

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Electrotechnique
Spécialité Machine électrique

présenté par

Maguemoun Ryma

&

SOUABER Ihab Abdelmadjid

Effet des paramètres géométriques sur le rendement de l'alternateur à griffes

Proposé par : Mme Brahimi.N

Année Universitaire 2019-2020

Nous tenons à exprimer tout d'abord nos profonds remerciements à « Allah » le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la patience afin d'accomplir ce travail à terme.

Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à notre promotrice Mme.Brahimi.N pour son aide, sa gentillesse, sa disponibilité, et son suivie qui n'a pas cessé de nous encourager jusqu'à l'achèvement de ce projet.

Nous tenons à remercier également l'ensemble des membres de jury qui ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont encouragé soutenu et aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire afin qu'il soit présentable.

Enfin, nos chaleureux remerciements et gratitudes aux enseignants du département de Génie Electrique qui nous ont accompagné et contribué à notre formation.

ملخص:

المولد ذو المخلب عبارة عن آلة متزامنة غير نمطية ، معقدة للغاية وثلاثية الأبعاد. إن قوتها وفوق كل ذلك تكلفتها المنخفضة تجعلها الجهاز الأكثر استخدامًا كمصدر للطاقة الكهربائية في صناعة السيارات. عيبه الرئيسي ، وهو موضوع العديد من الدراسات البحثية ، هو أدائه السيئ للغاية. تبلغ كفاءة مولدات المخلب بشكل عام حوالي 65٪. الهدف من عملنا هو حساب الكفاءة ، عند نقطة تشغيل كبيرة إلى حد ما ، ومراقبة حساسيتها لبعض المعلمات الهندسية لمخلب الدوار

كلمات المفاتيح : المولد المخلب ، النمذجة العددية ، معادلات ماكسويل ، فصل الخسارة ، الكفاءة ، العناصر المحدودة.

Résumé :

L'alternateur à griffes est une machine synchrone atypique, assez complexe et tridimensionnelle. Sa robustesse et surtout son faible coût font de lui le dispositif le plus utilisé, comme source d'énergie électrique, dans l'industrie des automobiles. Son principal inconvénient, qui fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, est son rendement qui est très médiocre. Le rendement des alternateurs à griffes est généralement autour de 65%. L'objet de notre travail est de calculer le rendement, en un point de fonctionnement assez important, et d'observer sa sensibilité à quelques paramètres géométriques de la griffe du rotor.

Mots clés : Alternateur à griffes ; modélisation numérique ; équations de maxwells ; rendement ; éléments finis.

Abstract :

The claw alternator is an atypical synchronous machine, quite complex and three-dimensional. Its robustness and above all its low cost make it the most widely used device as a source of electrical energy in the automotive industry. Its main drawback, which is the subject of several research studies, is its performance which is very poor. The efficiency of claw alternators is generally around 65%. The object of our work is to calculate the efficiency, at a fairly large operating point, and to observe its sensitivity to a few geometric parameters of the rotor claw.

Keywords :

Claw alternator; numerical modeling; maxwells equations; loss separation; efficiency; finite elements.

Dédicace

Je dédie ce mémoire ...

A Ceux qui sont les plus chers au monde, **mes parents**. Aucune dédicace ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils me comblent et ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices qu'ils ont consenti pour mon éducation, instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, qu' « Allah » vous garde.

A ma chère sœur **Saliha** et son mari **Lyes** et leurs enfants **Ali** et **Miral**.

A mon cher frère **Faïçal** et sa femme **Fatima**.

A toute ma famille paternelle **Maguemoun** et ma famille maternelle **Amani**, notamment mes **cousines**.

A mon oncle paternelle **Hamid** pour ses orientations et son soutien.

A ma très chère promotrice **Mme Brahimi.N**, celle qui m'a comblé de sa gentillesse, son soutien moral, son aide, surtout sa disponibilité et son encouragement qui ma permis d'améliorer et perfectionner mon travail et à avoir confiance en moi, je vous remercie énormément pour tout.

A mes amies. **Ihcene, Hind , Sara, Chaima**,... et à leur tête **Hana**

A toi **Sadek** pour tes conseils et orientations

A toutes la promotion de Machine Electrique 2019-2020

Enfin à tous ceux qui m'aiment

Maguemoun Ryma

Dédicace

Je dédie ce mémoire

***A**mes très chers, **ma mère** et **mon père** qui ont illuminé le chemin de ma vie par leur chaleur et leurs amour et qui n'ont jamais cessé de m'encourager durant toutes mes années d'études. Que **dieu** les gardes et les rend heureux comme ils m'ont rendu heureux.*

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

***A**ma chère sœur et mes chers frères.*

Je le dédie aussi à tous mes amis qui ont toujours été là pour moi et sur lesquels j'ai toujours pu compter.

***A**ma très chère promotrice **Mme Brahimi.N**, je vous remercie infiniment*

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

SOUABER Ihab Abdelmadjid

Listes des acronymes et abréviations

η : le rendement

P_u : puissance utile

P_a : puissance absorbe

U_R : tension

I_R : courant

P_0 : la puissance de sortie du moteur à induction

η_0 : l'efficacité de Transfert entre le moteur inducteur et l'alternateur

A : ampère

V : volte

W : Watt

Kw : kilowatts

mm : millimètre

CAO : conception assistée par ordinateur

$\vec{B}$: Induction magnétique

$\vec{D}$: Induction électrique

$\vec{E}$: Champ électrique

ρ : Charge volumique

$\vec{H}$: Champ magnétique

$\vec{j}$: Densité de courant.

div : divergence

rot : rotationnelle

grad : gradient

μ : La perméabilité magnétique du milieu

$\vec{A}$: Le potentiel vecteur magnétique

ν : La réluctivité magnétique du milieu

$\vec{H}_s$: Champ produit par la source de courant

$\vec{H}_m$: Le champ magnétique induit

ϕ_m : Potentiel scalaire magnétique

tr : tour

min : minutes

Hz : hertz

FEM : force électromotrice

n_e : nombre d'encoches par pole et par phase

Z : le nombre total d'encoches

P_0 : le nombre de pôles

m : le nombre de phase

R : Resistance

B : Bobine

T : tesla

$\emptyset$: Le flux magnétique

C_e : le couple électromagnétique

N.m : newton-mètres

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Généralité sur l’alternateur à griffes

1.1	Introduction.....	3
1.2	L’électricité dans l’automobile	3
1.3	Le générateur d’électricité actuel l’alternateur à griffes.....	4
1.4	Les différents organes de l’alternateur à griffes.....	5
1.4.1	Le stator.....	6
1.4.2	Le rotor.....	9
1.4.3	Le pont redresseur.....	10
1.4.4	Le régulateur.....	11
1.4.5	Les paliers.....	12
1.4.6	Le refroidissement	12
1.5	Principe de fonctionnement.....	13
1.6	Rendement de l’alternateur	15
1.7	Bilan énergétique de l’alternateur à griffes.....	16
1.8	Les avantages et les inconvénients.....	17
1.8.1	Les avantages.....	17
1.8.2	les inconvénients.....	17
1.9	conclusion.....	18

Chapitre 2: Modélisation numérique de l’alternateur à griffes

2.1	Introduction.....	19
------------	--------------------------	-----------

2.2	Modélisation numérique de l'alternateur à griffes.....	19
2.3	Conception assistée par ordinateur.....	19
2.4	Les différents logiciels connus de la conception assistée par ordinateur.....	20
2.5	Présentation de logiciel flux 3D.....	20
2.6	Méthode d'élément finis.....	21
2.7	Condition aux limites.....	22
2.8	Les équations de maxwell.....	23
2.9	L'approximation des régimes quasi stationnaires.....	24
2.10	Modélisation tridimensionnelle de l'alternateur à griffes.....	25
2.11	Conception de la machine à griffes.....	28
2.11.1	Construction de la géométrie	29
a.	Paramètres dimensionnels de l'alternateur.....	30
2.11.2	Création des matériaux magnétiques.....	34
2.11.3	créations des régions volumiques.....	35
2.12	Conclusion.....	37

Chapitre 3: Résolution du modèle numérique

3.1	Introduction.....	38
3.2	Le maillage par le logiciel FLUX3D.....	38
3.3	Le maillage de l'alternateur à griffes.....	39
3.4	Le bobinage de l'alternateur à griffes.....	41
3.4.1	La bobine d'excitation du rotor.....	41
3.4.2	Le bobinage du stator.....	43
3.5	Couplage Circuit électrique.....	46

3.6	Le scénario de la résolution.....	46
3.7	Conclusion.....	47

Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

4.1	Introduction.....	48
4.2	Résolution en Magnétostatiques à vide.....	48
4.2.1	L'induction magnétique dans la machine à griffes.....	48
4.2.2	L'effet du paramètre courant d'excitation sur l'état de saturation de la machine.....	50
4.2.3	Le trajet de flux dans la machine à griffes.....	51
4.3	Résolution en régime magnéto-transitoire.....	54
4.3.1	Caractéristiques à vide.....	54
4.3.2	Validation du modèle de l'alternateur à griffes.....	55
	a. Description du banc d'essai.....	55
	b. Mesure de la FEM à vide.....	55
4.3.3	Caractéristiques en charge et calcul du rendement.....	56
4.4	L'effet de quelques paramètres géométriques sur le rendement	59
4.5	Conclusion	62
	Conclusion générale.....	63

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Evolution de la consommation électrique dans un véhicule.....	4
Figure 1.2 : Vue en coupe d'un alternateur à griffes.....	5
Figure 1.3 : Présente une vue éclatée des différents organes d'un alternateur à griffes.....	6
Figure 1.4 : Stator de l'alternateur à griffes	7
Figure 1.5 : Process slinky, construction du stator en hélice.....	7
Figure 1.6 : Coupe du stator	7
Figure 1.7 : Marguerite, mise en forme du bobinage ondulé d'une phase.....	8
Figure 1.8 : Insertion du bobinage d'une phase Dans le paquet de tôle	8
Figure 1.9 : Insertion des bobinages des autres phases	8
Figure 1.10 : Rotor d'un alternateur à griffes	9
Figure 1.11 : Schéma éclaté d'un rotor à griffes.....	9
Figure 1.12 : Vue de la bobine d'excitation Et du noyau de l'alternateur	10
Figure 1.13 : Vue d'une griffe de l'alternateur	10
Figure 1.14 : Le pont de diodes monte sur le palier arrière	10
Figure 1.15 : Schéma électrique d'un alternateur à deux redresseurs.....	11
Figure 1.16 : Régulateur.....	11
Figure 1.17 : Palier avant	12
Figure 1.18 : Palier arrière	12
Figure 1.19 : Le refroidissement par ventilateur	13
Figure 1.20 : Le refroidissement par circulation d'eau	13

