le confort (électrification des vitres et des sièges chauffage), la sécurité active (système antiblocage des roues ABS, contrôles de stabilité ESP), la sécurité passive (airbag, prétensionneurs de ceinture de sécurité) et enfin la consommation d'essence et la pollution. Pour les raisons de poids, le coût et de contrôles optimaux certains organes hydrauliques et mécaniques sont progressivement remplacés par des dispositifs électrotechniques. C'est le cas de la direction assistée des freins, des suspensions actives de la climatisation Finalement l'électricité est aussi utilisée dans certains véhicules comme moyen de propulsion dans le but de diminuer la consommation d'essence et la pollution.

I.4 Alternateur

Un alternateur est une machine rotative qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif. Cette machine est constituée d'un rotor (partie tournante) et d'un stator (partie fixe).

Le rotor est l'inducteur, il peut être constitué d'un aimant permanent, dans ce cas la tension délivrée par la machine n'est pas réglable, sa valeur efficace et sa fréquence varient avec la vitesse de rotation.

Comme il peut être constitué par un bobinage dans ce cas il produit un champ magnétique lorsqu'il est alimenté par un courant électrique, il convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique. Ce bobinage est alimenté par un courant continu soit à l'aide d'un collecteur à bague rotatif (permettant de créer une connexion électrique entre une partie fixe et une partie tournante), soit par un exciteur à diode tournante et sans balais.

I.4.1 L'alternateur synchrone avec rotor bobiné à pôles saillants

L'alternateur est composé d'une machine principale et d'un système d'excitation.

La machine principale est à quatre pôles saillants avec un bobinage d'excitation alimenté en courant continu et le système d'excitation est sans bague et sans balais (brushless), ce type d'alternateur est formé par une machine inversée appelée excitatrice [7].

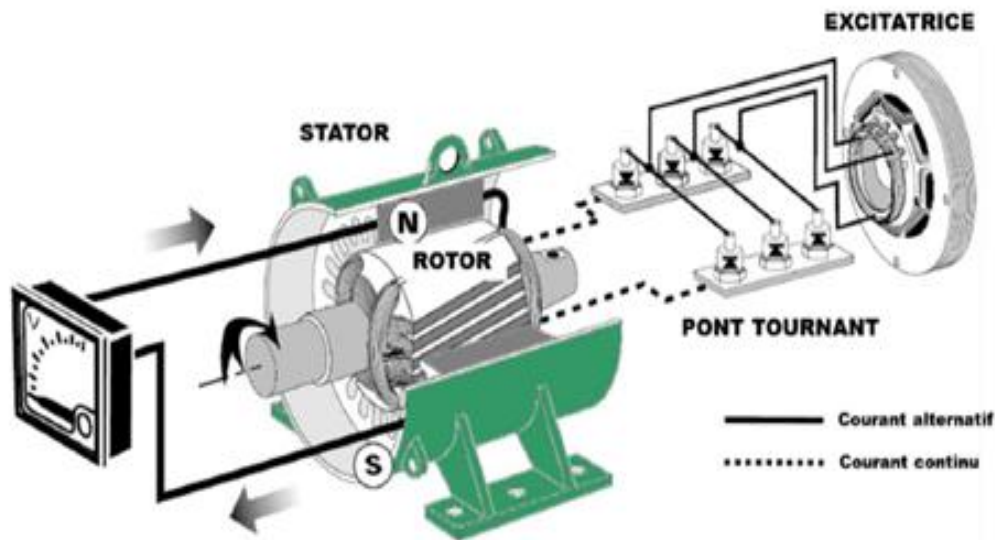


Fig. I.6 : Eléments de l'alternateur principale [7].

I.5 Alternateur à griffe

Dans les véhicules, l'alternateur est l'unique convertisseur qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette machine est particulière à le même principe de fonctionnement que la machine synchrone triphasé à pôles saillants son fonctionnement en générateur et en moteur, dans une voiture en fonctionnement générateur, l'alternateur est entraînée par le moteur thermique son rôle est d'alimenter les réseaux électrique par un courant continu de véhicule, avec notamment la recharge de la batterie [10].

L'alternateur à griffes constitue au sein d'un moteur thermique l'unique structure à ce jour capable de répondre à cette demande cette structure reste néanmoins la source de phénomène complexe mais maîtrisés, le choix de cette structure pour ce type d'application est dicté par son coût, un processus bien maîtrisé et une robustesse adaptée aux contraintes liées à l'environnement de l'alternateur (température, vibration, humidité, poussière...) [15].

En générale, les alternateurs à pôles en forme de griffes ont un diamètre plus grand et une longueur plus faible que les machines synchrones classiques. La technologie particulière utilisée dans les alternateurs à griffes (un seul enroulement d'excitation) permet de diminuer

les coûts de fabrication et d'avoir une machine robuste par rapport aux forces centrifuges qui s'exècrent dans le rotor [12].



Fig. I.7 Un alternateur à griffes [12].

I.5.1 Structure de l'alternateur à griffe

L'alternateur à griffes est une machine synchrone triphasée à pôles saillant. Un alternateur à griffes est constitué de deux armatures magnétiques, le rotor et le stator qui sont séparés par un entrefer. Ces deux armatures sont associées à au moins un pont redresseur, un régulateur, des paliers et un système de refroidissement. Sa particularité provient de la structure de rotor, qui comporte une bobine excitatrice à travers deux bagues. La Figure 1 présente une vue éclatée de l'alternateur à griffes avec aimants [11].

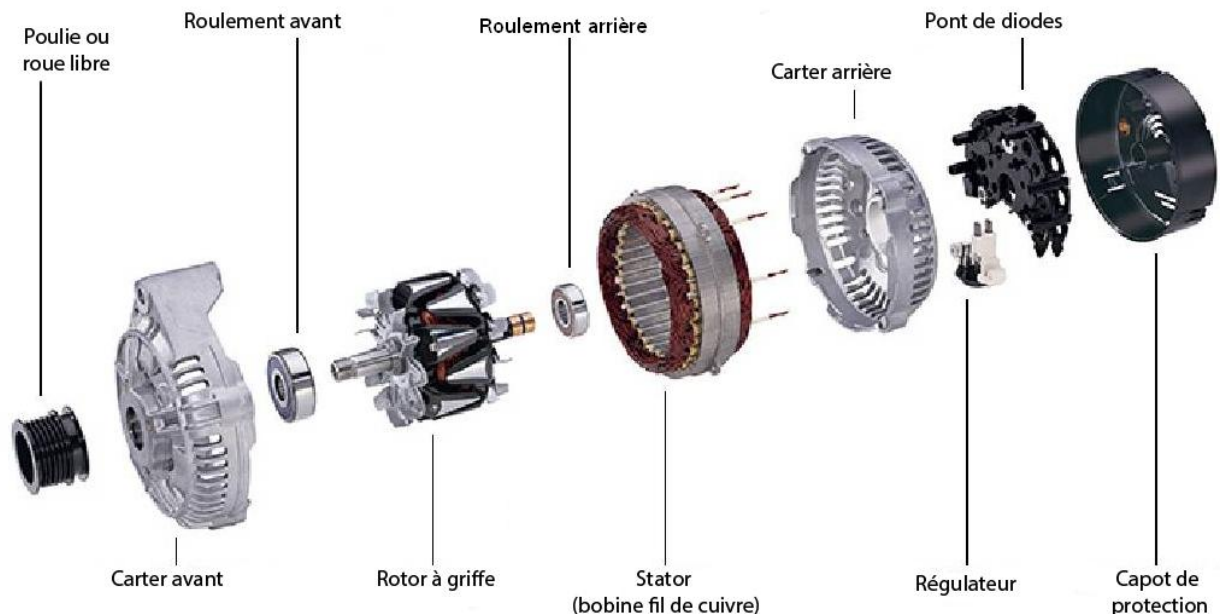


Fig. I.8 : présente une vue éclatée de l'alternateur à griffes avec aimants [11].

I.5.1.1 Le rotor

Le rotor d'une machine à griffes est complexe.

Le rotor est l'inducteur de la machine il comporte un noyau cylindrique axial muni d'une bobine excitatrice alimentée par l'intermédiaire de deux bagues et deux roues en forme de griffes, portant chacune de pôles qui s'intercalent les uns dans les autres de façon à constituer alternativement une succession de pôles du Nord et Sud [11].

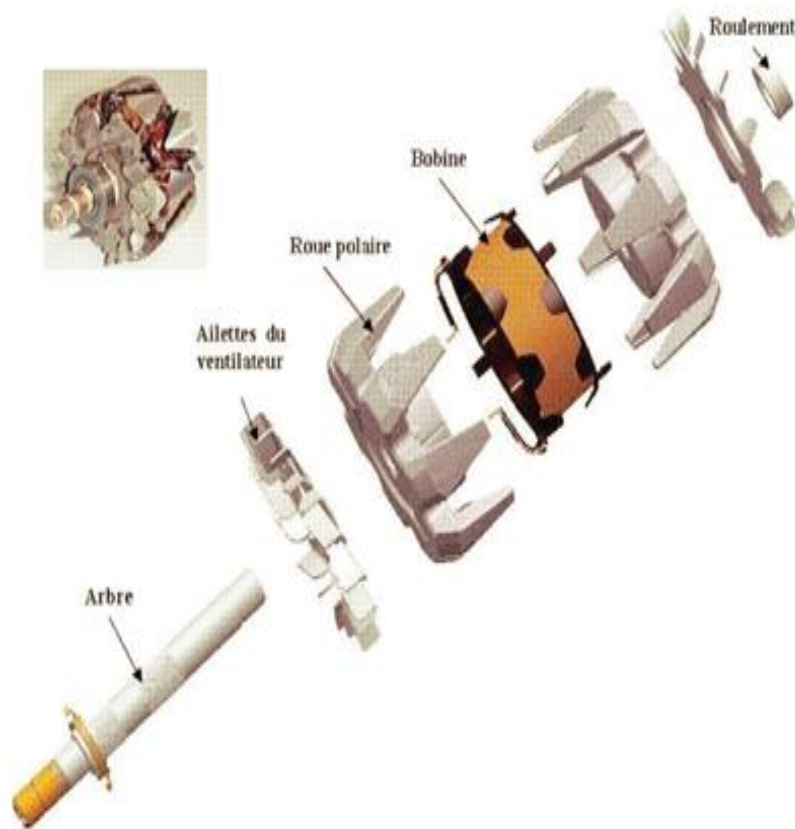


Fig. I.9. Le rotor de l'alternateur à griffes [10] [11].

En effet, sa géométrie engendre des lignes du champ qui évoluent en 3 D (selon l'axe tangentiel, axial et radial de la machine) [15].

I.5.1.2 Le stator

Le stator est l'induit de la machine il est constitué d'un empilage de tôles encochées qui contiennent un enroulement triphasé, les tôles sont feuilletées isolées entre elles, le bobinage

comprend un ou deux système triphasé avec un ou deux pont de diodes associées et l'utilisation des deux systèmes triphasé permet de réduire l'ondulation de courant batterie.



Fig. I.10. Vue de stator complet [10]



Fig. I.11. Coupe du stator [11]

I.5.1.3 Redresseur de l'alternateur à griffe

Le redresseur est constitué d'un ou deux pont de diodes triphasés débitant sur la batterie et le réseau de bord du véhicule. Le redresseur peut être de type double triphasé, et débiter ainsi sur 2 ponts de diodes en parallèle sur le réseau de bord et la batterie.

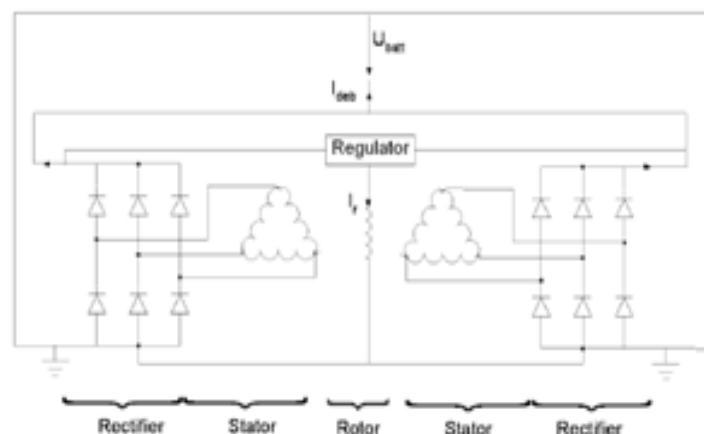


Fig. I.12. L'alternateur sur la batterie dans le cas d'un redressement double triphasé triangle [15].

Le régulateur de l'alternateur permet de maintenir aux bornes de la batterie une tension constante. L'intérêt d'avoir un système double triphasé est de réduire les oscillations de courant sur le réseau de bord sans pour autant augmenter ni le coût, ni les pertes Joule dans le redresseur [15]

L'enroulement statorique de l'alternateur est relié à un redresseur qui redresse les courants triphasés débitants sur la batterie et les réseaux de bord du véhicule, la plupart des alternateurs ont un redresseur qui possède six diodes de puissance et aussi certains possèdent

deux redresseurs à six diodes pour diminuer l'ondulation du courant fourni aux réseaux ceci est important pour améliorer la qualité de la tension. [12]

I.5.1.4 Régulateur de l'alternateur à griffe

Le régulateur électronique permet de régler la tension des réseaux et de maintenir une tension constante aux bornes de l'enroulement rotorique en fonction de la vitesse de rotation et de la charge aux bornes de l'enroulement, en générale le régulateur est couplé avec les balais de l'excitation [12].

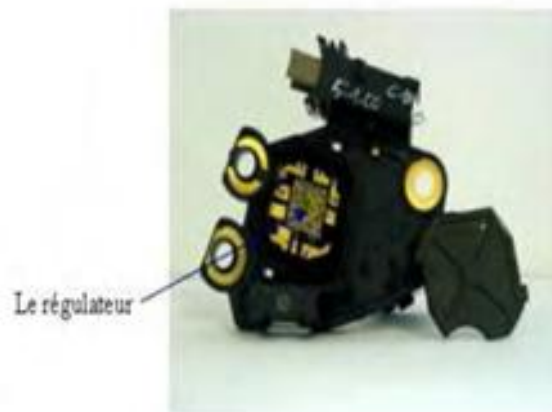


Fig. I.13 Le porte balais de l'alternateur à griffe [12].