Figure 1.21 : Schéma électrique de l'alternateur	14
Figure 1.22 :L'alternateur dans son environnement	14
Figure 1.23 : Cartographie de rendement d'un alternateur à griffes à fort rendement.....	16

Chapitre 2

Figure 2.2 : le découpage triangulaire.....	22
Figure 2.2 : Démarche générale de la conception de la machine à griffes.....	29
Figure 2.3 : Le sixième de l'alternateur.....	30
Figure 2.4 : Quelque paramètre géométrique du stator.....	31
Figure 2.5 : stator de l'alternateur à griffes sur flux-3d	32
Figure 2.6 : Quelque paramètre géométrique du rotor.....	32
Figure 2.7 : rotor de l'alternateur à griffes sur flux-3d	33
Figure 2.8 : Courbe d'aimantation de matériaux magnétique au rotor.....	34
Figure 2.9 : Courbe d'aimantation de matériaux magnétique au stator.....	35
Figure 2.10 : Les régions volumiques d'un alternateur à griffes.....	36

Chapitre 3

Figure 3.1 : Le maillage de l'alternateur à griffes avec la boîte infinie.....	40
Figure 3.2 : résultat finale de maillage.....	41
Figure 3.3 : Bobinage cylindrique inséré entre les plateaux à griffes.....	42
Figure 3.4 : Les enroulements de l'alternateur à griffes.....	45
Figure 3.5 : L'entrée et sortie d'enroulements statorique.....	45
Figure 3.6 : Couplage en étoile de circuit extérieur.....	46

Chapitre 4

Figure 4.1 : Dégradé de l'induction magnétique à vide pour une position donnée à 45 et 90 degré.	49
Figure 4.2 : Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 5A.....	50
Figure 4.3 : Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 6A.....	50
Figure 4.4 : Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 8A.....	51
Figure 4.5 : Le trajet de flux dans l'ensemble de l'alternateur à griffes.....	52
Figure 4.6 : Le trajet de flux dans le rotor.....	53
Figure 4.7 : Le trajet de flux dans le stator.....	53
Figure 4.8 : La force électromotrice à vide.....	54
Figure 4.9 : Le banc d'essai.....	55
Figure 4.10 : La tension de sortie de l'alternateur a 1500 tr/min.....	56
Figure 4.11 : Le courant de sortie de l'alternateur à griffes.....	57
Figure 4.12 : La tension de sortie de l'alternateur à griffes.....	57

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1 : les parametres géométriques du stator.....	31
Tableau 2.2 : les parametres géométriques du rotor	33
Tableau 2.3 : caractéristiques de chaque région volumique	36

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Discrétisation ponctuelle.....	40
Tableau 3.2 : les paramètres géométriques de la bobine rotorique.....	42
Tableau 3.3 : les paramètres électriques de la bobine rotorique.....	42
Tableau 3.4 : les paramètres des enroulements statorique.....	44

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Les limites liées aux cohérences géométriques.....	59
Tableau 4.2 : variation du rendement en fonction du paramètre « Hauteur du bout du bec ».....	60
Tableau 4.3 : Variation du rendement en fonction du paramètre « Largeur du bout du bec ».....	60
Tableau 4.4 : variation du rendement en fonction du paramètre «Largeur de la base de la griffe ».....	61

Introduction générale

Les alternateurs à griffes constituent de nos jours les seules sources électromécaniques d'énergie électrique à bord des véhicules automobiles. Entraînés par le moteur thermique, ils fournissent l'énergie nécessaire à l'alimentation des auxiliaires de plus en plus nombreux dans l'automobile. En effet, les constructeurs automobiles s'intéressent de plus en plus à l'électrification de l'habitacle qui permet d'améliorer le confort dans les véhicules (Vitre électrique ...etc), ainsi que l'introduction de nouveaux dispositifs électriques qui permettent d'améliorer la sécurité pour l'être humain comme les airbags et le système antiblocage des roues.

Le plus grand avantage de l'alternateur à griffes est le fait qu'il présente un coût de construction raisonnable grâce à sa forme atypique du rotor. En revanche, son rendement est médiocre. Cependant, si la production d'électricité dans le véhicule augmente tout en conservant le rendement actuel des alternateurs, l'impact de la génération d'électricité sur la consommation du carburant sera de plus en plus important. Or, la baisse de la consommation est devenue une priorité pour les constructeurs d'automobiles dans le but de respecter les normes antipollution, de plus en plus strictes. Il devient donc important de bien étudier et améliorer le rendement de l'alternateur à griffes.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire vise l'étude de l'influence de certains paramètres géométriques sur le rendement de l'alternateur à griffes.

Notre travail est structuré de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présenterons quelques généralités sur l'alternateur à griffes, en donnant un descriptif détaillé de ses différents organes ainsi que son principe de fonctionnement. On définira par la suite le problème majeur de cette machine qui est le rendement. En dernier, les avantages et les inconvénients de cet alternateur seront présentés.

Nous présenterons, dans le deuxième chapitre, la modélisation de l'alternateur à griffes avec la méthode des éléments finis.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, la résolution du modèle numérique de l'alternateur à griffes sera détaillée tout en décrivant la méthode de bobinage ainsi que le maillage.

Le quatrième chapitre, consistera en la simulation de la machine en régime magnétostatique à vide et en régime transitoire à vide et en charge. Ceci sera dans le but de calculer, sur un point de fonctionnement important, le rendement de l'alternateur. Nous allons par la suite observer l'influence de certains paramètres géométriques sur ce rendement.

On finira notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.1 Introduction

L'industrie automobile se trouve dans une phase de développement extrêmement Rapide imposée par la concurrence internationale et les nouvelles exigences des consommateurs. Le rythme des recherches s'est accéléré dans les simples détails de conception. De nouvelles contraintes de sécurité et de respect de l'environnement conduisent les constructeurs à intégrer de nouvelles techniques dans l'automobile. Ces derniers ont besoin de l'électricité cette électricité est produite par L'alternateur à griffes qui est, à ce jours l'unique convertisseur qui assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique transmise aux équipements du véhicule et particulièrement à la batterie.

Nous présenterons dans ce chapitre la structure et le principe de fonctionnement de l'alternateur à griffes, ainsi que la méthode de calcul du rendement.

1.2 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 d'intégrer 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, contrôle de stabilité ESP), la sécurité passive (airbags, tension de ceintures de sécurité) et aussi la consommation (gestion électronique du moteur, soupapes électromagnétiques, catalyseur). Pour des raisons de poids, de coût et de contrôle optimal, 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 et de la climatisation.

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

La multiplication de ces consommateurs électriques a entraîné une croissance constante de la consommation électrique dans les véhicules au cours des dernières années (figure 1.1)

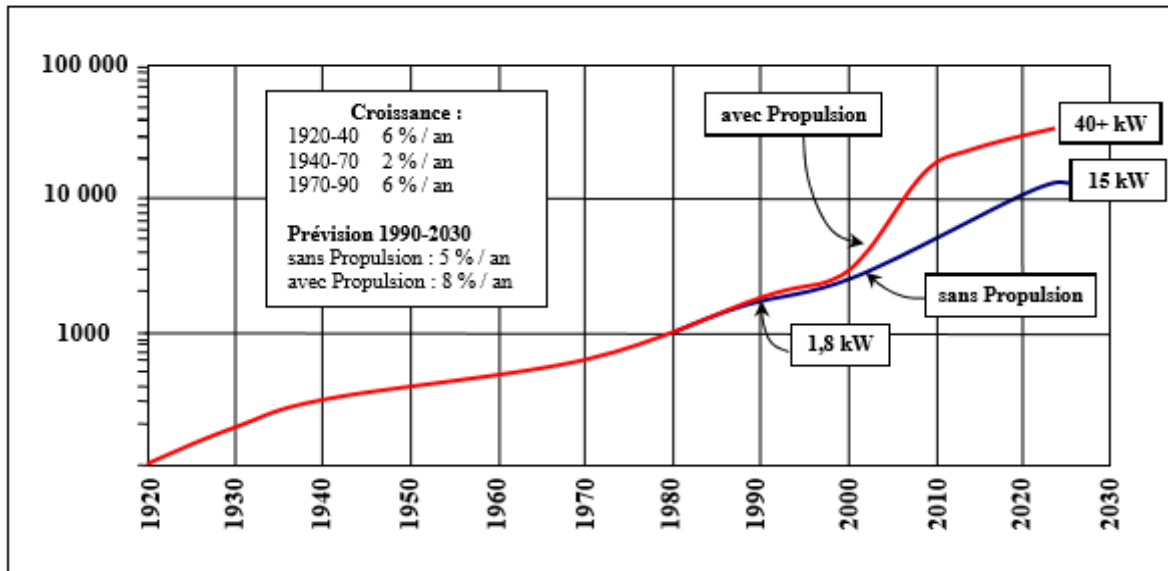


Figure 1.1. Evolution de la consommation électrique dans un véhicule (source : SAE – Society of Automotive Engineers)

Cette électricité consommée est produite par un générateur qui est actuellement un alternateur à griffes. Ces alternateurs sont très compétitifs d'un point de vue économique et présentent une bonne puissance massique. En contrepartie, ils ont un rendement médiocre, de l'ordre de 60%.

La figure 1.1 nous montre la nécessité d'améliorer l'alternateur actuel pour qu'il délivre plus de puissance. En même temps, il faut aussi veiller à accroître le rendement de celui-ci pour maîtriser la surconsommation d'essence. [1]

1.3 Le générateur d'électricité actuel l'alternateur à griffes

Les alternateurs à griffes (figure 1.2) sont classés dans la famille des alternateurs synchrones triphasés à pôles saillants.

La spécificité de ces alternateurs provient de la construction atypique du rotor en forme de griffes. En général, les alternateurs à pôles en forme de griffes ont un diamètre

Chapitres 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

Plus grand et une longueur plus faible que les machines synchrones classiques. La particularité technologique 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'exercent dans le rotor. Son rôle est d'alimenter le réseau électrique en courant continu du véhicule, avec notamment la recharge de la batterie. [1]

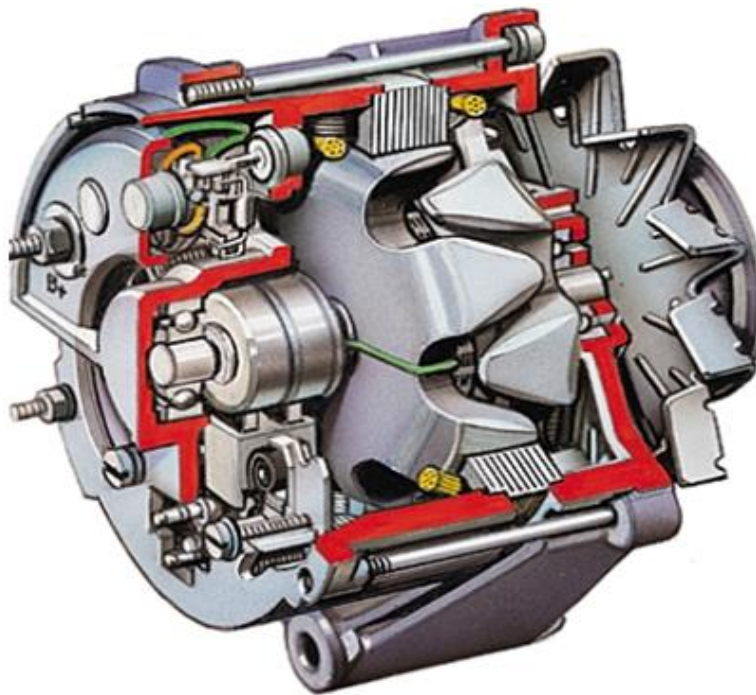


Figure 1.2. Vue en coupe d'un alternateur à griffes

1.4 Les différents organes de l'alternateur à griffes

Un alternateur à griffes est principalement constitué de deux armatures magnétiques, le rotor et le stator qui sont séparés par un entrefer. Ces deux armatures sont associées à un pont redresseur, un régulateur, des paliers et un système de refroidissement.

Chapitres 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

La figure 1.3 présente une vue éclatée des différents organes d'un alternateur à griffes. [2]

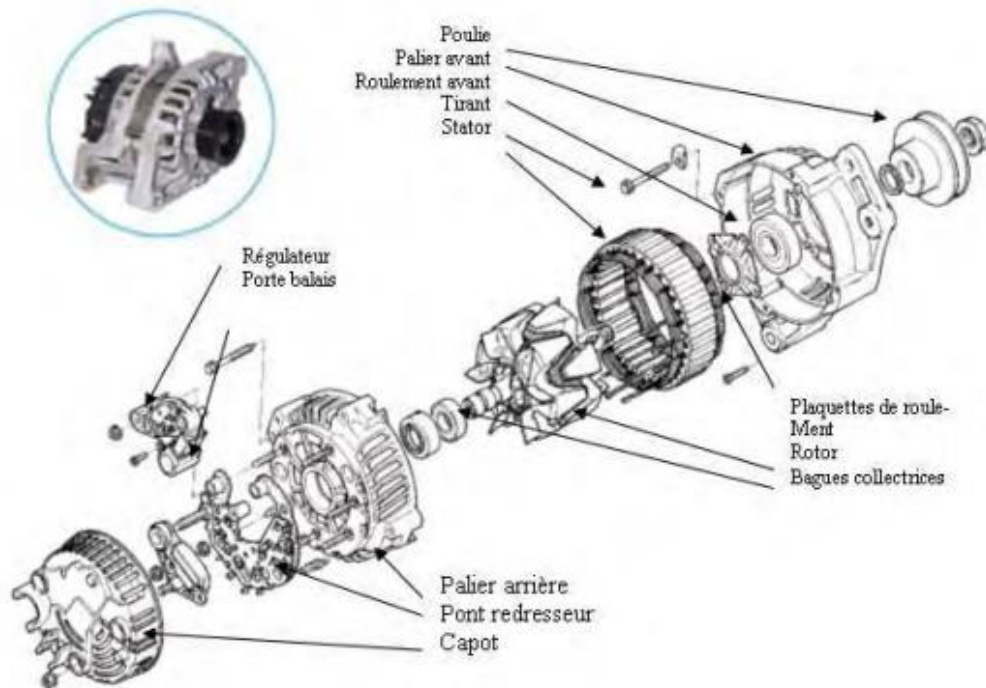


Figure 1.3. Présente une vue éclatée des différents organes d'un alternateur à griffes.

1.4.1 Le stator

Le stator est constitué de tôles isolées pourvues d'encoches pour le bobinage. L'épaisseur des tôles est généralement de 0,5 mm [1] et parfois de 0,35 mm [1]. Les enroulements sont triphasés et le couplage est souvent en triangle. La plupart des alternateurs ont une encoche par pôle et par phase, cependant certains en présentent deux, dans le cas des alternateurs à une encoche par pôle et par phase, le nombre de dents statoriques est de 36, 42 ou 48 pour 6, 7 et 8 paires de pôles. Pour les alternateurs à deux encoches par pôle et par phase, nous retrouvons respectivement 72, 84 et 96 dents statoriques. [3] En général, ces alternateurs sont bobinés avec deux fils en main (manuellement).

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes



Figure 1.4. Stator de l'alternateur à griffes

Certains stators d'alternateurs à griffes sont fabriqués avec un process un peu spécial. C'est le process slinky. En effet, ce process permet de réduire les chutes de matière première. Au lieu de découper les tôles du stator une par une, on découpe un ruban qui sera ensuite enroulé en hélice pour former le circuit magnétique du stator (figure 1.5). Cette technologie permet de réduire les chutes de matière première car on peut découper deux stators avec le même ruban en utilisant les espaces des encoches de l'un comme dents de l'autre



Figure 1.5. Process slinky, construction du stator en hélice



Figure 1.6. Coupe du stator

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

Ensuite le bobinage, ondulé, est mis en forme figure 1.7 avant d'être inséré dans le paquet de tôle en une fois ou en plusieurs fois figure 1.8 et figure 1.9. [1]

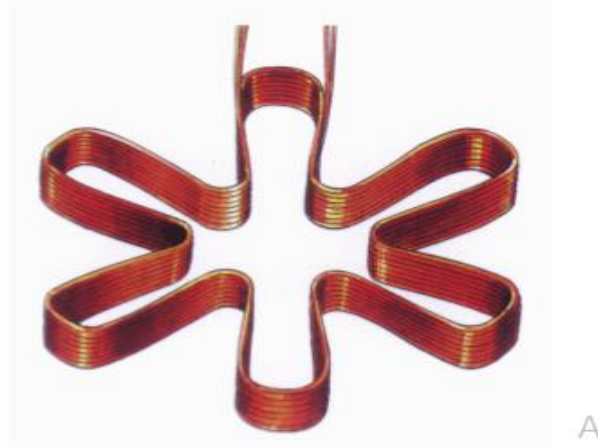


Figure 1.7. Marguerite, mise en forme du bobinage ondulé d'une phase

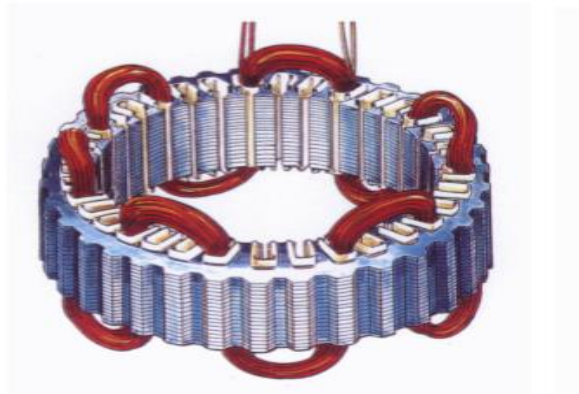


Figure 1.8. Insertion du bobinage d'une Phase Dans le paquet de tôle

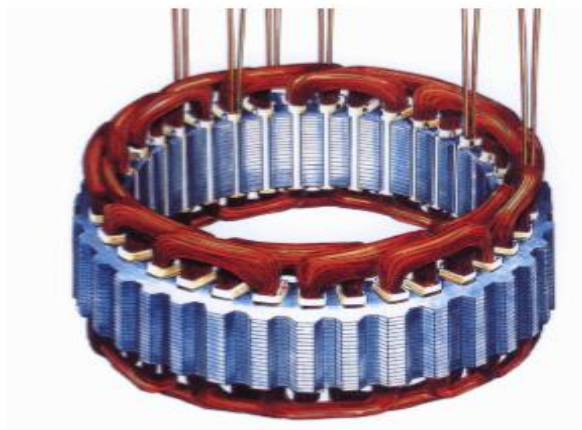


Figure 1.9. Insertion des bobinages des autres phases

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.4.2 Le rotor



Figure 1.10. Rotor d'un alternateur à griffes



Figure 1.11. Schéma éclaté d'un rotor à griffes

Le rotor a un enroulement d'excitation, qui est constitué d'une seule bobine, alimentée par deux bagues. Cette bobine est placée entre des plateaux à griffes. Le rotor est réalisé avec un matériau ferromagnétique massif (il n'y a pas de feuilletage, donc les pertes fer seront importantes, notamment à cause des courants de Foucault). Généralement le nombre de pôles est de 12, voire de 16 pour certains modèles de puissances importantes.

[1]

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes



Figure 1.12. Vue de la bobine d'excitation Et du noyau de l'alternateur



Figure 1.13. Vue d'une griffe de l'alternateur

1.4.3 Le pont redresseur

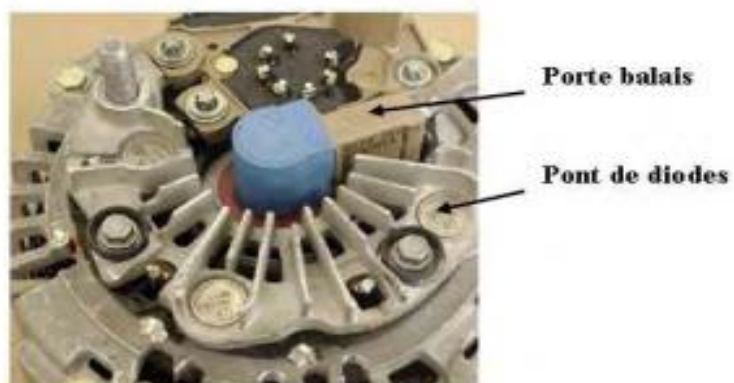


Figure 1.14. Le pont de diodes monte sur le palier arrière

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

L'enroulement statorique est relié à un pont de diodes qui redresse les courants statoriques pour charger la batterie et alimenter le réseau de bord du véhicule [8]. La figure 1.14 représente un pont de diodes monté sur le palier arrière de l'alternateur. Certains alternateurs, comme par exemple l'alternateur Denso [1] dont le stator a été présenté précédemment, possèdent deux redresseurs à six diodes pour diminuer les ondulations du courant fourni au réseau de bord. Ceci est particulièrement important pour améliorer la qualité de la tension du réseau de bord. Ces alternateurs présentent alors deux bobinages au stator décalés de 30° , qui sont chacun connecté à un redresseur.