I.5.1.5 Refroidissement de l'alternateur à griffe

L'alternateur nécessite d'être refroidi à cause des pertes existant aux bornes d'induit, ils peuvent être refroidis par deux ventilateurs internes et externes qui sont placés aux bornes des extrémités du rotor, ou par eau circulation d'eau autour de la carcasse de la machine [12].

I.6 Principe de fonctionnement de l'alternateur à griffe

En mode alternateur, l'excitation imposée aux bornes de l'enroulement rotorique et l'entraînement de rotor par un moteur thermique, vont engendrer un champ tournant dans

l'entrefer ce champ crée au bornes des phases une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor. Ils apparaissent ainsi aux bornes de l'induit un système polyphasé de tension, le pont diode permet de transformer le système de courant alternatif débite en aval de l'alternateur en courant continu qui permet de d'alimenter les réseaux de bord et de charger la batterie [4], le régulateur permet de détecter les baisse tension dans le circuit électrique et adapte l'excitation aux bornes de l'enroulement rotorique en fonction de la charge et la vitesse. [5]

I.7 Caractéristique de l'alternateur à griffe

Nous présentent les caractéristiques à vide, en court circuit, en charge.

I.7.1. Caractéristique à vide

Pour avoir la caractéristique a vide de l'alternateur, ils sont démagnétisés le rotor, ils sont entraînée a vitesse constante (1800 et 6000 tours /mon), l'orque de la variation du courant d'excitation de 0 à $I_f \text{ max}$ (6A), ils sont relevé la tension entre deux bornes statorique [10].

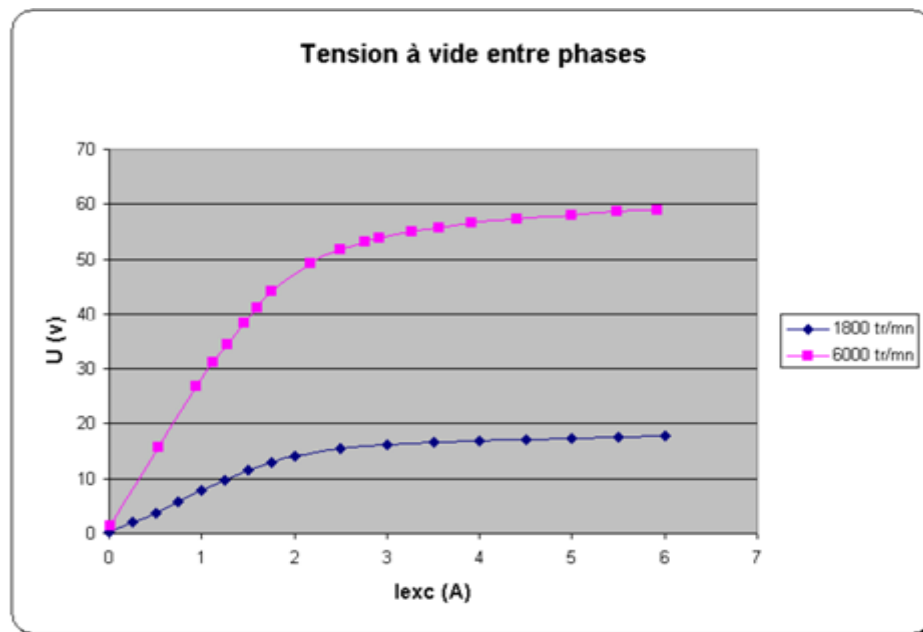


Fig. I.14 caractéristique à vide [11].

I.7.2 Caractéristique en court circuit

Pour avoir la caractéristique en court circuit de l'alternateur, il faut entrainer la machine a vitesse constante (1800tours/min), réalise un court circuit triphasé permanent et faire évaluer l'excitation de 0 à $I_f \text{ max}(6)$, la caractéristique obtenu est représenté sur la figure suivant [11].

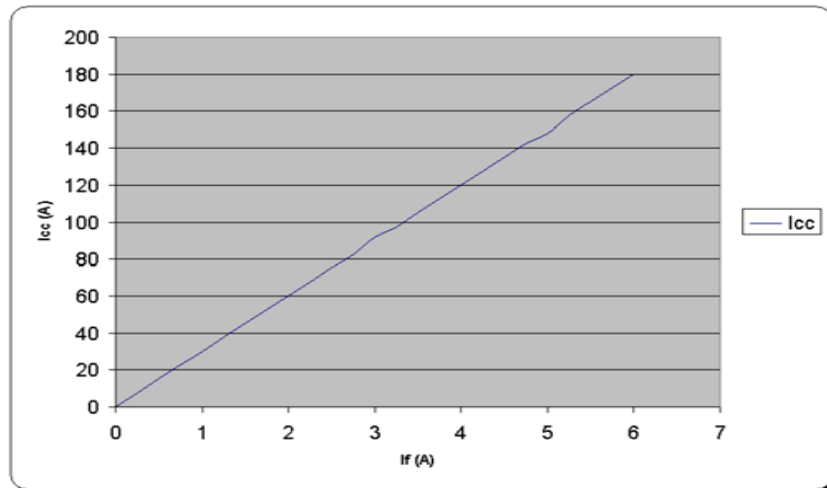


Fig. I.15 caractéristique en court circuit à 1800 tour/min[11].

I.7.3 Caractéristique en charge

La caractéristique en charge correspond au débit batterie pour les différent valeur de la vitesse de rotation du rotor, cette essai s'est déroule selon une stabilisation du débit en fonction de la température, elle peut être obtenu pour différent charge et différent courant d'excitation en plein charge, la valeur du courant d'excitation maximum est imposé par la valeur de la résistance du bobinage de rotor et la température de cuivre [10] [11]

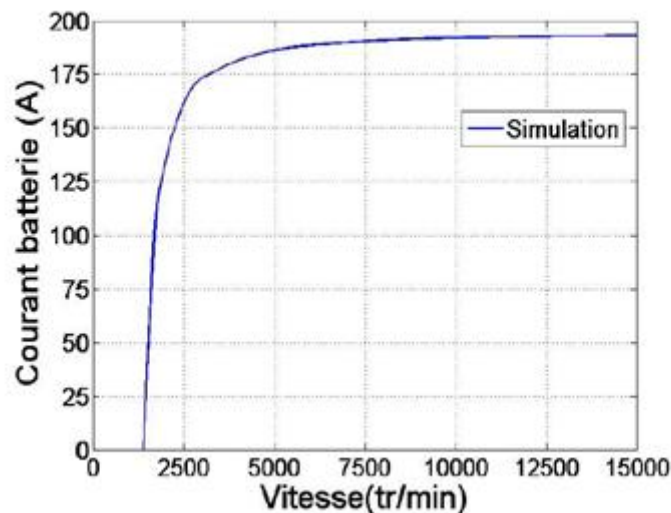


Fig. I.16. Caractéristique de l'alternateur initial (5A) [10].

A partir de 6000tours /min le courant débité varie très peu en fonction de la vitesse, l'alternateur presque en court circuit pour les constructions automobiles français, les cahiers de charges est définit principalement par deux points de fonctionnement, le premier est 1800tours/min le second à 6000tours/min, le troisième est 3000tours/min ce point correspond au point chaud de la machine [10].

I.8 les différentes pertes de l'alternateur

I.8.1 Pertes mécaniques et aérauliques

- **Les pertes mécaniques**

Les pertes mécanique sont dues aux roulements à bille et le frottement entre les bagues et les balais, ces pertes se calcule a partir des formules empirique en fonction du couple de frottement et la vitesse de rotation [10], les pertes dans l'enroulement dépend des paramètres suivants : la charge appliquée, le type de roulement, la taille de roulement, la vitesse de rotation, il est généralement impossibles de séparé ces pertes des pertes aérauliques , a faibles vitesse les pertes mécanique sont faible.[11]

- **Les pertes aérauliques**

Les pertes aéraulique sont dues aux déplacements dans l'air des parties mobiles (le rotor et le ventilateur), elles peuvent être estimées par les formules empirique on fonction des dimensions de rotor, quand la vitesse augment les pertes aérauliques deviennent très important [11].

I.8.2 Les pertes joules

- **Les pertes joules au rotor**

Les pertes joules au rotor sont décomposées en trois parties, les pertes joules dans la bobine d'excitation, les pertes joules dans les bagues et les balais, les pertes joules dans le régulateur [11] [14].

- Les pertes joules dans la bobines d'excitation dépend de la résistance de la bobine de rotor, et du courant d'excitation rotorique en plus dépend de la température de cuivre, malgré ces pertes sont pas très élevée elles ne sont pas moins important car elles sont difficiles a évacuer.

- Les pertes joules dans les bagues et les balais dépend de la chute de tension entre les bagues et balais [10], les balais comportent 30% de cuivre et 68% de graphite et 2% d'oxyde métallique. La température d'oxydation est de 520° [11].
- Les pertes joules dans le régulateur dépend de la résistance de transistor, la température et du courant d'excitation, elle se calcule par l'équation [10].

- **Pertes joules au stator**

Les pertes joules statorique dépend de la valeur de la résistance de l'enroulement en fonction de la température de cuivre, de la valeur et la forme de courant qui les parcourt [10], ces pertes sont élevées notamment à la haute vitesse ou le courant stator est maximale, quelle que soit le couplage étoile ou triangle [18]

- **Les pertes joules dans le pont de diode**

Les pertes joules dans la diode dépendent de la tension de seuil, ces pertes dépendent de la valeur de la résistance passant des diodes, elles sont très importantes, l'utilisation d'un double pont de diode permet de les réduire. [11]

I.8.3 Les pertes fer

Les pertes fer dans l'alternateur à griffe sont très difficiles à calculer de manière précise, elles se décomposent en trois parties : les pertes par hystérésis, les pertes par courant de Foucault et les pertes par excès.

- Les pertes par hystérésis sont générées par des courants induits engendrés par l'accrochage et décrochage des parois de Bloch, lors de leur déplacement sur les joints de gains et le défaut de matériaux, les tôles ferromagnétiques sont soumises à un champ d'excitation alternatif
- Les pertes par courant de Foucault dus à la variation temporelle du flux dans les tôles qui créent des forces électromotrices qui donnent à l'origine la naissance des courants d'induit.
- Les pertes par excès dépendent de la structure des domaines magnétiques du matériau ce qui implique beaucoup de phénomènes complexes (mouvement irrégulier des parois, rotation des moments magnétiques, courbure des parois, ces pertes sont difficiles à calculer, ils sont déterminés par la somme des deux termes précédents.

Les pertes dans les matériaux magnétiques sont présentes dans l'alternateur à griffe et se retrouvent dans le rotor et le stator.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la machine synchrone. La structure et le fonctionnement de la machine à griffe utilisée comme génératrice électrique dans le véhicule et les différentes parties qui la constituent.

II.1. Introduction

Notre travail consiste en l'étude et le développement de modèles mathématiques et numériques tridimensionnels destinés à déterminer la répartition du champs électromagnétique dans les dispositifs électrotechniques. Le modèle de départ étant celui des équations de Maxwell, différentes hypothèses permettent d'en extraire des modèles simplifiés, plus adaptés aux méthodes numériques.

Ce deuxième chapitre présente les bases de la modélisation en électrotechnique. La première partie rappelle les équations de Maxwell et les différents modèle rencontrés dans la pratique :

La magnétostatique et la magnétodynamique. l'introduction de la notion du potentiel vecteur magnétique va nous permettre d'établir diverses formulation, exprimant sous une forme plus appropriée les équations de Maxwell.

La deuxième partie rappelle brièvement le principe de la méthode des éléments finis qui permet le passage de la formulation continue à la formulation discrète

II.2. Forme locale des équations de Maxwell

D'un point de vue macroscopique, le champs électromagnétique est décrit à l'aide de quatre vecteurs, définis en tout point de l'espace M et à chaque instant t .

Les phénomènes électromagnétiques classiques sont régis par les équations de maxwell, qui constituent un système d'équations aux dérivées partielles et qui expriment des lois universelles unifiant les quatres grandeurs qui caractérisent le champs électromagnétique.[19],[20],[21]

Les quatre équations de maxwell dans leur généralité traduisent les interactions entre les grandeurs magnétiques B et H ; électriques E et D en introduisant les caractéristiques μ et σ du milieu, et en appelant J la densité de courant, celles sont exprimées sous la forme suivant :

$$\text{Rot} (H) = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Rot} (E) = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Div}(B) = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Div}(D) = \rho \quad (\text{II.4})$$

Avec

H : Champ magnétique (A/m),

J : La densité du courant électrique (A/m²).

E : Vecteur Champ électrique (V/m).

D : Vecteur Induction électrique ou déplacement électrique (C/m²).

ρ : Densité de charge électrique volumique (C/m³).

L'équation (II.1) est la généralisation de la loi d'Ampère et l'équation (II.2) est appelée la loi de Faraday. Elles constituent les équations dites d'évolution, alors que les équations (II.3) et (II.4) constituent des équations dites de conservation. Par ailleurs, l'équation (II.3) est une conséquence de (II.2) si on admet que l'induction magnétique B a été nulle à l'instant initial.

D'une façon similaire, vu la loi de la conservation de la charge électrique, qui s'écrit :

$$\text{Div} J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.4) est conséquence de (II.1) avec la même hypothèse sur D .

Les formules (II.1- II.4) ne sont pas suffisantes pour déterminer le champ électromagnétique et il convient d'ajouter les lois de comportement établissant des relations de dépendance entre les couples D et E , B et H , J et E ; ces relations expriment les propriétés de matériaux. Il s'agit de :

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

$$B = \mu(H) \cdot H \quad \text{Où} \quad H = v(B) \cdot B \quad (\text{II.7})$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (\text{II.8})$$

Où σ Conductivité électrique, μ Perméabilité magnétique, ε Perméabilité diélectrique.

Dans les cas les plus simples, les coefficients σ , μ et ε sont des constantes scalaires. Plus généralement, ils dépendent de la position du point considéré.

II.2.1 Les discontinuités des vecteurs du champ

Lors du passage d'un milieu à un autre, les grandeurs subissent des discontinuités et ne sont par conséquent pas différentiables. En intégrant les relations (II.1- II.4) sur des volumes incluant les interfaces et en appliquant le théorème de la divergence ou le théorème de Stokes, on obtient les conditions dites de transmission :

- Continuité de la composante normale de B :

$$n \cdot (B_2 - B_1) = 0 \quad (\text{II.9})$$

- Saut de la composante tangentielle de H :

$$n \times (H_2 - H_1) = J_s \quad (\text{II.10})$$

- Continuité de la composante tangentielle de E :

$$n \times (E_2 - E_1) = 0 \quad (\text{II.11})$$

- Saut de la composante normale de D :

$$n \cdot (D_2 - D_1) = \rho_s \quad (\text{II.12})$$

Où B_1 , H_1 , E_1 , D_1 , B_2 , H_2 , D_2 sont les grandeurs physiques de part et l'autre de l'interface, ρ_s est une densité surfacique de charge sur l'interface, J_s est une densité de courant surfacique et n est une normale associée à l'interface.

II.3. Les modèles du champ électromagnétique

Souvent, suivant les dispositifs étudiés, certains phénomènes électromagnétiques peuvent être négligés. Dans les hypothèses simplificatrices proposées, le système (II.1- II.4) devient plus simple. Nous n'aborderons que les modèles magnétostatique et magnétodynamique.

II.3.1 Modèle magnétostatique

Le magnétostatique consiste en l'étude des phénomènes en régime stationnaire.

Typiquement, un problème magnétostatique est composé des parties suivantes (Fig.II.1) :

- des inducteurs parcourus par des courants continus de densité J donnée.
- des aimants permanents des matériaux magnétiques.
- une boîte d'air englobante.

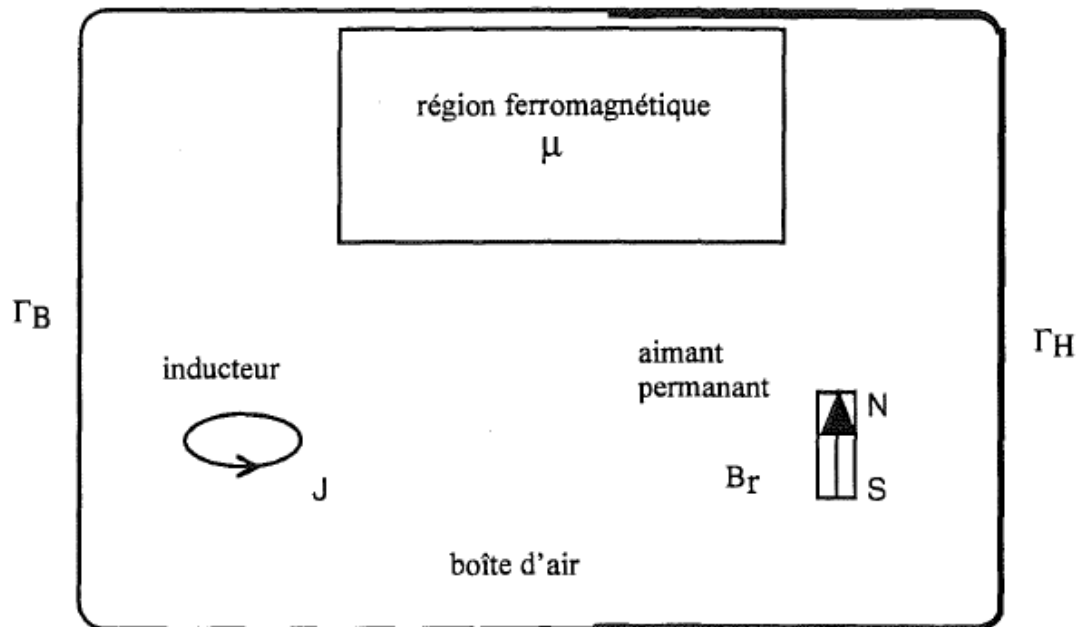


Fig. II.1 problème général magnétostatique.

Les équations à considérer sont issues des équations de Maxwell, dont les dérivées temporelles sont annulées. Elles s'écrivent :

$$\text{Rot}(H) = J \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Div} B = 0 \quad (\text{II.14})$$

À ces équations s'ajoute la loi de comportement magnétique :

$$B = \mu(H). H \quad (\text{II.15})$$

Afin d'assurer l'unicité de la solution du système (II.13- II.15) des conditions aux limites adéquates doivent être données sur la frontière du domaine d'étude, correspondant à un échange nul d'énergie magnétique. Elle sont relatives soit à la composante tangentielle de H soit à la composante normale de B [22]. sur une portion de surface Γ_H de Γ , éventuellement non connexe, on impose la condition :

$$n \times H = 0 \quad (\text{II.16})$$

Sur la surface Γ_B , complémentaire de Γ_H dans Γ , on impose la condition :

$$n \times B = 0 \quad (\text{II.17})$$

De telles conditions assurent l'unicité de B et H si Γ_H et Γ_B sont simplement connexes.

II.3.1.1 formulation magnétostatique en potentiel vecteur

Introduit pour la première fois par Neumann en 1845 et présenté également dans les travaux de Thomson en 1846 et de Maxwell en 1864, le potentiel vecteur magnétique A permet de simplifier le système (II.13-II.15). l'équation (II.14), $\text{Div } B = 0$, permet de définir le potentiel vecteur A tel que :

$$B = \text{rot } A \quad (\text{II.18})$$

L'élimination de B et H dans (II.13) et (II.15) donne la formulation magnétostatique en potentiel vecteur magnétique :

$$\text{Rot}(v \text{ rot } A) = J \quad (\text{II.19})$$

v l'inverse de la perméabilité.

En terme du potentiel vecteur, les conditions aux limites (II.16) et (II.17) s'écrivent :

$$n \times v \text{ rot } A = 0 \text{ sur } \Gamma_H \quad (\text{II.20})$$

$$n \cdot \text{rot } A = 0 \text{ sur } \Gamma_B \quad (\text{II.21})$$

Dans la pratique on préfère remplacer la condition (II.21) par une condition plus simple à imposer, et qui, en plus, la renforce [23].

$$n \times A = 0 \text{ sur } \Gamma_B \quad (\text{II.22})$$

Il faut noter que la relation de définition du potentiel vecteur (II.18) implique que la continuité de la composante tangentielle de A assure la continuité de la composante normale de B .

Condition d'unicité

Les conditions aux limites (II.20) et (II.22) n'assurent pas l'unicité du potentiel A . En effet, si A est solution de l'équation (II.19), alors tout champ du type $A + \text{grad } f$, ou f est une fonction scalaire telle que

$$n \times \text{grad } f = 0 \text{ sur } \Gamma_B \quad (\text{II.23})$$

Est également solution.

Ceci ne semble pas constituer un problème, vu que les grandeurs dérivées, l'induction magnétique B et le champ H sont uniques. Dans la pratique, certaines méthodes numériques se comportent mal lorsque le potentiel A n'est pas unique et d'autre quand on impose l'unicité de A . il convient donc d'assurer l'unicité en fonction de la méthode choisie.

Une jauge couramment utilisée dans la méthode des éléments nodaux est la jauge de coulomb, c'est-à-dire :

$$\text{div } A = 0 \quad (\text{II.24})$$

une autre jauge, mieux adaptée aux éléments d'arêtes est :

$$A \cdot u = 0 \quad (\text{II.25})$$

Où u est un champ de vecteurs dont les lignes de champs ne sont pas fermées et sont telles qu'elles peuvent relier toute paire de points du domaine d'étude [24].

II.3.1.2. Formulation magnéto-statique en potentiel vecteur magnétique réduit

Le potentiel vecteur A peut être décomposé en deux parties A_s et A_r , c'est-à-dire

$$A = A_s + A_r \quad (\text{II.26})$$

Ou A_s est appelé potentiel vecteur source, créé par les seules sources de courant en l'absence de régions magnétiques et A_r est appelé potentiel vecteur de réaction, associé aux phénomènes d'aimantation des matériaux magnétiques, soumis au champ source .

Le potentiel A_s est choisi tel que :

$$\text{rot } A_s = B_s \quad (\text{II.27})$$

avec

$$B_s = \mu_0 H_s \quad (\text{II.28})$$

Le champ H_s est le champ de Biot-savart créé par les inducteurs en l'absence de régions magnétiques, qui vérifie la relation :

$$\text{rot } H_s = J \quad (\text{II.29})$$

l'introduction des relations (II.26- II.29) en (II.19) permet d'obtenir la formulation en potentiel vecteur magnétique réduit, donnée par :

$$\text{rot}(v \text{ rot } A_r) = \text{rot}[(v_0 - v) \text{ rot } A_s] \quad (\text{II.30})$$

de même que pour le potentiel vecteur A , des conditions aux limites doivent être associées au potentiel vecteur réduit A_r . Comme précédemment, la condition d'unicité n'est pas obligatoire, même si elle peut se révéler utile dans certains cas.

II.3.2 Modèle magnétodynamique

La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes électromagnétiques couplés, en régime dynamique, en négligeant les courants de déplacement $\frac{\partial D}{\partial t}$.

Typiquement, un problème magnétodynamique est composé des parties suivantes (Fig.II.2) :

-des inducteurs dans lesquelles circulent des courants variables en fonction du temps et dans lesquelles aucun courant de Foucault n'est supposé développer.

-des régions composées des matériaux magnétiques saturables ou non-saturables qui sont supposées isolantes

-des conducteurs où peuvent circuler des courants induits

-une boîte d'air englobante

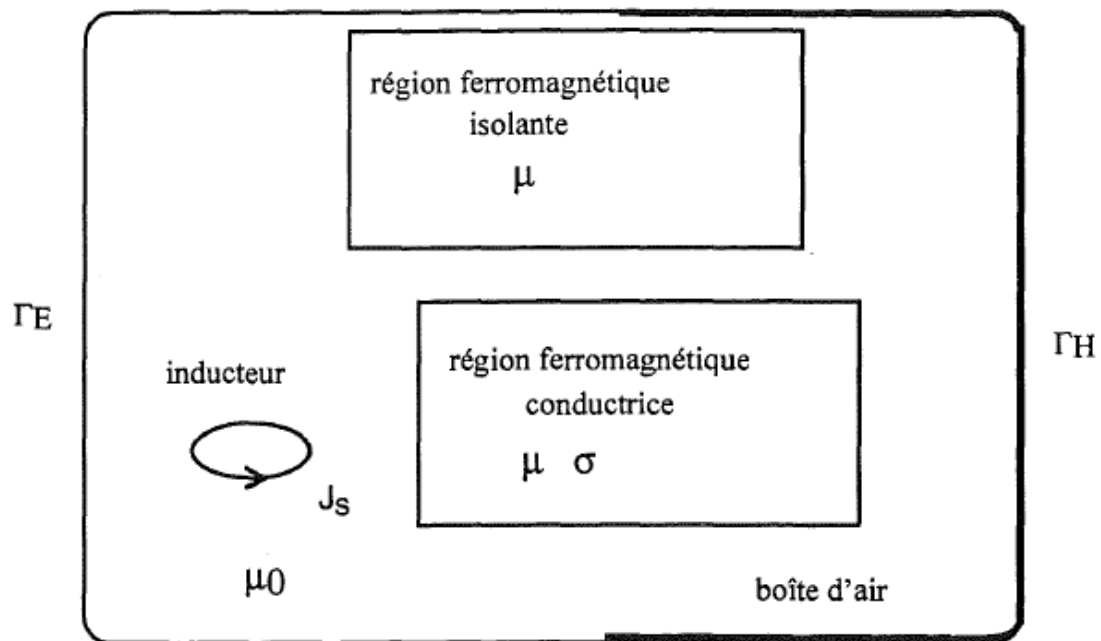


Fig. II.2 problème général magnétodynamique [27].

Les équations à considérer sont issues des équations de Maxwell, en négligeant le courant de déplacement. Elles s'écrivent :

$$\text{Rot}(H) = J \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Rot}(E) = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.32})$$

$$\text{div}B = 0 \quad (\text{II.33})$$

A ces équations s'ajoutent les lois :

$$B = \mu(H) \quad (\text{II.34})$$

$$J = \sigma E \quad (\text{II.35})$$

La densité de courant J peut se décomposer en deux parties, l'une J_s relative aux courants imposés, l'autre J_r due aux courants induits.

Les vecteurs du champ électromagnétique solution du système (II.31- II.35) sont unique si on spécifié les conditions suivantes [22] :

a) Une condition initiale :

$$H(t_0) = H_0 \quad (\text{II.36})$$

b) Les condition sur la frontière $\Gamma = \Gamma_H \cup \Gamma_E$

$$n \times E = 0 \text{ sur } \Gamma_E \quad (\text{II.37})$$

$$n \times H = 0 \text{ sur } \Gamma_H \quad (\text{II.38})$$

La condition (II.37) implique $n \cdot B = 0$ sur Γ_E et la condition (II.38) entraine $n \cdot J = 0$ sur la frontière du conducteur qui touche Γ_H .

II.3.2.1 Formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique

De meme qu'en magnétostatique, l'équation (II.33) permet l'introduction du potentiel vecteur magnétique A tel que :

$$B = \text{Rot}(A) \quad (\text{II.39})$$

En remplaçant (II.39) dans (II.32) on obtient l'expression du champ électrique E :

$$E = - \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } V \right) \quad (\text{II.40})$$

Où V est un potentiel scalaire électrique.