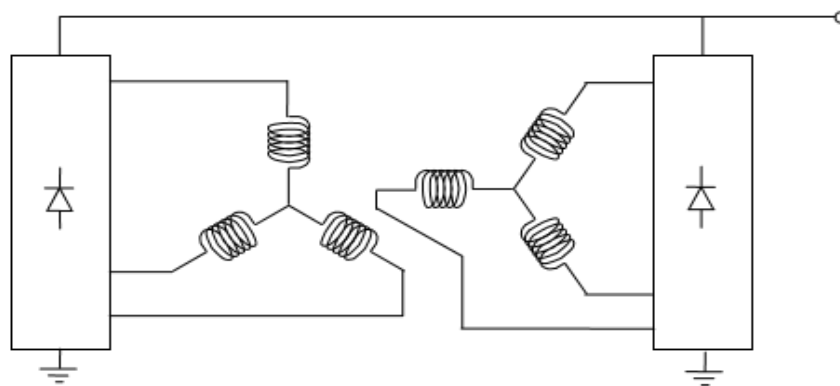


Figure 1.15 .Schéma électrique d'un alternateur à deux redresseurs

A froid, la chute de tension aux bornes d'une diode est de l'ordre de 0.8V, elle représente 6% de la tension de batterie. [3]

1.4.4 Le régulateur

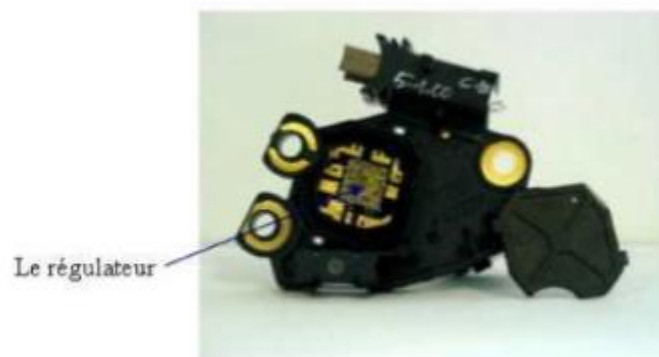


Figure 1.16 .Régulateur

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

Le régulateur électronique permet de régler l'excitation afin de recharger la batterie ou d'alimenter le réseau de bord. Il fonctionne en régulateur de tension à la manière d'un hacheur série en ajustant la tension aux bornes du bobinage rotor en fonction de la vitesse et de la puissance demandée. Il est de plus en plus interfacé avec le contrôle moteur ce qui permet d'adapter au mieux le courant d'excitation en fonction de la puissance demandée. [2]

1.4.5 Les paliers

Les paliers représentent l'armature externe de l'alternateur avec un palier avant et un palier arrière. Ils sont tous les deux en fonte d'aluminium, sont munis de roulements à billes et présentent des ailettes afin d'optimiser le refroidissement de l'alternateur. Ils enserrant le rotor et le stator et soutiennent l'arbre par le biais des roulements. Une courroie assure la liaison entre l'arbre et le moteur thermique. Le palier arrière supporte également le ou les ponts de diodes, le porte-balais et le régulateur. [2]



Figure 1.17. Palier avant



Figure 1.18. Palier arrière

1.4.6 Le refroidissement

L'alternateur doit être refroidi à cause des différentes pertes induites. Il existe deux modes de refroidissement : le refroidissement par air, par deux ventilateurs placés aux deux extrémités du rotor et le refroidissement par un liquide qui circule autour de la carcasse de la machine.

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes



Figure 1.19. Le refroidissement par ventilateur

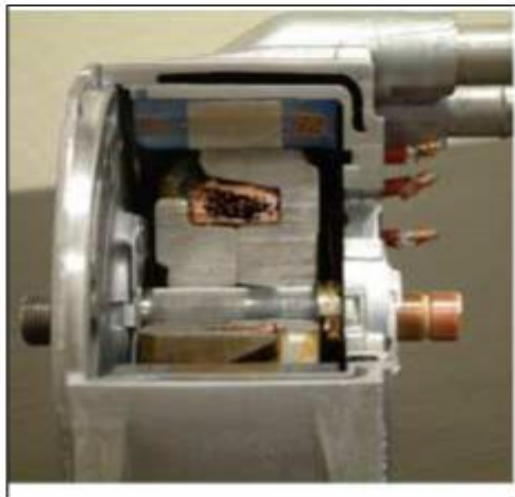


Figure 1.20. Le refroidissement par Circulation d'eau

1.5 Principe de fonctionnement

Il s'agit d'une machine particulière, fonctionnant suivant le même principe que les machines synchrones traditionnelles. Entraîné par le moteur à combustion interne du véhicule, l'alternateur a pour rôle, d'alimenter en courant continu tous les récepteurs reliés au réseau de bord, et plus particulièrement de charger la batterie. La figure 1.21 représente un schéma électrique de l'alternateur.

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

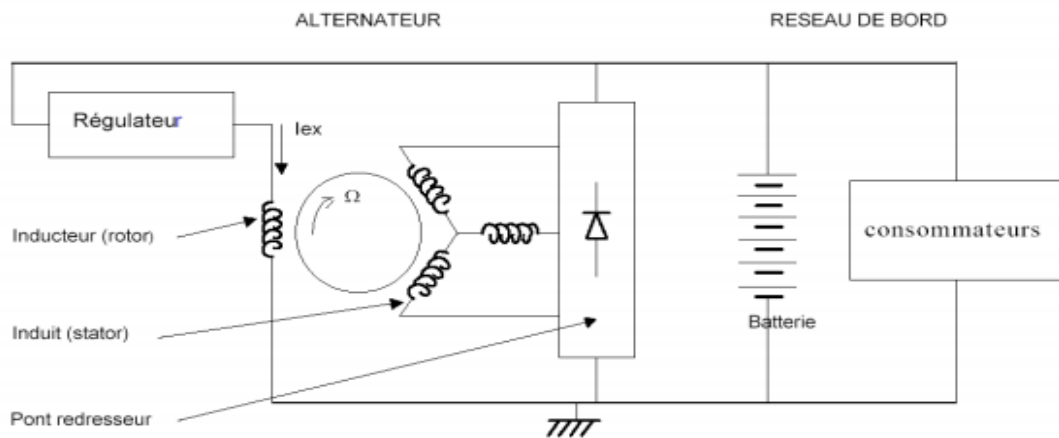


Figure 1.21. Schéma électrique de l'alternateur

L'alternateur est entraîné par le moteur thermique au moyen d'une transmission par courroie qui multiplie la vitesse de l'alternateur par un coefficient de l'ordre de 2.7 [12] par rapport à la vitesse du moteur thermique, la figure 1.22 schématise l'alternateur dans son environnement. En fonction de la vitesse du roulage et de la charge du réseau de bord, le régulateur impose la tension nécessaire aux bornes du circuit d'excitation [3]



Figure 1.22. L'alternateur dans son environnement

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.6 Rendement de l'alternateur

Le rendement est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée par un dispositif électrique. Pour le calculer il faut, parfois, commencer par évaluer les différentes pertes qui apparaissent dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Nous rappelons que l'alternateur transforme la puissance mécanique transmise à l'arbre du rotor en puissance électrique, et à l'aide d'un pont redresseur, en une source à courant continu.

Considérons tout d'abord les pertes mécaniques, celles-ci sont dues aux roulements à billes et aux frottements entre les bagues et les balais, L'ensemble de ces pertes entraînent une diminution du rendement.

Concernant les pertes fer ou pertes magnétiques, celles-ci sont composées des pertes par hystérésis et des pertes par courants de Foucault. Ces pertes sont directement liées à l'induction magnétique et au poids des différentes composantes du circuit magnétique du stator, ces pertes sont très difficiles à calculer de manière précise dans l'alternateur à griffes. [4]

Une autre méthode pour le calcul du rendement est donnée par la formule 1.1 la suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} * 100\% = \frac{U_R I_R}{P_0 \eta_0} * 100\% \quad (1.1)$$

Avec :

P_u : puissance utile (puissance de sortie)

P_a : puissance absorbée (puissance d'entrée)

U_R : tension en voltes

I_R : courant en ampère

P_0 : la sortie du moteur à induction

η_0 : l'efficacité de Transfert entre le moteur inducteur et l'alternateur

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.7 Bilan énergétique de l'alternateur à griffes

L'alternateur peut fournir une puissance électrique maximale d'environ 2 kW. Cependant, cet alternateur est très rarement utilisé à pleine charge. Il fonctionne assez souvent à demi-charge et à vitesse moyenne. Il délivre alors, dans ces conditions, environ 1kW. Or, à cette vitesse et à cette charge, l'alternateur présente un rendement de l'ordre de 60%. D'où, pour ce point de fonctionnement particulier, il absorbe une puissance mécanique d'environ 1,7 kW [1] qui est directement imputée au moteur thermique. La répercussion de ce prélèvement de puissance sur la consommation d'essence est alors importante. La figure ci-contre présente une cartographie de rendement d'un alternateur à griffes à rendement équivalent à notre alternateur.

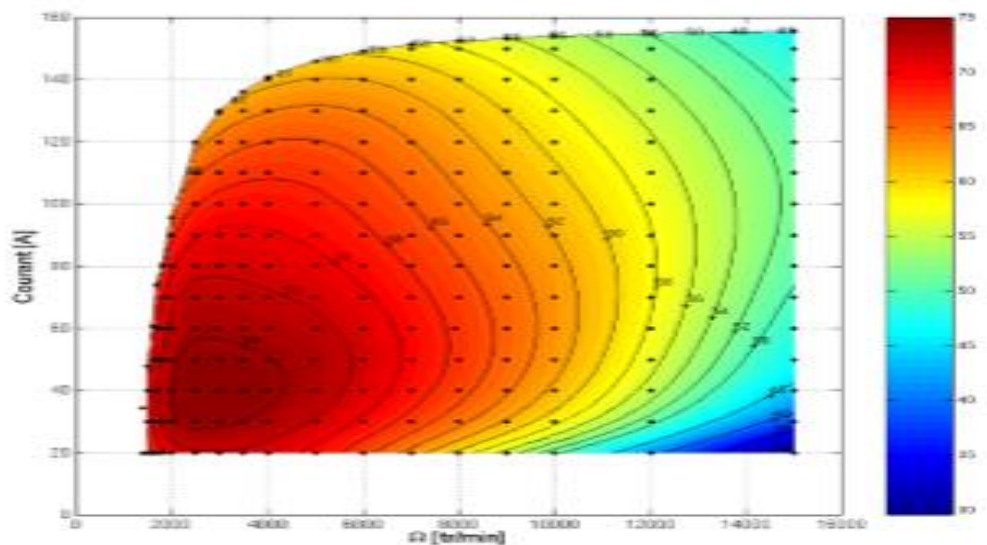


Figure 1.23. Cartographie de rendement d'un alternateur à griffes à fort rendement

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.8 Les avantages et les inconvénients de l'alternateur

1.8.1 Les avantages

- Un coût de conception raisonnable grâce à sa forme de rotor et l'utilisation d'une seule bobine excitatrice.
- Plus grande fiabilité.
- Une machine très robuste à la force de centrifuges.
- Elle supporte des grandes vitesses.