En introduisant (II.39) dans (II.31) en tenant compte des relations (II. 34 – II.35) on obtien :

$$\text{rot}(\nu \text{ rot } A) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } V \right) = 0 \quad (\text{II.41})$$

Qui constitue la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur, ou la formulation AV.

Dans les region non-conductrices, l'équation à résoudre s'écrit :

$$\text{rot}(\nu \text{ rot } A) = J_s \quad (\text{II.42})$$

conditions d'unicité

l'équation (II.41) et les conditions aux limites (II.37- II.38) réécrites en termes des potentiel A et V n'assurent pas l'unicité de la solution, même si $\text{rot } A$ est uniquement déterminé. Ainsi, une condition de jauge associée au potentiel vecteur doit être définie, soit en imposant la divergence de A soit en éliminant une composante de A . Les jauges les plus utilisées sont la jauge de coulomb, c'est-à-dire $\text{div} A = 0$ et la jauge de Lorentz, introduite par Riemann en 1861, i.e. $\text{div} A = -\mu\sigma V$. cette dernière présente l'avantage de découpler les équations des potentiel A et V .

II.3.2.2. Formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique modifié

On peut définir un potentiel vecteur modifié, noté A^* , tel que :

$$\frac{\partial A^*}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } V \quad (\text{II.43})$$

Par conséquent :

$$E = \frac{\partial A^*}{\partial t} \quad (\text{II.44})$$

Et la formulation (II.41) devient :

$$\text{rot} (\nu \text{rot } A^*) + \sigma \frac{\partial A^*}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.45})$$

qui constitue la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur modifié. On peut remarquer que si l'on prend la divergence de l'équation (II.45) on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\text{div} \sigma A^*) = 0 \quad (\text{II.46})$$

Et donc que si on considère une condition initiale nulle, on a :

$$\text{div}(\sigma A^*) = 0 \quad (\text{II.47})$$

il s'agit d'une jauge implicite dans (II.45) qui n'apparaît que dans les régions conductrices.

Cette jauge entraîne une continuité du produit de la conductivité par la composante normale du potentiel vecteur modifié A^* . Par conséquent, à la surface de séparation entre deux matériaux de conductivité différente, la composante normale de A^* est discontinue. Sa

composante tangentielle doit, par contre, rester continue afin d'assurer la continuité de la composante normale de B .

II.4. Méthode des éléments finis

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que les phénomènes électromagnétiques dans un domaine Ω de frontière Γ sont décrite à l'aide des opérateurs différentiels locaux, qui régissent la répartition spatiale des champs vectoriels. A ces opérateurs on associe des conditions aux limites, afin d'assurer l'unicité du champ magnétique et électrique.

En toute généralité, les problèmes peuvent se mettre sous la forme :

$$Lu = f \quad \text{dans } \Omega \quad (\text{II.48})$$

$$Bu = g \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{II.49})$$

Où L est un opérateur différentiel d'ordre n , B est un opérateur qui définit une condition à la limite, f et g sont des fonctions respectivement définies sur Ω et Γ , connues, et u est une fonction inconnue appartenant à un espace fonctionnel des solutions admissibles.

Pour pouvoir résoudre numériquement tout problème continu, il est nécessaire de passer par la formulation faible du problème, qui peut être soit en appliquant la méthode de Galerkin, soit en minimisant la fonctionnelle d'énergie associée au modèle physique. Les deux méthodes sont sensées donner le même résultat si l'opérateur L est auto-adjoint.

La méthode de Galerkin consiste à rechercher des fonctions u qui annulent la forme intégrale suivante :

$$F(u) = \int_{\Omega} w(Lu - f) d\Omega = 0 \quad (\text{II.50})$$

Pour toute fonction test ou de pondération w appartenant au même espace fonctionnel que l'espace des solutions admissibles.

Dans la forme intégrale (II.50) le problème physique est encore continu. La méthode des éléments finis consiste à rechercher une solution approchée u_h du système discret, en résolvant celui-ci dans un sous-espace U_h de dimension finie, de l'espace des solutions admissibles. La construction de l'espace U_h par la méthode des éléments finis passe tout d'abord par la subdivision du domaine d'étude par des éléments géométriques simples. L'espace U_h est alors constitué de fonctions d'approximation définies sur chaque élément géométrique. Ces

fonction sont généralement polynomiales, le plus souvent linéaires ou quadratiques, vérifiant les conditions de conformité de l'espace U_h .

II.4.1 Espace des solution admissibles [25] [26]

Dans le domaine Ω de calcul, l'énergie magnétique définie par :

$$W = \int_{\Omega} \frac{1}{2} H dB \quad (II.51)$$

Est finie.

D'autre part, on sait que la dissipation par effet joule dans un matériau conducteur de résistivité ρ donnée par l'expression :

$$P = \int_{\Omega} \rho J^2 d\Omega = \int_{\Omega} \rho (\text{rot} H)^2 d\Omega \quad (II.52)$$

est aussi finie

ceci impose des conditions sur l'espace dans lequel on va chercher les solutions.

Si l'on note :

$$L^2(\Omega) = \{ W \in \Omega ; \int_{\Omega} |W|^2 d\Omega < \infty \} \quad (II.53)$$

L'espace des fonction vectorielles à valeurs complexes de carré du module sommable, le champ magnétique H peut être recherché dans l'espace Hilbert suivant :

$$H(\text{rot}) = \{ W \in L^2(\Omega) ; \text{rot} W \in L^2(\Omega) \} \quad (II.54)$$

Par ailleurs, B peut être recherché dans l'espace :

$$H(\text{div}) = \{ W \in L^2(\Omega) ; \text{div} W \in L^2(\Omega) \} \quad (II.55)$$

Tenant compte de la relation de définition du potentiel vecteur magnétique, c'est-à-dire ,

$$B = \text{rot} A, \text{ il en résulte que } A \text{ doit être recherché dans l'espace } H(\text{rot}).$$

Une propriété fondamentale des fonctions des espaces $H(\text{rot})$ et $H(\text{div})$ est qu'elles sont à composantes tangentielles continues et respectivement à composante normale continue sur le domaine Ω de définition.

II.4.2. Élément géométriques

Un maillage d'un domaine est représenté par un ensemble d'éléments géométriques (Fig.II.3) pouvant être des tétraèdre, des hexaèdre, des prismes et des pyramides. A ce maillage on associe quatre types d'entités géométriques : les volumes, les facettes, les arêtes et les nœuds. Le maillage est appelé conforme quand l'intersection de deux éléments est soit une facette, soit une arête ou un nœud, ou bien ils sont disjoint.

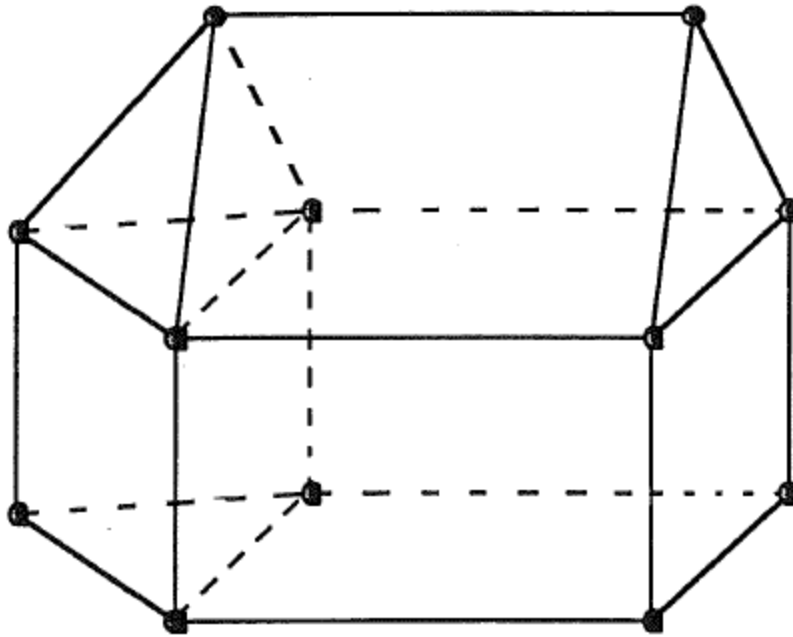


Fig. II.3 Eléments géométriques [27].

II.4.3 Fonction d'interpolation

Sur chaque élément géométrique on peut construire des fonctions d'interpolation, qu'on résume dans le tableau II.1. Pour chaque type d'interpolation, on précise les propriétés des fonctions d'interpolations et les entités géométriques sur lesquelles elles s'appuient.

Type d'interpolation	Propriétés	Entité géométrique
nodale	continuité de la fonction interpolé	noeud
conforme dans $H(\text{rot})$ ou d'arête	continuité de la composante tangentielle	arête (facette et volume pour les ordres supérieurs)
conforme dans $H(\text{div})$ ou de facette	continuité de la composante normale	facette
volume	discontinuité de la fonction interpolé	volume

Tableau II.1 Propriétés de différents types d'interpolation[27].

L'utilisation rationnelle de ces éléments satisfait naturellement la continuité requise des différents variables scalaire et vectorielles. Ainsi, pour interpoler les potentiels scalaires, magnétique ou électrique, on va utiliser les éléments nodaux. par contre, si on a des variables vectorielles de types champ ou potentiel vecteur, il est plus naturel d'utiliser les éléments mixte conforme dans $H(\text{rot})$. Les éléments de facette, quand à eux, peuvent être utiles pour interpoler l'induction électrique ou magnétique, est les éléments de volume pour interpoler une variable de type densité de charge.

II.5. conclusion

Au cours de ce chapitre, après avoir présenté les équations qui régissent les phénomènes électromagnétiques dans le cadre de l'approximation macroscopique, on a vu qu'elles peuvent être simplifiées à travers des hypothèses simplificatrices mieux adaptées aux méthodes numériques.

Le passage de modèle physique continu au modèle discret se fait par l'application de la méthode des éléments finis qui est basée sur le processus de discrétisation de l'espace des solution admissibles à l'aide des fonctions construite sur éléments finis.

III.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous proposons pour application l'alternateur à griffe sur lequel le modèle magnétodynamique sera testé avec le logiciel Maxwell 3D. Dans ce cadre, nous étudions le comportement électromagnétique de tout le système. En matière résultats, le flux magnétique, induction magnétique et la tension dans les trois phases sont présentés et discutés.

III.2 Description de logiciel maxwell

Maxwell est un logiciel de simulation de champ électromagnétique utilisé pour la conception et l'analyse de structures 3D / 2D, telles que moteurs, actionneurs, transformateurs et autres dispositifs électriques et électromécaniques communs aux systèmes automobiles, et industriels. Basé sur la méthode des éléments finis (FEM), Maxwell résout avec précision les champs électromagnétiques et électromagnétiques statiques, fréquentiels et temporels

III.3 Exploitation de logiciel de calcul numérique maxwell 3D

Maxwell 3D est un logiciel conçu pour résoudre des problèmes électromagnétique en tridimensionnel par la méthode des éléments finis, les étapes nécessaires pour analyser un problème sous maxwell 3D sont les suivantes :

- Choisir le modèle du calcul (magnétique ou électrostatique).
- Choisir le plans de travail [x, y, z] en coordonnées cartésiennes.
- Introduire les dimensions géométriques des différentes parties de la machine.
- Affecter les matériaux des différentes parties de la machine.
- Affecter les conditions aux limites du domaine d'étude.
- Affecter les sources de courant.
- Choisir les grandeurs à calculer.
- Choisir un maillage adéquat au calcul.
- Lancer la résolution.

III.4 Structure de la machine à griffe

L'étude de cette machine se fait en 3D vu la complexité de sa géométrie. Les différents paramètres géométriques sont mesurés à l'aide de pied à coulisse sur la machine de laboratoire de construction machine électrique. Elle contient 36 encoches et 12 pôles, de section identique. Les dimensions principales et les paramètres de la machine sont donnés dans le tableau suivant :

Paramètre	Symbole	Valeur et unité
Nombre d'encoche statorique	Z_1	36
Nombre de paire de pôles	P	6
Diamètre interne de stator	$D_{int s}$	93.3 mm
Diamètre externe de stator	$D_{ext s}$	125.2 mm
Diamètre interne de rotor	$D_{int r}$	92.45 mm
Diamètre externe de rotor	$D_{ext r}$	17.1 mm
Longueur de circuit magnétique	L_{CM}	30.75 mm
Hauteur d'ouverture d'encoche	H_{s0}	0.5 mm
Hauteur de cale d'encoche	H_{s1}	1 mm
Hauteur de l'encoche statorique	H_{s2}	10.45 mm
Largeur de bas d'encoche	B_{s2}	6.5 mm
Longueur maximale de la cale d'encoche	B_{s1}	4.5 mm
Longueur d'ouverture d'encoche	B_{s0}	3.4 mm
Longueur de pole	L_p	36.1 mm

Tableau III.1 : les paramètres de la machine.

D'après les relevés on a constaté que la machine à griffe a un bobinage ondulé, la figure suivante représente le type de bobinage :

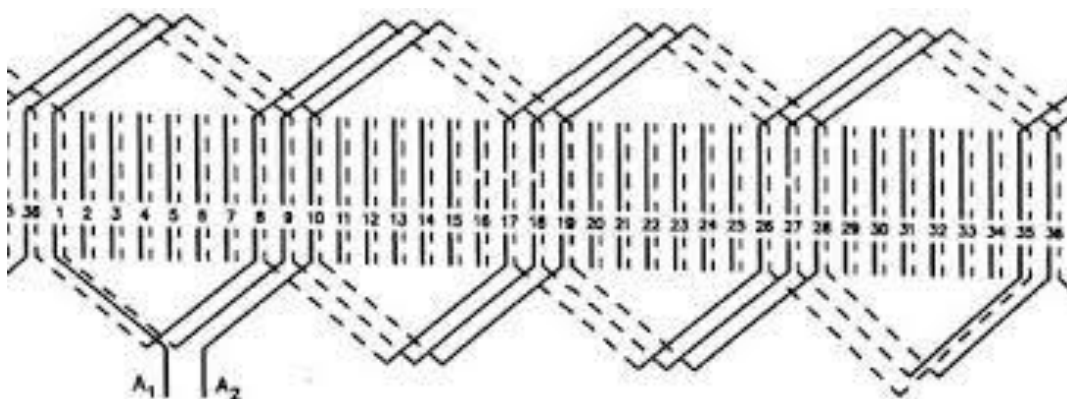


Fig. III. 1 : Schéma de bobinage de stator.