1.8.2 Les inconvénients

- Fournir du courant alternatif, non utilisable par la batterie qui ne peut recevoir que du courant continu.
- Des pertes énormes notamment par échauffement, les pertes dus aux courants de Foucault
- Un mauvais rendement environ 60 %

Chapitre 1 : Généralité sur l'alternateur à griffes

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous présentons l'alternateur à griffes utilisé comme génératrice d'électricité dans les véhicules. Nous avons présenté l'alternateur dans son environnement dans l'automobile, suivi par une présentation des différents organes de cette machine, du principe de son fonctionnement et la méthode de calcul du rendement. En dernier nous avons conclu ce chapitre en présentant les avantages et les inconvénients de cette machine.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation numérique d'un alternateur à griffes, basée sur la méthode des éléments finis. Cette modélisation est constituée de deux étapes. La première la construction de la géométrie et la seconde consiste en l'affectation des matériaux physiques aux différents éléments constitutifs de la machine. Ceci sera réalisé par le Logiciel de conception Flux 3D.

2.2 Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Il existe trois types de modèle permettant de simuler une machine électrique, le modèle numérique, semi numérique et analytique.

Le type de modèle que nous allons utiliser dans ce mémoire c'est la modélisation numérique qui consiste à construire un ensemble de fonction mathématique décrivant le phénomène, en se basant généralement sur les méthodes de calcul par éléments finis. Ces méthodes ont prouvé depuis longtemps leur efficacité en développement de système électromagnétique avec une très bonne précision basée sur la résolution des équations de maxwell dans l'hypothèse des états quasi-stationnaires. [2]

Ce type de modalisation nécessite une assistance numérique de logiciel Flux 3D.

2.3 Conception assistée par ordinateur

La conception assistée par ordinateur C.A.O. comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique, et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer. [5]

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

La CAO comprend trois phases essentielles :

- Prés conception : traduction des données des cahiers de charges ou des idées à mettre en œuvre.
- Conception : calcul des dimensions de systèmes à développés.
- Post- conception : analyse, vérification, et validation des systèmes réalisés par le passé [6]

2.4 Les différents logiciels connus de la conception assistée par ordinateur. [6]

Il existe plusieurs logiciels de C.A.O parmi lesquels nous avons :

- autocad,
- solidworks
- Edwin
- OrCad
- flux 2D/3D
- FEMM

L'outil de calcul utilisé dans notre travail est le FLUX 3D

2.5 Présentation de logiciel flux 3D

Flux 3D est un logiciel de conception assisté par ordinateur. IL utilise la méthode des éléments finis, il permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses: équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. [5]

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Ce logiciel a été conçu et réalisé en 1981 par le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Il est depuis cette date commercialisé par la société CEDRAT et repris par la Société ALTAIRE qui commercialise et développe aujourd'hui les principaux Logiciels de construction de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnétostatiques. FLUX2/3D comprend aujourd'hui 20 modules qui permettent d'aborder l'ensemble des problèmes qui se posent lors de la conception d'un appareil électromagnétique. En particulier, la notion de couplage entre les équations de champ et les équations de circuit extérieur permettent de simuler le fonctionnement d'un moteur alimenté sous une tension donnée au stator et tenir compte de l'effet de fermeture des anneaux de court circuit au rotor. La possibilité de simuler également le mouvement du rotor en fonction du temps et de la tension d'alimentation permet d'étudier l'effet des couples instantanés au-delà du couple moyen calculé par les méthodes classiques. [7]

2.6 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de la résolution des équations aux dérivées partielles. L'objectif de cette méthode est de remplacer un modèle décrit dans un espace continu par un modèle discret équivalant à 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. [8]

L'utilisation des éléments finis en électrotechnique a débuté dans les années 1970 par la résolution de problèmes magnétostatique. Cette méthodologie s'est très vite imposée grâce à sa facilité d'emploi et à son aptitude à résoudre les équations de Maxwell dans des domaines de forme complexe. Pour utiliser cette méthode on décompose le domaine d'étude en éléments triangulaires **Figure 2.1** et on calcule ensuite la fonction inconnue aux nœuds du maillage ainsi obtenu. De nos jours, cette méthode permet la résolution de problèmes statique et dynamique. De

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Plus, en associant aux éléments finis spatiaux, une discrétisation temporelle, on résout des problèmes dynamiques, non linéaires couplés à la thermique et à la mécanique.

Les logiciels-qui sont utilisés et développés aux laboratoires électrotechniques de Grenoble sont :

FLUX2D pour les problèmes bidirectionnels.

FLUX3D pour les problèmes tridimensionnels. [9]

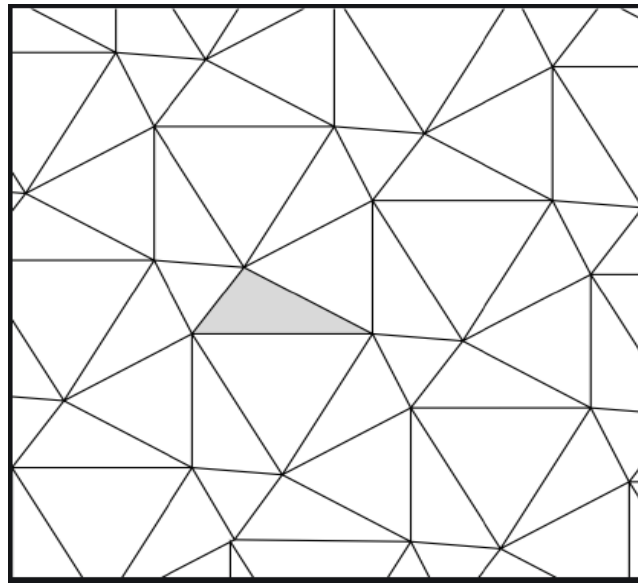


Figure 2.1. Le découpage triangulaire

2.7 Conditions aux limites [10]

Les conditions aux limites sont des valeurs que l'on impose à la fonction solution (ou à certaines de ces dérivées) sur tout ou partie du domaine, et/ou sur toute ou partie de sa frontière. Donc Les conditions aux limites décrivent les interactions entre le système à étudier et l'extérieur. Elles peuvent être de type :

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

- **Dirichlet** : Elle est appliquée sur la frontière où la valeur de l'inconnue est donnée.

$$\phi = \phi_0 = \text{constante}$$

- **Neumann** : Cette condition nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnu sur la frontière.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \phi$$

- **mixtes** : c'est une combinaison entre deux conditions aux limites Dirichlet et Neumann.

$$a \frac{\partial \phi}{\partial n} + b \phi = 0 \quad / \quad a \text{ et } b \text{ sont des constantes}$$

2.8 Les équations de maxwell

Les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les quatre équations de Maxwell. [8] Ces équations sont très importantes en physique et tirent leur grande élégance de leur simplicité : juste quatre équations pour décrire le vaste monde de l'électromagnétisme. Nous disposons alors les quatre équations suivantes :

Équation de Maxwell-Gauss

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

Équation de conservation de flux magnétique

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Équation de Maxwell-Faraday $\vec{A}$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Équation de Maxwell-Ampère

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$\vec{B}(T)$ Induction magnétique. $\rho(C.m^{-3})$ Charge volumique

$\vec{D}(C.m^{-2})$ Induction électrique. $\vec{H}(A.m^{-1})$ Champ magnétique

$\vec{E}(V.m^{-1})$ Champ électrique. $\vec{J}(A.m^{-2})$ Densité de courant.

L'équation (2.4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ magnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique à partir des courants électriques de conduction et de déplacement. L'équation (2.3) correspond à la loi d'induction de Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur ou un mouvement soumis à un champ magnétique constant. D'autre part, les équations (2.1) et (2.2) traduisent respectivement la conservation du champ magnétique et de la charge électrique. D'autre part, Les équations (2.3) et (2.4) définissent la relation entre les champs et leurs sources. [11]

2.9 L'approximation des régimes quasi stationnaires [10]

Les équations de Maxwell et les champs qui en découlent pourront être étudiés dans des types de circonstances qui sont :

- Le cas le plus général correspondant aux régimes variables, où les 4 équations s'écrivent dans leur forme complète.
- Le cas du régime statique ou la variation par rapport au temps des champs magnétique et électrique est nulle.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

- Le cas particulier des régimes quasi stationnaire, où le courant de déplacement de l'équation de Maxwell- Ampère est négligé par rapport à la densité surfacique, à cause de la fréquence des ondes faible.

Les équations de Maxwell prennent alors la forme simplifiée suivante :

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (2.5)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (2.8)$$

2.10 Modélisation tridimensionnelle de l'alternateur à griffes

Actuellement, malgré une bibliographie impressionnante, l'emploi des méthodes numérique traditionnelle demeure un problème difficile tant dans sa formulation que dans sa mise en œuvre. Le trajet de flux magnétique dans la machine à griffes est tridimensionnel, la modélisation doit se faire en 3D avec un logiciel de calcul basé sur la méthode de d'éléments finis.

Formulation en potentiel vecteur magnétique du problème :

La source de courant de l'alternateur à griffes est une bobine excitatrice alimentée par une source de tension extérieure continue. La saturation des matériaux statorique et rotorique est prise en considération. Pour avoir l'équation de courant en termes de potentiel vecteur magnétique on exploite les équations de maxwell et la relation de milieu et certaines propriétés d'analyse vectorielle. Ceci nous permet d'écrire les relations suivantes :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (2.8)$$

Avec :

$$\vec{B} = \mu(H) * \vec{H} \quad (2.9)$$

μ Est la perméabilité magnétique du milieu

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

L'équation (2.9) exprime la relation du milieu entre le vecteur champ magnétique ($\vec{H}$) et l'induction magnétique ($\vec{B}$) à travers la perméabilité magnétique

Soit $\vec{A}$ le potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (2.10)$$

En combinant les deux équations (2.9), (2.10) on trouve :

$$\vec{H} = \left(\left(\frac{1}{\mu(H)} \right) * \text{rot}(A) \right) \quad (2.11)$$

On combinant les deux équations (2.11), (2.8) on trouve :

$$\text{rot} \left(\left(\frac{1}{\mu(H)} \right) * \text{rot}(A) \right) = \vec{J} \quad (2.12)$$

L'équation (2.12), dont l'inconnu est le vecteur $\vec{A}$,

$$\text{rot}((v) * \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J} \quad (2.13)$$

Où : (v) est la réluctivité magnétique du milieu, considéré dans notre cas.