III.4.1 Stator

Le stator est réalisé à l'aide de tôles feuilletées afin de limiter la propagation des courants de Foucault. Avec 36 encoches, trois enroulements triphasés (phase A, C et B). Pour chaque bobine ondulée ont associé une encoche, le nombre de conducteur est 12.

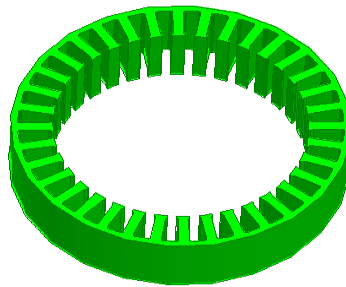


Fig.III.2 : stator de la machine.

III.4.2 Rotor

A pôle saillant en matériaux magnétique, avec 12 griffes qui sont les pôles de la machine, et une bobine d'excitation à l'intérieur.

Sa géométrie engendre des lignes des champs qui évoluent en 3D (selon l'axe tangentiel, axial et radial de la machine).

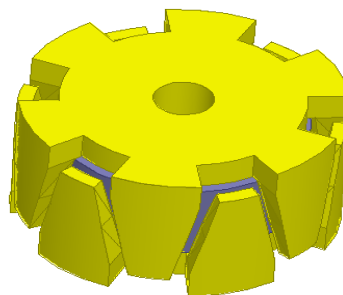


Fig.III.3 : rotor de la machine.

III.4.3 Bobine rotor :

La bobine rotorique se trouve à l'intérieur de rotor qui a un diamètre de 93.2 mm, nombre de spire de l'enroulement est 350 spires. Sa résistance est de 2.7 ohms. On a excité l'enroulement rotorique par un courant de 4A. Le matériau utilisé est un acier. la figure ci-dessous représente la bobine rotorique.

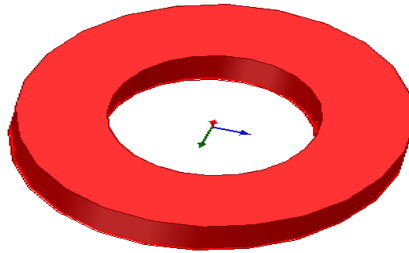


Fig.III.4 : la bobine rotorique.

III.4.4 L'enroulement statorique :

Le stator contient trois enroulements déphasés de 120° , la nature de l'enroulement est ondulé (Phase A, C e B). Le matériau utilisé est le cuivre. La figure ci-dessous représente une vue à un seul enroulement statorique.



Fig.III.5 : Un seul enroulement statorique.

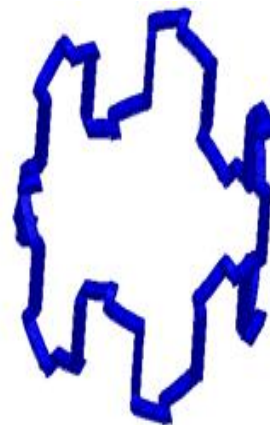


Fig.III.6 : une phase de stator.

Le schéma de la bobine statorique avec trois phases est présenté comme suit :

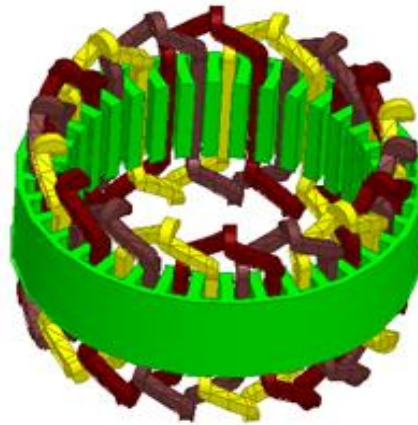


Fig.III.7 : Les trois enroulements statorique.

III.4.5 Modèle complet

Le modèle complet d'étude est représenté par la figure ci-dessous

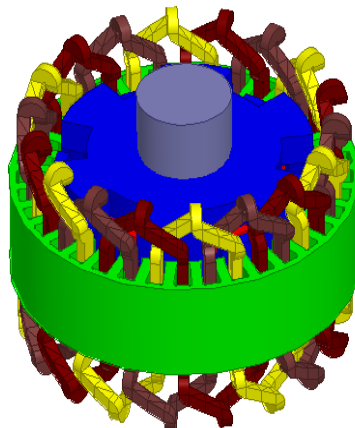


Fig.III.8 : modèle complet d'alternateur à griffe.

III.5 Réduction du modèle d'étude

Afin de réduire le temps de calcul, pour tirer l'avantage de la périodicité géométrique de la machine, nous avons limité le domaine d'étude à $\frac{1}{6}$. Le modèle est représenté par la figure suivante :

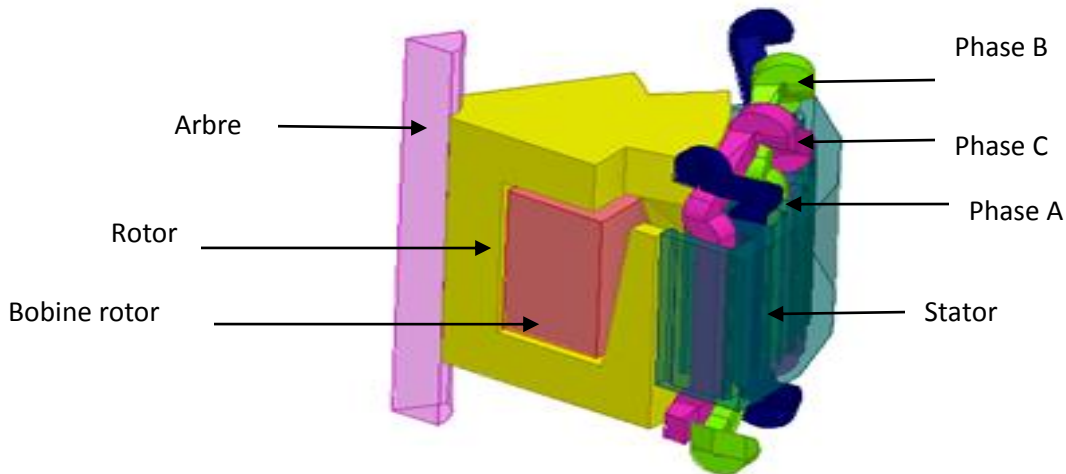


Fig.III.9 : Le modèle réduit sans la boîte d'air.

III.5.1 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont fixées par la méthode de la boîte infinie. Dans ce cas, c'est Maxwell 3D qui impose directement des valeurs de potentiels magnétiques et électriques nuls sur les bords extérieurs du domaine d'étude. Des conditions cycliques ont été imposées sur les plans de symétrie.

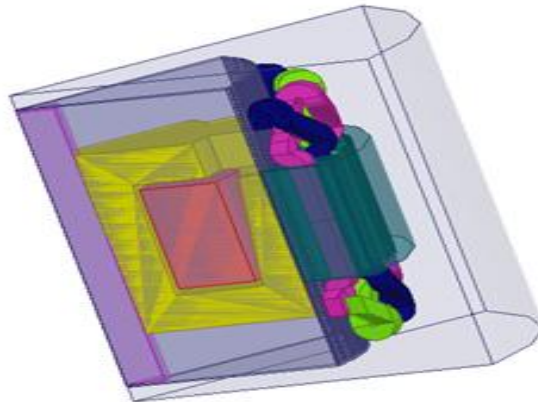


Fig.III.10 : le modèle avec la boîte d'air.

III.5.2 Le maillage

Le maillage d'une géométrie 3D est une tâche délicate notamment si l'on souhaite réaliser des optimisations. Il faut trouver le bon compromis entre précision et temps de calcul tout en assurant la convergence quelque soit la géométrie. Le maillage soumis à des

conditions cycliques ce qui permet d'assurer un maillage identique sur les plans de symétrie opposés. Le nombre d'élément du second ordre est de l'ordre 63955 éléments.

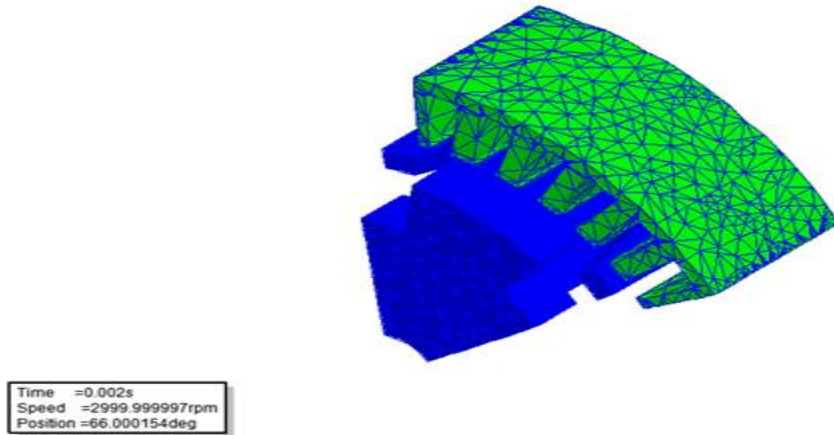


Fig.III.11: Maillage de l'alternateur à griffe.

III.5.3 Matériaux magnétiques

Nous avons attribué à la région volumique «rotor» on a tout d'abord la courbe de B(H) de l'acier "1008" et pour la région «stator» une nuance des alliages fer_silicium «M19_29G».

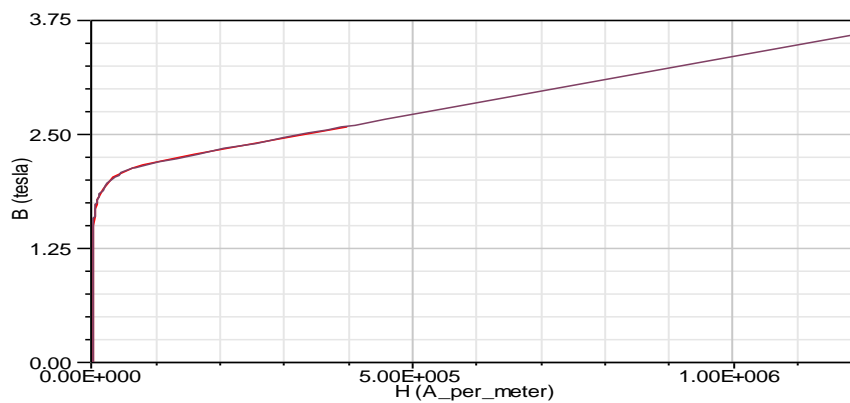


Fig.III.12 : B=f(H)

III.6 Résultat et interprétation

La courbe suivante représente le flux magnétique dans les trois phases de l'alternateur.

Pour $N=1500\text{tr/min}$, $I=3.7\text{(A)}$

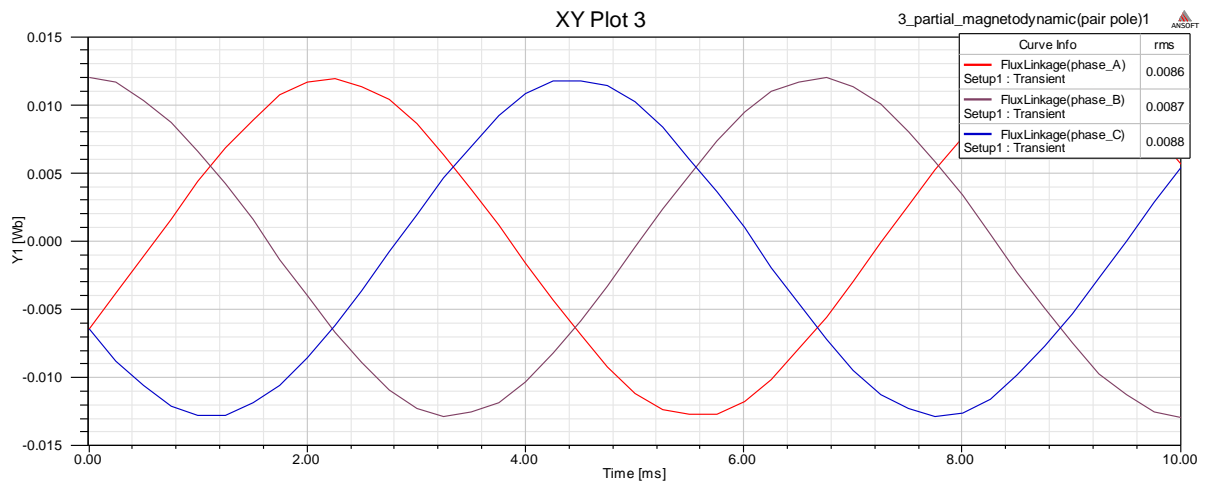


Fig.III.13 : Le flux magnétique dans les trois phases de la machine.

La figure III.13 présente le flux magnétique à vide pour la machine soumise à un courant excitatrice de 3.7 A et une vitesse de rotation de 1500tr/min. On remarque que les formes d'ondes sont sinusoïdales et sa période est égale 6.7ms.

Les tensions dans les trois phases sont présentées par la figure III.14.

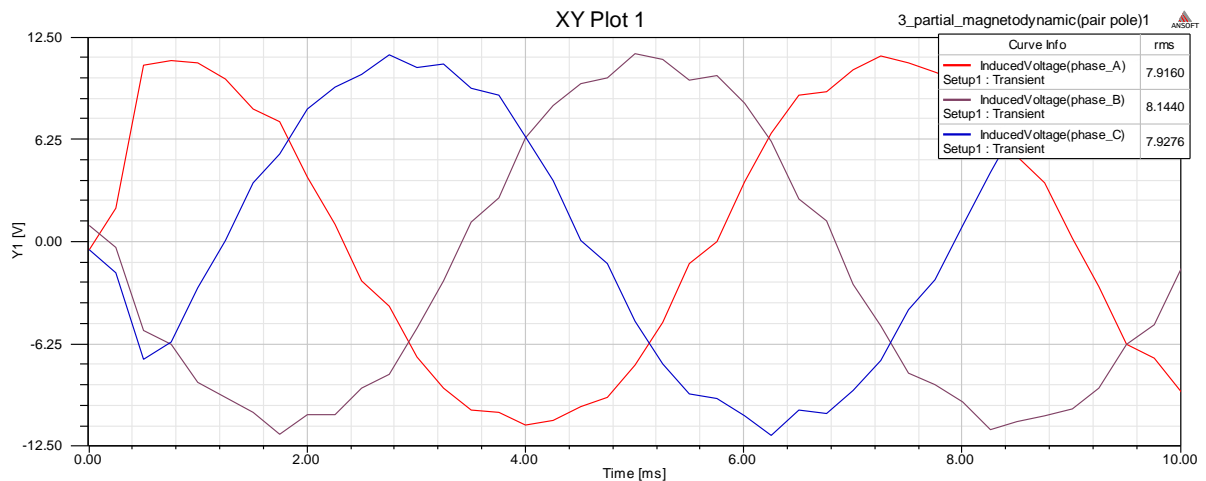


Fig.III.14 : la tension dans les trois phases de la machine.

D'après la courbe issue de la simulation la période égale à 6.66 ms. La perturbation de l'allure de la courbe de la tension dans les trois phases est due au maillage.

Pour $N=3000\text{tr/min}$; $I=4(\text{A})$



Fig.III.15 : Le flux dans les trois phases de la machine.

Les courbes ne sont pas vraiment lisses, la raison on est que le maillage est certainement très grossier, réduire le pas de temps permettre également d'améliorer la douceur de la courbe.

La courbe suivante représente la tension induit dans les trois phases

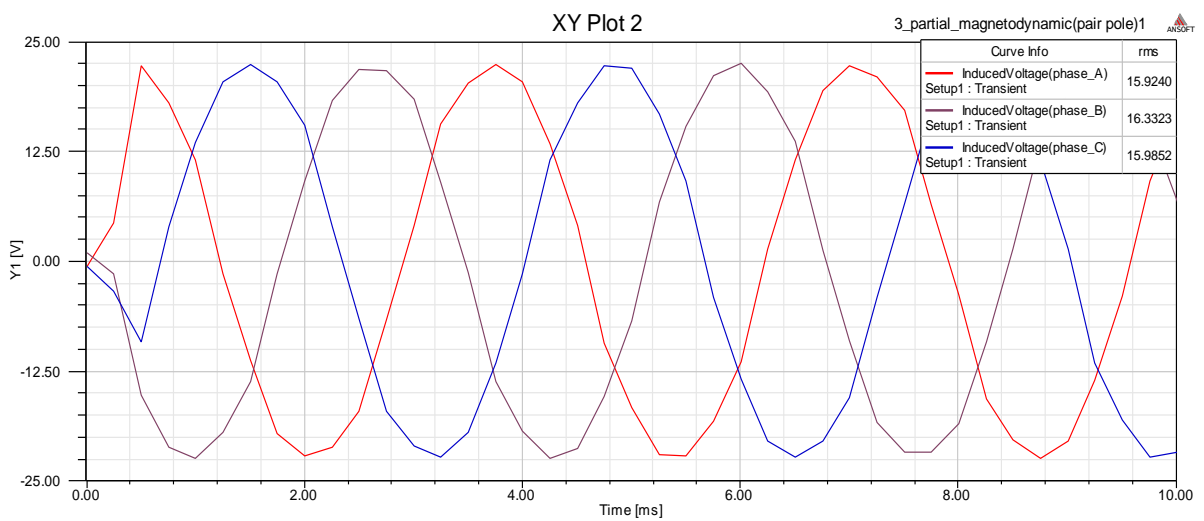


Fig.III.16 : la tension induit aux bornes des trois phases de la machine.

La courbe de la tension induit aux bornes des trois phases est justifiable on la comparons aux résultats donnés par la littérature.

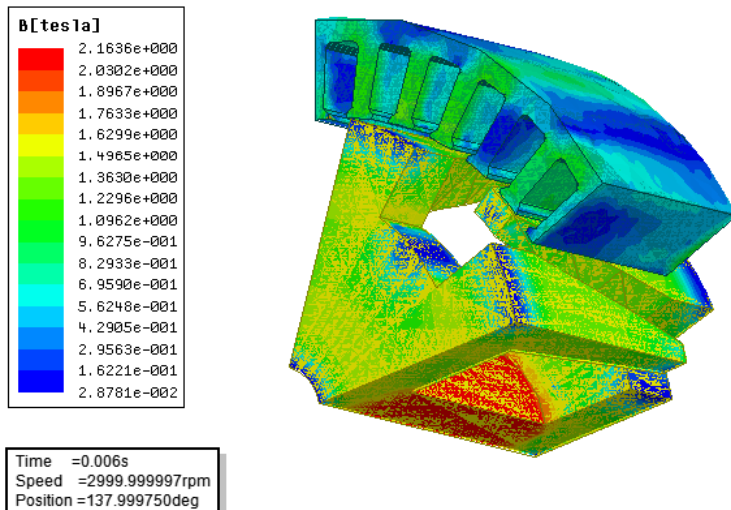


Fig.III.17 : L'induction dans la machine à griffe.

On remarque que l'induction magnétique est très élevée dans la bobine rotorique cela est dû au mouvement de rotor et l'induction statorique est moins forte dans les griffes. Les deux résultats justifient le modèle magnétodynamique.

III.7 Partie expérimentale

Au niveau du laboratoire de construction électrique on a effectué un essai à vide, dans cette essai on a fixé la tension nous avons varié la fréquence pour atteindre vitesse 1500tr/min et une vitesse 3000tr/min, pour les différentes valeurs de courants on a mesuré la valeur efficace de dans l'inducteur.

III.7.1 Schéma bloc

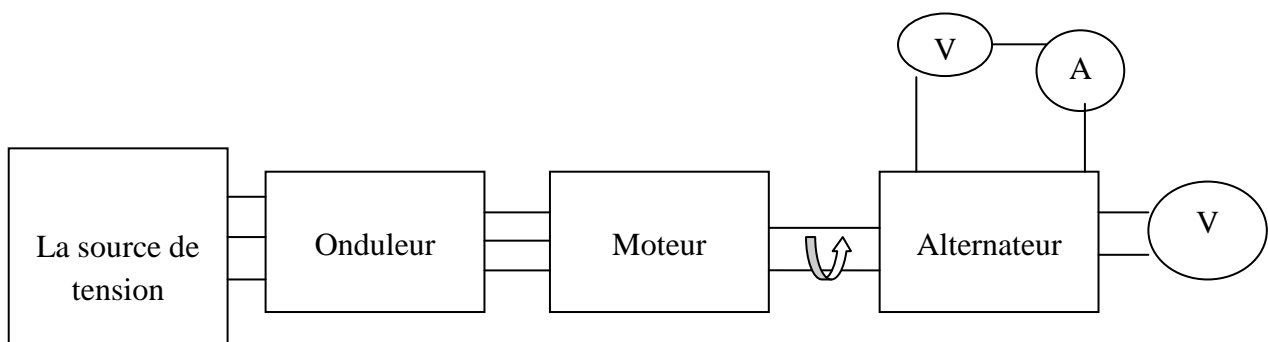


Fig.III.18 : Schéma électrique de l'essai à vide.

Le matériel utilisé

- La source de tension alternative.

- L'onduleur, Ampèremètre, Voltmètre, Moteur, Alternateur.



Fig.III.19 : le matériel de l'essai expérimental.

Les résultats de l'essai expérimental sont donnés dans le tableau ci-dessous.

N (tour/min)	3000	1500
I(A)	4	3.7
F(Hz)	50	25
V(v)	15.8	7.8

TableauIII.2 résultats de l'essai à vide.

N(tour/min)	3000	1500
I(A)	4	3.7
V(v)	15.9	7.9

TableauIII.3 résultat de simulation.

d'après les résultats obtenus expérimentalement sont des valeurs approcher aux valeur obtenu par la simulation

III.8 Confrontation des résultats Simulation-expérimental

La valeur de la tension efficace est presque identique pour les deux méthodes présentées. La simulation traduit le phénomène étudié d'une manière assez satisfaisante.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les résultats des deux méthodes. La confrontation des résultats obtenus montre l'efficacité de la simulation tridimensionnelle avec le logiciel Maxwell 3D pour un alternateur à griffe.

Conclusion générale

Ce travail de mémoire a pour but de simuler le comportement électromagnétique d'un alternateur à griffe en basant sur la formulation magnétodynamique, pour le faire deux méthodes ont été adoptées : la méthode expérimentale et la méthode numérique.

En premier lieu, une simulation avec le logiciel Maxwell 3D a été faite pour résoudre des problèmes électromagnétique en tridimensionnel par la méthode des éléments finis.

En deuxième lieu, la méthode expérimentale a été faite au niveau de laboratoire de construction électrique on a effectué un essai à vide, dans cette essai on a fixé la tension, nous avons varié la fréquence pour atteindre vitesse 1500tr/min et une vitesse 3000tr/min, pour les différentes valeurs de courants et on a mesuré la valeur efficace de dans l'inducteur.

Enfin, une comparaison des résultats issus des deux méthodes a été faite pour pouvoir justifier l'apport de la simulation numérique de modèle magnétodynamique proposé.

L'étude comparative met en avant les performances et le potentiel industriel de la machine à griffes. Ce que soit au niveau du rendement ou de l'encombrement, elle mérite que l'on s'intéresse à sa technologie et les points à améliorer.

Les perspectives à donner à ce travail sont nombreuses :

- Tout d'abord, il semblerait intéressant de valider l'étude réalisée sur la structure d'un alternateur à rotor bobiné.
- En ce qui concerne les pertes fer de la machine à griffes, nous pourrions réaliser une étude complémentaire à plus haute vitesse, afin de valider la tendance observée à 12000 tr/min. Cette étude pourra également être complétée par une étude à plus faible puissance utile et plus faible vitesse.
- Nous pourrions également réaliser des essais complémentaires, afin de les coupler à des calculs éléments finis de pertes fer et ainsi aboutir à une meilleure visualisation des pertes fer stator/rotor.

Nous avons donc proposé des machines électriques performantes dans la gamme de moyenne puissance. En perspective, le but final est de continuer l'étude de ce genre de machines d'en

approfondir la connaissance de son fonctionnement, son comportement et de mieux maîtriser la physique de nouveaux matériaux pour aboutir à une machine à griffes commercialisable.

Références bibliographiques

[1]**Liva Eric Radaorozandry**, « conception et optimisation des machines synchrones avec des modes analytique en tenant de la saturation magnétique », mémoire présentée à la faculté des études supérieur de l'université Laval, Québec, 2007.

[2]**Zaidi Fares**, « modélisation des machine synchrones à double excitation », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master en génie électrique, de l'université de Mohamed Boudiaf M'Sila, 2015/2016.

[3]**Christian Belalahy** « dimensionnement d'une machine synchrone reluctance à excitation homopolaire par réseaux de permanence », thèse présentée à l'institut nationale polytechnique de Lorraine ,14 novembre 2008.

[4]**Floran Martin** « contribution au dimensionnement optimale de machine synchrone à aimant déposés en surface pour application à haute vitesse », », thèse de doctorat présentée en vue de l'obtention du garde de docteur de l'université de Nantes, université de Nantes le Mans, le 16 avril 2013.

[5] **J.F.Gieras et U.Jonsson**, « Desing of high speed permanent magnet brushless generator for microturbine », in International Conference on Electrical Machine, 2004.

[6] **Michel Hecquet**, « Contribution à la modalisation des systèmes électrotechniques par les méthodes des schémas équivalents magnétiques application à l'alternateur automobiles », thèse de doctorat présentée à l'université des sciences et technologie de Lille, le 16 janvier 1995.

[7]**M. Alejandro Fernandez Sanchez**, « Etude de structure des machines électriques non conventionnelles pour des alternateurs industriels », thèse de doctorat de l'université Paris Saclay préparée à Centrale Supélec le 16 décembre 2016.

[8] **Afsharnia Saeed** « Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimant permanents : identification des paramètres et minimisations des ondulations de couple », thèse présentée à l'Institut Nationale Polyecmique de Lorraine, Iran, le 27 Avril 1995.

[9]**P.Brissonneau, L.Brugel, A.Kiener, J.P.Yonnet** : « nouvelles structure de moteur à aimants permanents »R.G.E, Octobre 1984.

Références bibliographiques

[10] **SYLVAIN PEREZ** : « contribution au dimensionnement optimale d’alternateur à griffe sans aimants apport des alliages FeCo», thèse université de Grenoble ,25novembre 2013.

[11]**LILYA BOUARROUDJ** : « Contribution à l’étude de l’alternateur à griffes application au Domaine automobile »thèse institut nationale polytechnique de Grenoble ,18 Novembre 2005.

[12]**LAURENT ALBERT** : « Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes application au domaine automobile », thèse institut nationale polytechnique de Grenoble, 13 Juliet 2004.

[14] **TAMTO MEDAM Yolande** : (Détermination des paramètres d’une machine à griffe Application au domaine automobile » thèse institut nationale polytechnique de Grenoble ,19Décembre 2008.

[15] **Anthony Gimeno** : « Contribution à l’étude d’alternateurs automobiles : caractérisation des pertes en vue d’un dimensionnement optimal », thèse de doctorat, de l’Université de Technologie de Compiègne en Technologie de l’Information et des Systèmes, le 11 Février 2011.

[16] **Mr.Bskri Zakaria et Mr.Itatahine Abdeslam** : « étude et dimensionnement d’un moteur synchrone à aimant permanent à rotor intérieur pour application véhicule », mémoire de master, université de Khemis Miliana ,2014/2015.