✚ Formulation en potentiel scalaire magnétique (ϕ_m) du problème :

A vide, le courant $\vec{J}$ représente seulement le courant parcouru dans la bobine excitatrice.

En charge, l'entraînement mécanique du rotor induit un champ tournant au stator qui va créer aux bornes de chaque enroulement statorique une FEM proportionnelle à la vitesse de la rotation du rotor et un flux embrassé par chaque spire. Les courants statoriques imposés par la charge, créent une force magnétomotrice qui influence plus ou moins l'état magnétique de la machine. On appelle ce phénomène, la réaction magnétique de l'induit. Le

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Flux magnétique crée par l'induit ne peut pas s'ajouter au flux magnétique crée par l'inducteur à cause de la non linéarité des matériaux magnétique (saturation).

Dans ce cas le champ magnétique H est composé par deux composantes.

$$\vec{H} = \vec{H_s} + \vec{H_m} \quad (2.14)$$

Avec $\vec{H_s}$ est le champ source dont le rotationnel représente la densité effective de courant $\vec{J_s}$ et $\vec{H_m}$ est la réaction du circuit magnétique dû à l'existence de $\vec{H_s}$:

- En absence de champs source

Dans le cas d'une région ou les courants sources sont absents, $\vec{J_s} = 0$.

On aura selon l'équation de maxwell (2.8) :

$$\text{rot}(\vec{H}) = 0 \quad (2.15)$$

Selon (2.14) :

$$\text{rot}(\vec{H_m}) = 0 \quad (2.16)$$

Le champ $\vec{H}$ peut être décrit comme dérivé d'un potentiel scalaire magnétique (ϕ_m) :

$$\vec{H_m} = -\text{grad}(\phi_m) \quad (2.17)$$

D'après l'équation de maxwell (2.9) et l'équation (2.6) :

$$\text{div}(\vec{B}) = \text{div}(\mu(H) * \vec{H}) = -\text{div}(\mu(H) * \text{grad}(\phi_m)) = 0$$

Donc :

$$\text{div}(\mu(H) * \text{grad}(\phi_m)) = 0 \quad (2.18)$$

Cette équation, dont l'inconnu est le potentiel magnétique scalaire (ϕ_m) sera résolu par élément finis.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

- En présence de champs source

Dans une région où les courants sources sont présents, $\vec{J}_s \neq 0$

Le champ source $\vec{H}_s$, est déterminé par la loi de Biot et Savart, tel que :

$$\vec{J}_s = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}_s) \quad (2.19)$$

Par conséquent le champ complémentaire $\vec{H}_m$ est irrotationnel c. a. d :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}_m) = 0 \quad (2.20)$$

Ceci implique qu'il existe un potentiel scalaire magnétique ϕ_m tel que :

$$\vec{H}_m = -\overrightarrow{\text{grad}}(\phi_m) \quad (2.21)$$

Selon l'équation (2.14) l'équation (2.20) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H} - \vec{H}_s) = 0 \quad (2.22)$$

Et donc, on aura, selon (2.21)

$$\vec{H} = \vec{H}_s - \overrightarrow{\text{grad}}(\phi_m) \quad (2.23)$$

En substituant les équations (2.9) et (2.23) dans l'équation de Maxwell (2.6) on obtient :

$$\text{div}(\mu(\vec{H}_s - \overrightarrow{\text{grad}}(\phi_m))) = 0 \quad (2.24)$$

Cette équation, dont l'inconnu est le potentiel magnétique scalaire ϕ_m sera résolue par éléments finis.

2.11 Conception de la machine à griffes

La géométrie et les propriétés physiques de l'alternateur à griffes sont périodiques. On peut donc représenter seulement une paire de pôles de la machine et appliquer une périodicité égale à six fois pour obtenir la forme complète de la machine.

La conception de la machine à griffes sous logiciel flux3d, doit suivre les étapes suivantes.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

- Construction de la géométrie du sixième stator et rotor.
- L'assemblage du sixième stator et du sixième rotor.
- Dessin de la boîte infini qui détermine les conditions aux limites et englobe toute la géométrie du dispositif
- Dessin du cylindre de glissement
- Création des matériaux
- Affectation des régions physiques à la géométrie.

La figure 2.2 montre les étapes de la démarche générale de la conception de la machine à griffes.

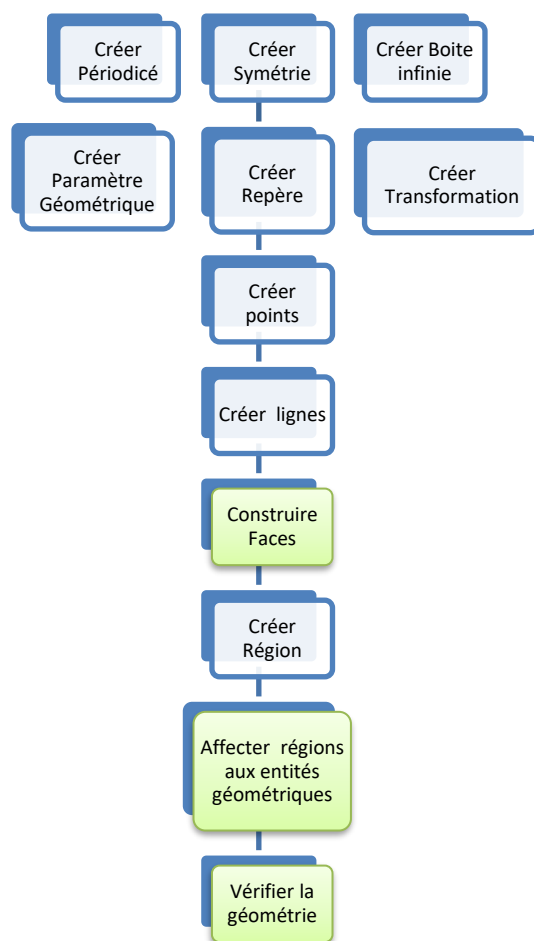


Figure 2.2. Démarche générale de la conception de la machine à griffes

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

2.11.1 Construction de la géométrie

La première étape de la modélisation de la machine c'est la construction de la géométrie. Cette étape consiste à définir les paramètres géométriques qui seront utilisés pour la création des points, lignes, faces et volumes. on utilise également les périodicités et les symétries, ce qui permet de représenter qu'une portion du dispositif de $1/6$ de notre alternateur à griffes.

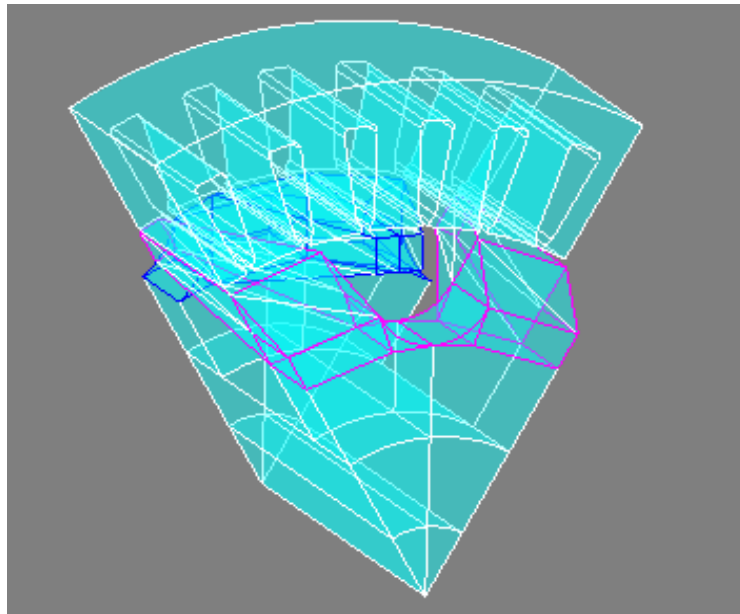


Figure2.3. le sixième de l'alternateur

Les étapes à suivre pour la construction géométriques sont :

- création des systèmes de coordonnées (système des coordonnées principale, système de travail, système locaux).
- Introduction des points en respectant le type de coordonnées de système.
- Introduction des segments et des arcs.
- Connexion des segments et les arcs en formant de la surface fermée pour la création des faces.
- Connexion des faces afin de déterminer les volumes.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

a Paramètres dimensionnels de l'alternateur

Pour réaliser la géométrie de la machine on a besoin d'abord de définir les paramètres dimensionnels afin de calculer les grandeurs désirées.

On commence par le stator, la **figure 2.4** présente quelque paramètre de sa géométrie.