[17] **Mechel Hecquet** : « Contribution à la modalisation des systèmes électrotechnique par la méthode des schémas équivalant magnétiques. Application à l’ alternateur automobile », thèse présenté à l’ université du Lille, le 16janvier 1995.

[18] **Jérémie lutun** : « modélisation thermique des alternateurs automobiles », thèse institut polytechnique de Grenoble, 19 janvier 2012.

[19]**Straton J.A.**, « Electromagnetic theory », McGraw-Hill Book Company, Now York, 1941.

Références bibliographiques

- [20] **Timontin A.**, «Lectii de bazel electrotehnicii », Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti 1962.
- [21] **Mocanu C.I.**, «teoria campului electromagnetic » , Editura didactica si pedagogica, Bucuresti 1991.
- [22] **Rdulte R., Tugulea A., Timotin Al.**, « Teoreme de unicitate pentru regimuri variabile ale campului electromagnetic », Rev. Roumaine de sciences Technique Electrotechnique et énergétique, Vol. 21, pp. 109-123, 1971.
- [23] **Biro O., Preis K.**, « On the Use of the magnetic vector potentiel in the finite element analysis of three dentionnal eddy currents », IEEETransactions on magnetic, Vol.25,NO.4 PP.3145-3159,July 1989.
- [24] **Albanese R., Rubinacci G.**, « Magnetostatic field computation in terms of two component vector potentiel », International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.29, pp.532, 1990.
- [25]**Bossavit A.** , «Electomagnétitisme,en vue de modélisation » ,Springer-Verlag,Paris,1993.
- [26]**Bossavit A.**, « Edge elements for Magnetostatics »,International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks,Devices and Fields,Vol.9 ,pp.19-34 ,1996.
- [27] **Cristian GOLOVANOV** « Devloppement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique :application à simulation de dispositis électromagnétiques en mouvements».27 octobre 1997.

Notice d'utilisation de logiciel Maxwell

Le logiciel Maxwell permet de résoudre des problèmes magnétique est électrique, pour faire étudier un dispositif avec ce logiciel on doit faire les étapes suivantes :

Après avoir lancé le programme une fenêtre

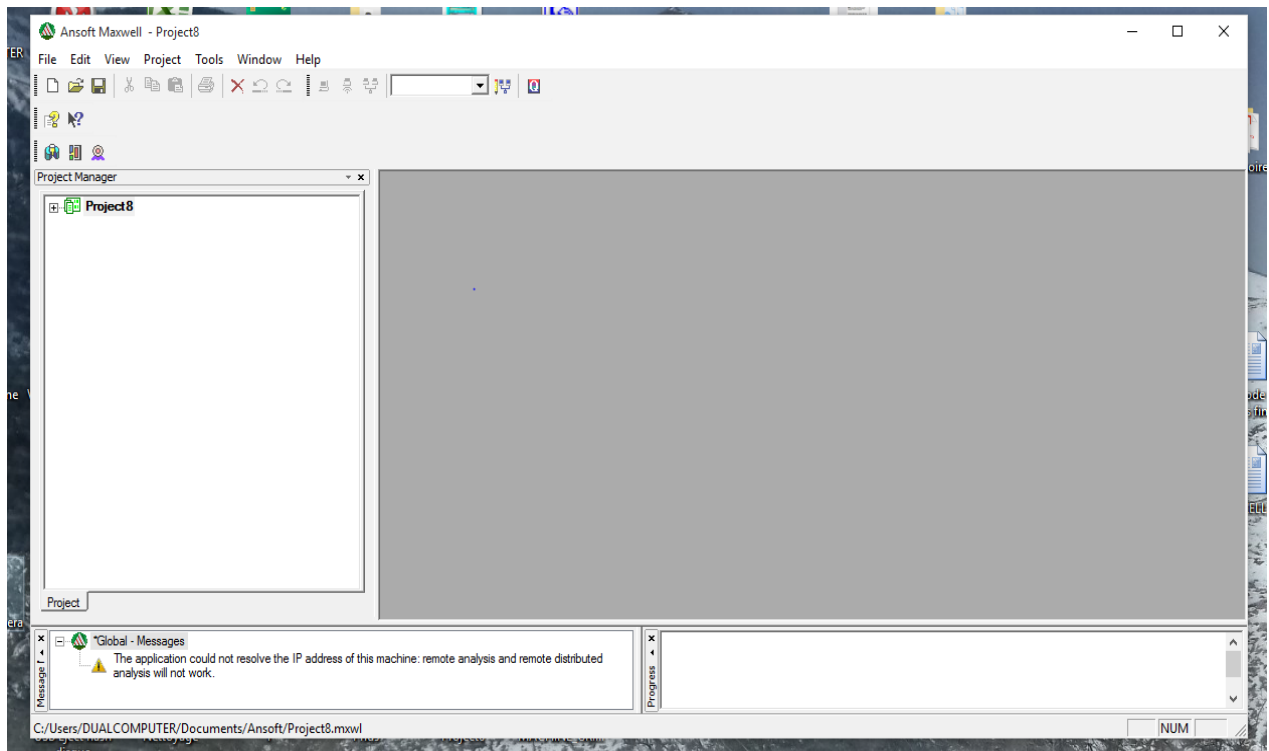



Fig. A.1 : une fenêtre vide avec une barre de menu minimale.

➤ Choisir type de maxwell à étudier par :

- Sélectionner l'icône suivante  pour accéder au Maxwell 3D.
- Ou bien par projet de la barre de menu.

Après avoir ce choix une fenêtre affichée avec une barre de détail.

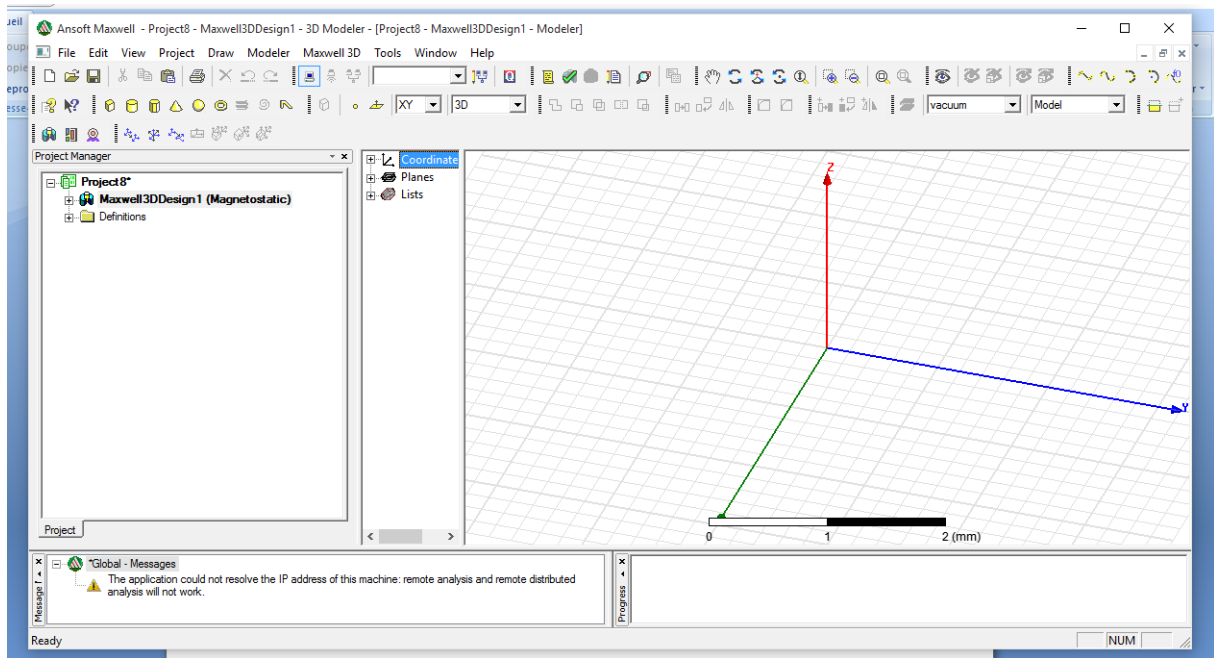


Fig. A.2 : fenêtre représente un plan d'étude de notre dispositif avec toutes les fonctions de besoin.

➤ **Domain d'étude**

Il existe plusieurs domaines d'étude, on le sélectionner à partir de Maxwell 3D/2D → solution type

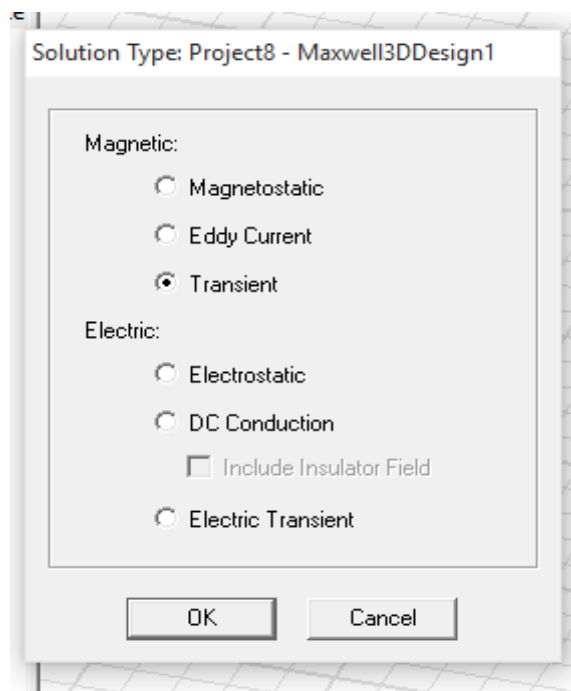


Fig. A.3 : les domaines en 3D

➤ La géométrie étudiée

Dans ce logiciel on peut étudier n'importe quelle géométrie et pour notre cas on suit les étapes suivantes :

- Pour le stator

Draw → User → Defined primitive → Suslib → RMxprt → SlotCore.

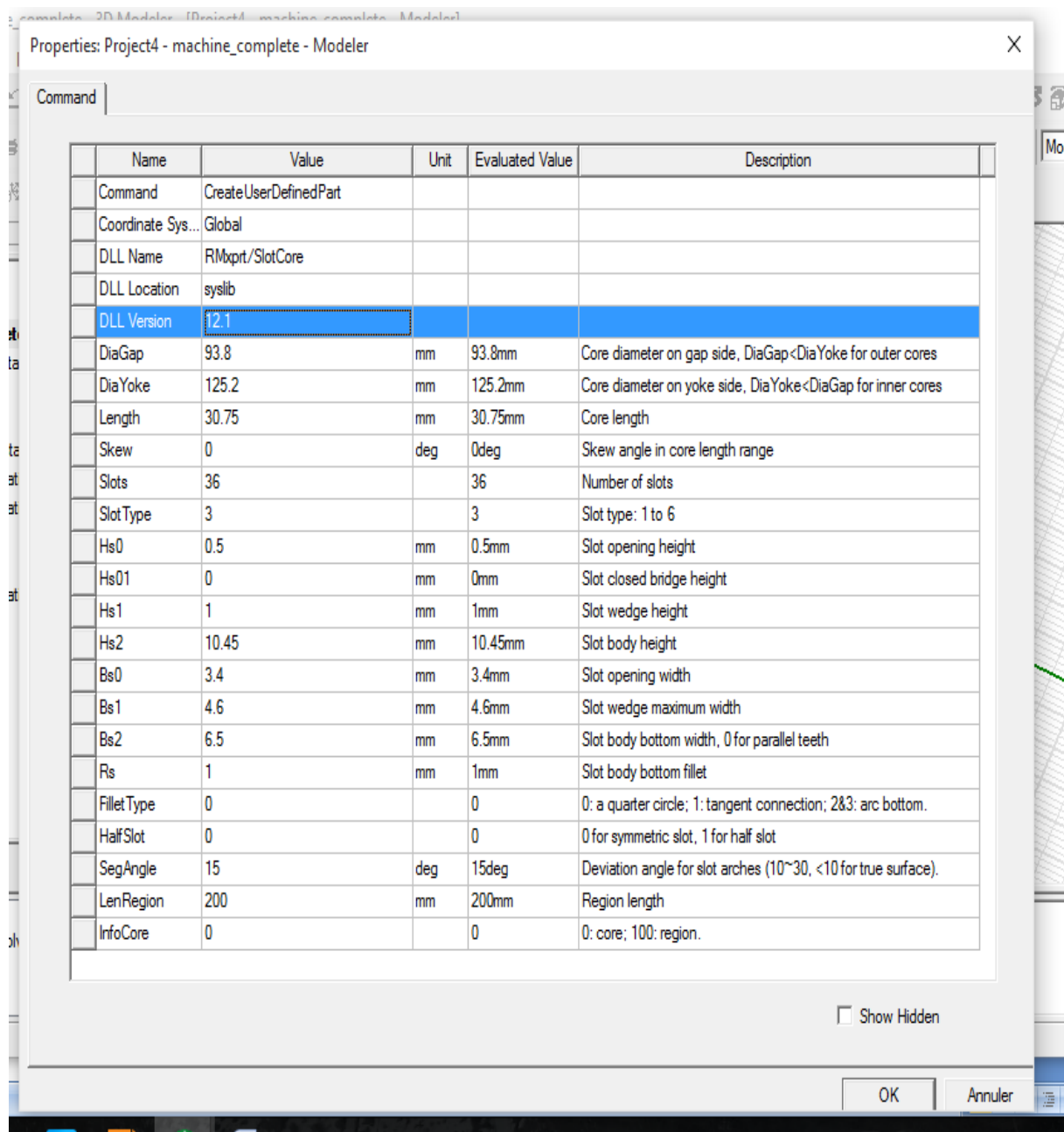


Fig. A.4 : Les paramètres de stator.

- Pour le rotor

Draw → User → Dified primitive → Suslible → RMxpirt → clawpolcore.