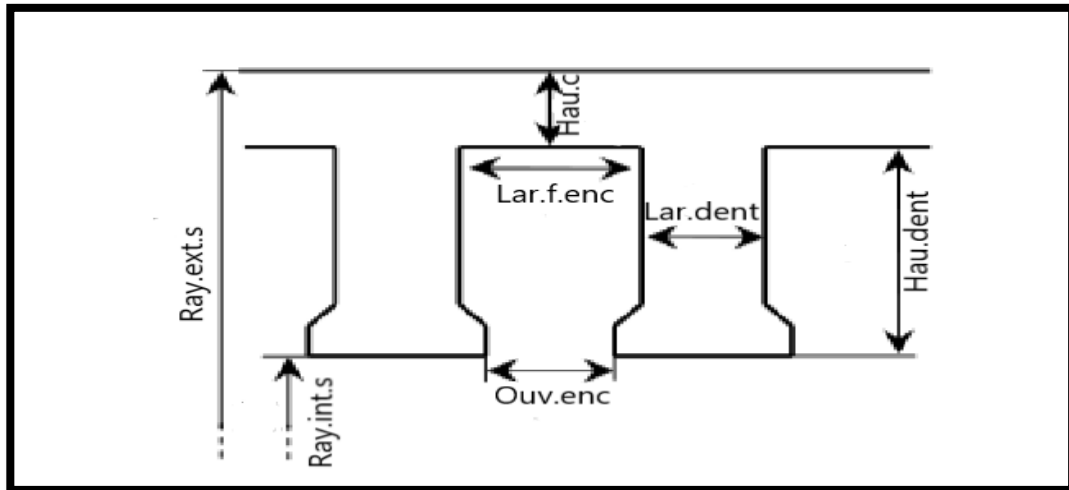


Figure 2.4. Quelque Paramètres géométriques du stator

Les paramètres géométriques du stator sont indiqués dans le tableau suivant :

Nombre	Référence	Paramètre géométrie	Valeur
1	Ray.int.s	Rayon intérieur du stator	44.3mm
2	Ray.ext.s	Rayon extérieur du stator	63.5mm
3	Ouv.enc	Ouverture d'encoche	2mm
4	Lar.f.enc	Largeur du fond d'encoche	4.8mm
5	Hau.c	Hauteur de la culasse	5.5mm
6	Hau.dent	Hauteur d'une dent	12.7mm
7	Larg.dent	Largeur d'une dent	2.866mm
8	Entrefer	Entrefer	0.65mm

Tableau 2.1. les Paramètres géométriques du stator

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

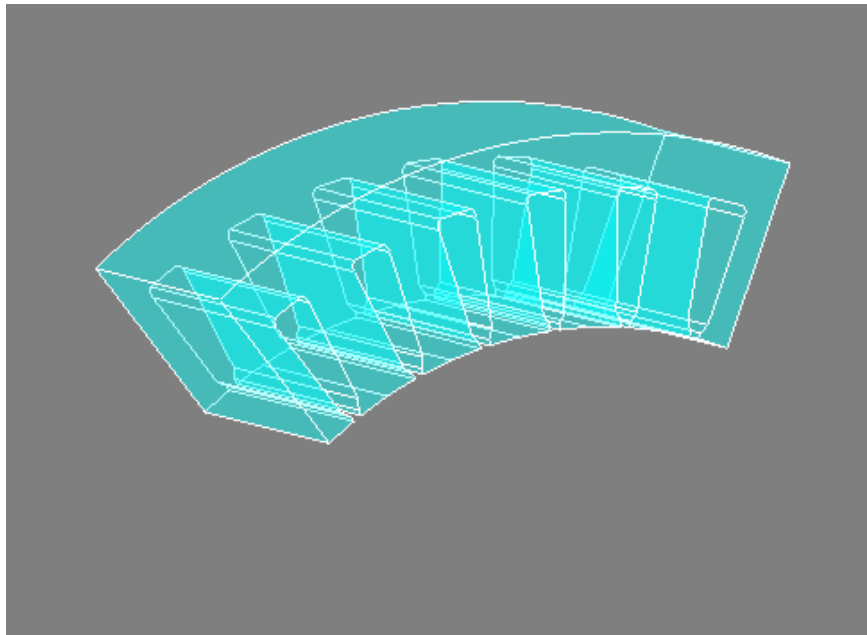


Figure2.5 : stator de l'alternateur à griffes sur **Flux-3d**

Ensuite on passe a la construction géométrique du rotor , cette etape est complexe a cause de sa forme atypique , **la figure 2.5** presente quelque Paramètre de sa géometrie.

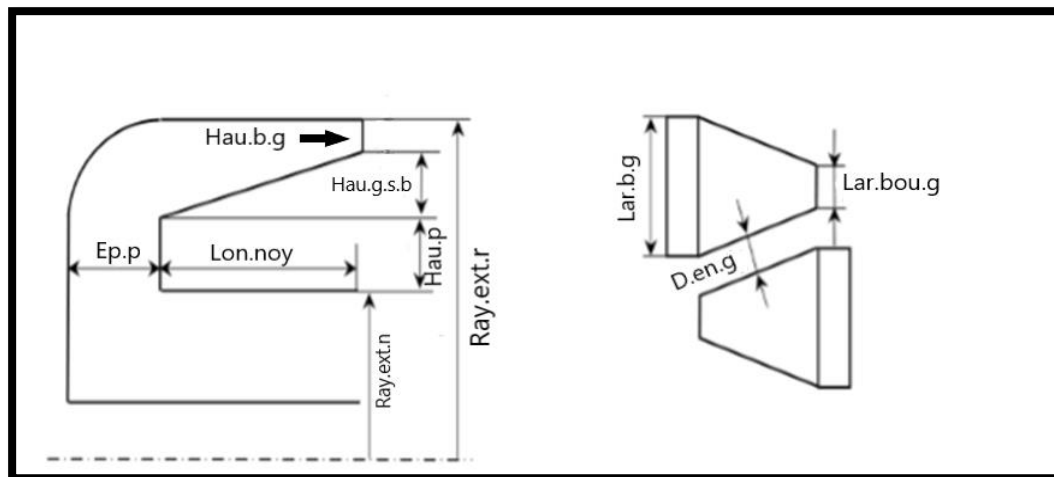


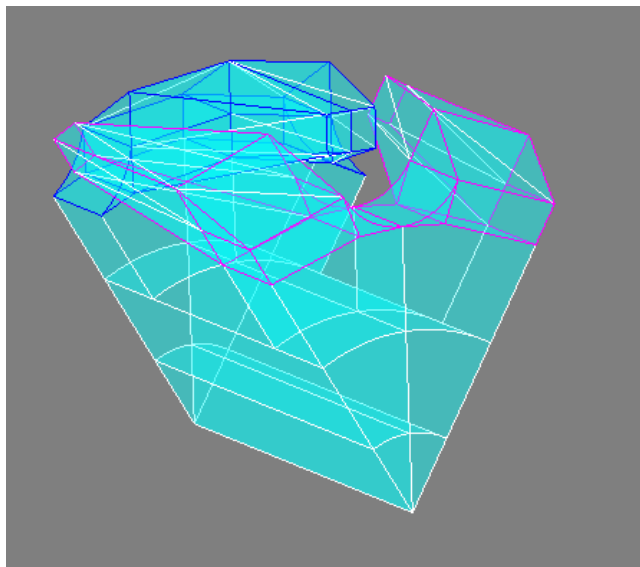
Figure 2.6. Quelque Paramètres géométriques du rotor

Les paramètres géométriques du rotor sont indiqués dans le tableau suivant :

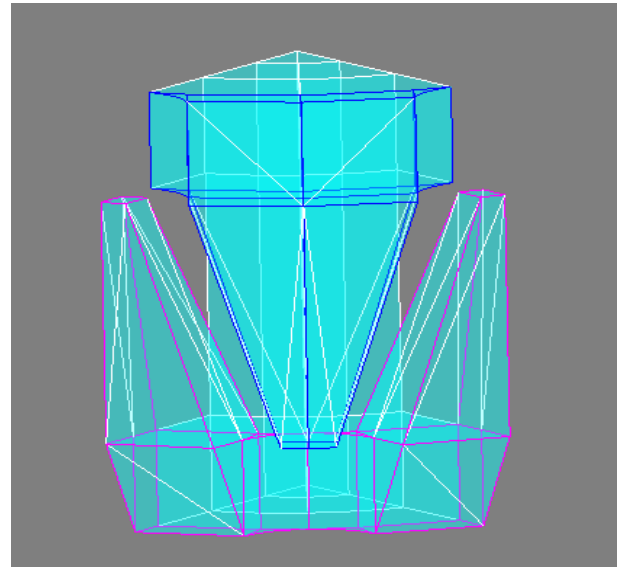
Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

Nombre	Référence	Paramètre géométrie	Valeur
1	Lon.noy	Longueur du noyau	29mm
2	Ep.p	Epaisseur du plateau	11.5mm
3	Ray.ext.n	Rayon extérieur du noyau	20.7mm
4	Hau.p	Hauteur du plateau	11.95mm
5	Hau.b.g	Hauteur du bout de la griffe	4.7mm
6	Ray.ext.r	Rayon extérieur du rotor	43.65mm
7	Hau.g.s.b	Hauteur de la griffe sans le bout	6.3mm
8	Lar.b.g	Largeur de la base d'une griffe	24.7mm
9	Lar.bou.g	Largeur du bout d'une griffe	6mm
10	D.en.g	Distance entre griffe	6.6mm

Tableau 2.2. les Paramètres géométriques du rotor



(a)



(b)

Figure2.7 . rotor de l'alternateur à griffes sur **Flux-3d**

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

2.11.2 Création des matériaux magnétiques

Un matériau magnétique est caractérisé par un ensemble de propriétés physiques. Les figures 2.8- 2.9 présentent les caractéristiques des matériaux qui sont affectés aux régions volumiques de la figure 2.10. Les régions magnétiques sont le rotor et le stator.

Nous avons attribué à la région volumique du rotor de l'acier M270-35A et à la région volumique de stator une nuance des alliages fer-silicium M800-65A, nous avons considéré que le stator est constitué d'un matériau magnétique isotrope, cette hypothèse ne correspond pas à la réalité à cause du feuilletage du matériau. Cela va donc se traduire par une imprécision sur la composante axiale de l'induction magnétique qui sera surestimée, mais les phénomènes physiques restent bien représentés. Pour connaître avec précision la répartition de l'induction magnétique dans le stator, il faudra ultérieurement déterminer les propriétés magnétiques du matériau dans les trois directions de circulation du flux magnétique dans les tôles statoriques. [3]