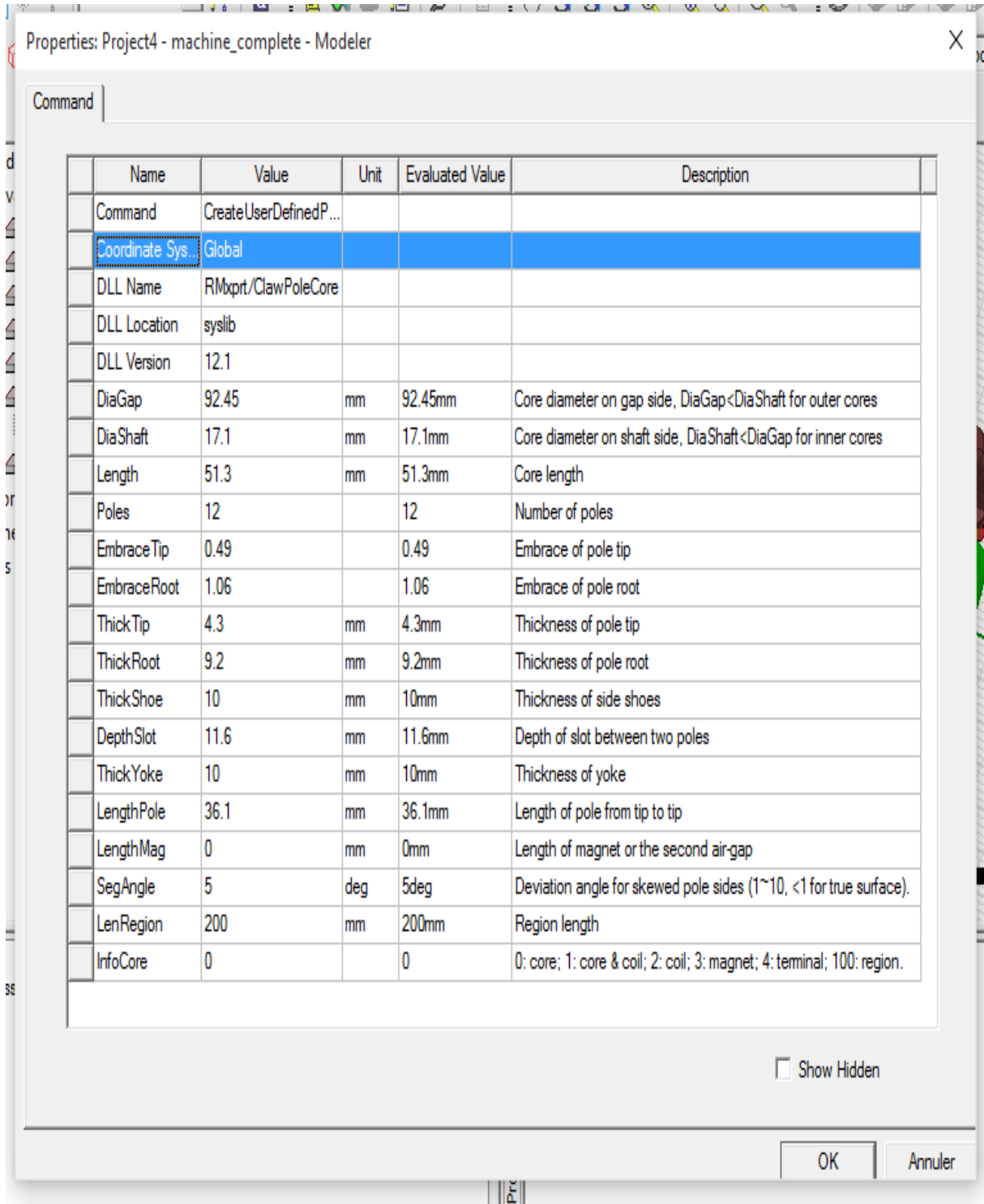


Fig. A 5 : Les paramètres de rotor

➤ Pour les bobines :

Draw → User → Dified primitive → Suslible → RMxpirt → Lap coil.

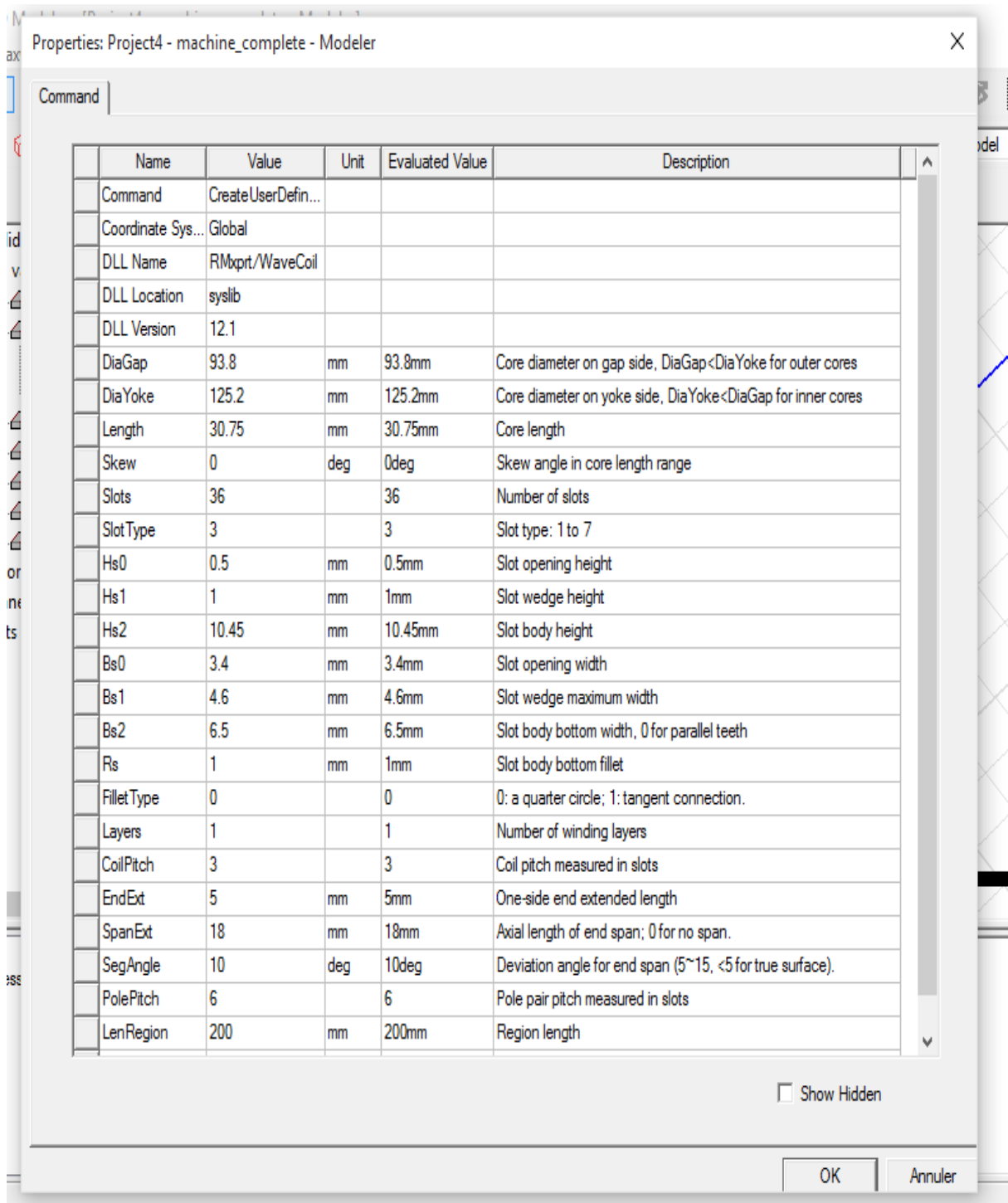


Fig. A 6 :les paramtre d'une bobine.

➤ **Les region d'air**

- Pour le rotor, stator, l'arbre et les bobines

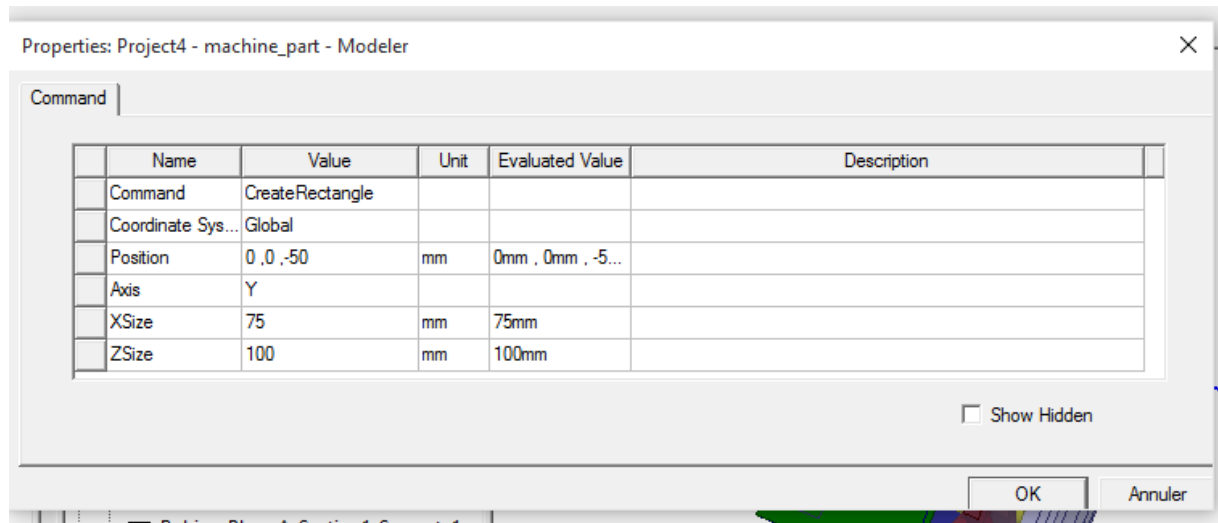


Fig. A 7 : paramètre de la région d'air pour le rotor, stator, l'arbre et les bobines.

- Pour le rotor l'arbre et la bobine rotorique

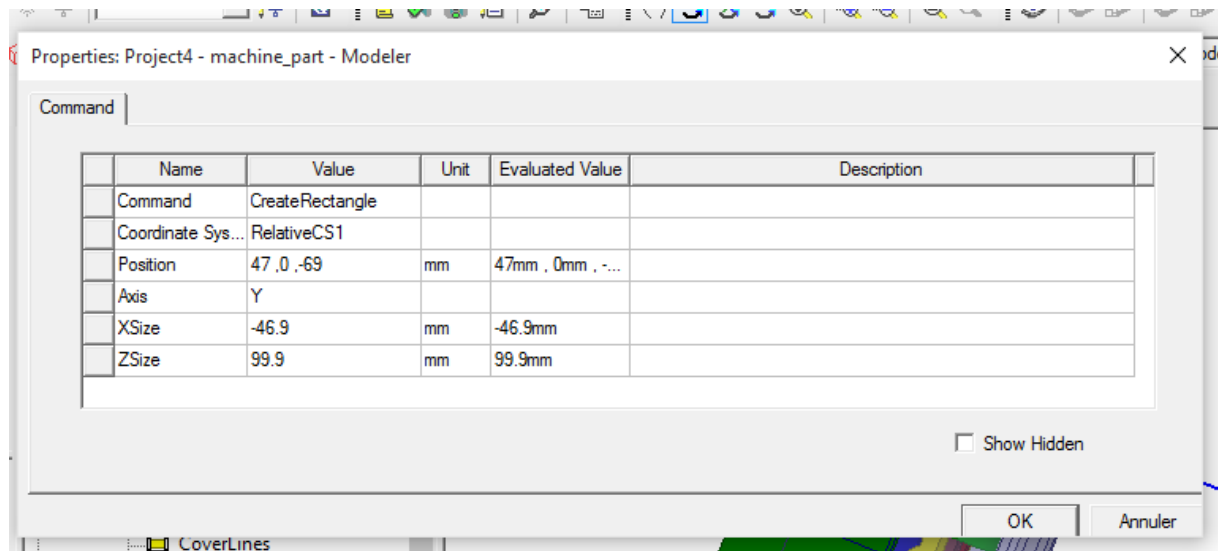


Fig. A 8 : parametre de la partie tournante

➤ **Affectation des materiaux**

La bibliothèque de logiciel a des type

➤ Condition aux limites

On applique les conditions aux limites selon le dispositif, dans notre cas en 3D on a pris 1/6 du dispositif.

Type d'encoche

La géométrie de l'encoche de l'alternateur étudié est la suivante :

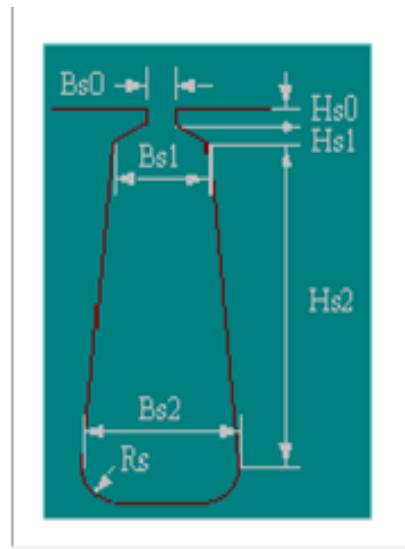


Fig : représente type d'encoche étudié

Les mots clés

Machine à griffe, équation de maxwell, méthodes de résolutions, éléments finis, système électromagnétiques.

Résumé

Ce travail de mémoire a pour but de simuler le comportement électromagnétique d'un alternateur à griffe en basant sur la formulation magnétodynamique, pour le faire deux méthodes ont été adoptées : la méthode expérimentale et la méthode numérique.

En premier lieu, une simulation avec le logiciel Maxwell 3D a été faite pour résoudre des problèmes électromagnétique en tridimensionnel par la méthode des éléments finis.

En deuxième lieu, la méthode expérimentale a été faite au niveau de laboratoire de construction électrique on a effectué un essai à vide.