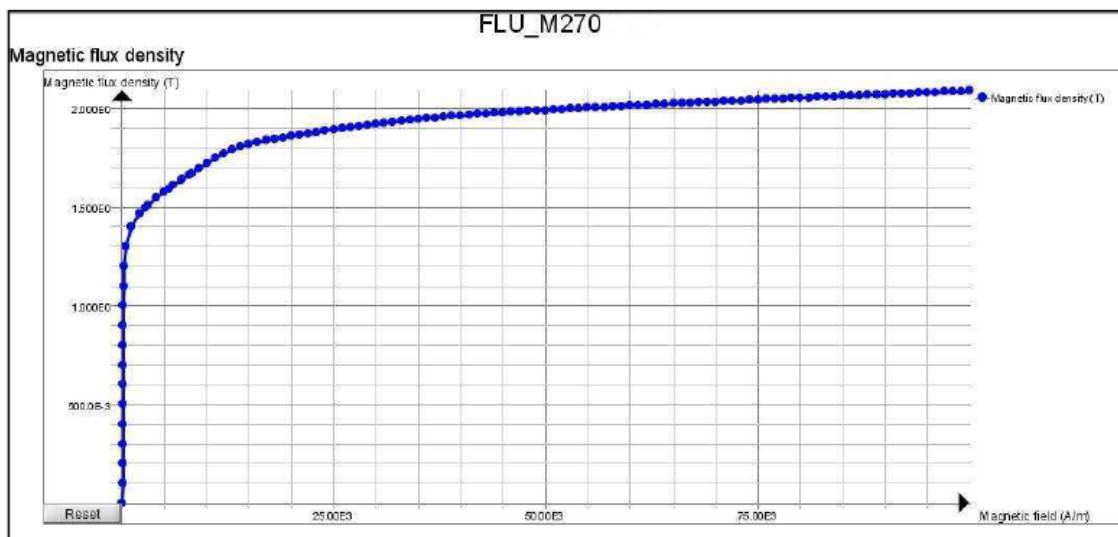


Figure 2.8. Courbe d'aimantation de matériaux magnétique au rotor

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

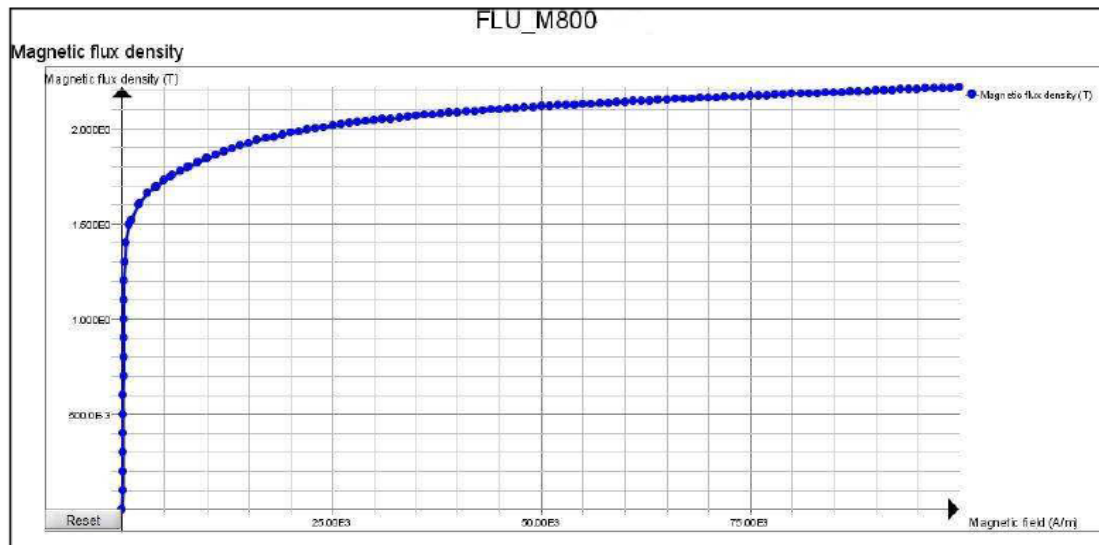


Figure 2.9. Courbe d'aimantation de matériaux magnétique au stator

2.11.3 créations des régions volumiques

Une région se définit par un groupe d'entités géométriques de même type (volumes, faces, lignes et points) qui ont les mêmes caractéristiques physiques. On décompose l'alternateur à griffes par des régions volumiques comme sont représentées dans la **figure 2.10** pour localiser les différentes parties de la machine à griffes, les régions volumiques sont créées en sélectionnant des volumes, en utilisant des noms et des commentaires, des matériaux et des couleurs ainsi des ensembles mécaniques qui permettent de définir la partie mobile et la partie fixe de la machine.

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

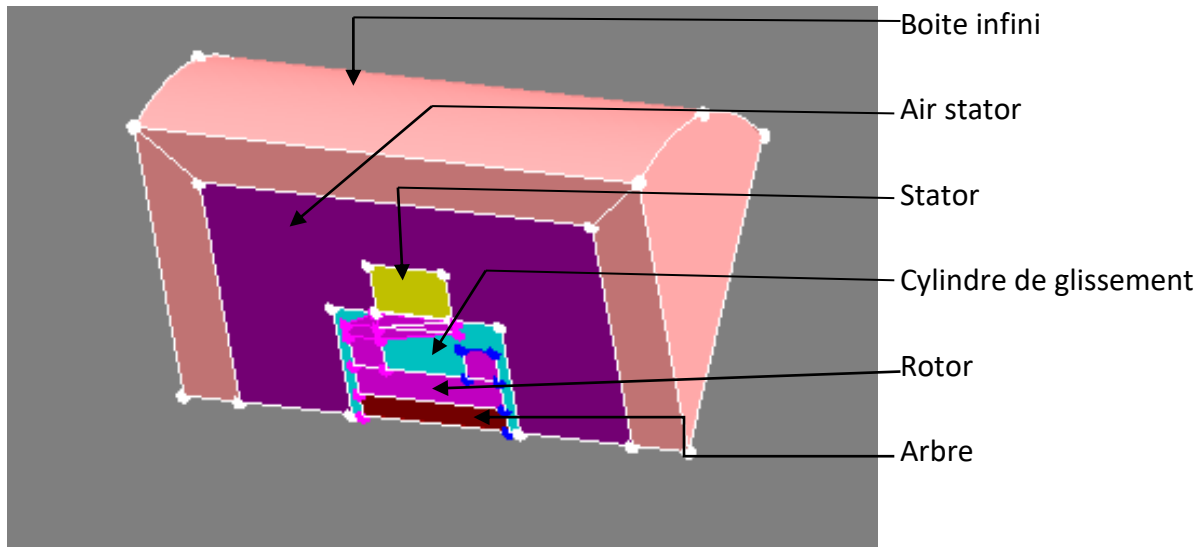


Figure 2.10. Les régions volumiques d'un alternateur à griffes

Le tableau suivant montre les caractéristiques avec le type et l'ensemble mécanique de chaque région volumique.

Nom	Couleur	Type de région		Ensemble mécanique
matériaux				
Boite infini	Crevette	Aire ou vide		Fixe
Air stator	Violet	Aire ou vide		Fixe
Stator	Jeune	Non conductrice	FLU_ M800-65A	Fixe
Cylindre de glissement	Bleu	Aire ou vide		Tournant
Rotor	Rose	Non conductrice	FLU_ M270-35A	Tournant
Arbre –rotor	Marron	Inactive		Tournant

Tableau 2.3. Caractéristiques de chaque région volumique

Chapitre2: Modélisation numérique de l'alternateur à griffes

2.12 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation d'un alternateur à griffes avec la méthode des éléments finis. En premier lieux nous avons définie la conception assistée par ordinateur pour faire l'étude des dispositifs électrotechnique d'une façon générale et les machines électrique d'une façon spéciale basée sur le logiciel flux-3d. En second lieu, nous avons présenté la première étape de la modélisation d'un alternateur à griffes, qui concerne la définition des paramètres dimensionnels de la machine à griffe, la géométrie, et l'affectation des régions volumique avec la création de matériaux et l'ensemble mécanique de chaque région.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.1 Introduction

Après avoir fini la modalisation de l'alternateur à griffes, nous allons entamer, dans ce chapitre, la résolution du modèle numérique de cette machine. L'étape la plus importante de la résolution est le maillage, qui doit être de bonne qualité. La qualité du maillage agit directement sur la précision de la solution. L'insertion des paramètres électriques relatifs aux enroulements statoriques et rotorique est une étape indispensable pour la résolution du modèle en régime magnétostatique. Pour la résolution en régime magnéto-transitoire un couplage magnétique – électrique doit être pris en considération.

3.2 Le maillage par le logiciel FLUX3D

En général, la résolution par la méthode des éléments finis comprend plusieurs étapes. Une de ces étapes est le maillage qui correspond à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres...) et nœuds sur lesquels nous calculons:

- Le potentiel magnétique dans le cas d'une application magnétique.
- Le potentiel électrique dans le cas d'une application électrique.
- La température dans le cas d'une application thermique

Les différentes étapes du maillage sont:

- la création de la discrétisation (ponctuelle ou linéique)
- l'affectation des discrétisations aux points ou aux lignes.
- le maillage du dispositif.

Dans Flux, il y a trois outils permettant de caractériser le maillage:

Chapitre 3: Résolution du modèle numérique

✚ Le type de mailleur pour définir la forme

Quatre types de mailleurs sont disponibles:

- Automatique: utilise des éléments triangulaires et tétraédriques. Son avantage est d'être simple et robuste.
- Réglié: éléments quadrangulaires et parallélépipédiques. L'avantage de ce mailleur est de permettre un contrôle facile de la qualité, adapté aux anisotropies physiques (courants de Foucault...). [12]
- Relié: ce mailleur permet de copier le maillage d'une face à une autre.
- Extrusif : il permet de créer le maillage identique sur les couches extrudées et il utilise des éléments quadrangulaires sur les cotés.

✚ Les discrétisations ponctuelles et linéiques pour définir la densité des mailles

✚ L'ordre du maillage:

- 1 er ordre
- 2ème ordre: on crée un nœud supplémentaire entre chaque deux nœuds, ce qui permet d'augmenter la précision de calcul

3.3 Le maillage de l'alternateur à griffes

Le maillage d'une géométrie 3D est une tâche délicate. Il faut trouver le bon compromis entre précision et temps de calcul tout en assurant la convergence quelque soit la géométrie.

Pour cette application Nous avons choisie pour le découpage de domaine en éléments finis de notre alternateur à griffes un mailleur automatique (découpage en triangle), Nous avons adopté un maillage de premier ordre par discrétisation ponctuelle ce qui nécessite d'affecter manuellement à chaque point du domaine d'étude une valeur de discrétisation. Les valeurs choisies pour la discrétisation ponctuelle sont rassemblées dans le **tableau 3.1**.

Chapitre 3: Résolution du modèle numérique

Rappelons que le maillage est également soumis à des conditions cycliques. A cet effet, pour un maillage entier de la machine, nous avons utilisé, pour toutes les faces côtières, un mailleur de type **relié**. Ce dernier permet de déplacer une surface maillée en suivant un mouvement simple (translation ou rotation) donc assure un maillage identique sur les plans de symétrie.

Nom de la discrétisation	Commentaire	Valeur de la discrétisation
Meshpoint_ Boite infinie	Maillage de grande dimension pour les points de la boite infinie	5
Meshpoint_ Air stator	Maillage de dimension moyenne pour les points d'air_ stator	2.5
Meshpoint_ Cylindre de glissement	Maillage de petite dimension pour les points de cylindre de glissement	0.7
Meshpoint_ Stator	Maillage de grande dimension pour les points de stator	5
Meshpoint_ Rotor	Maillage de dimension très petite pour les points de rotor	0.5

Tableau 3.1. Discrétisation ponctuelle

Après plusieurs essais, le maillage obtenu pour la géométrie de l'alternateur à griffes est présenté sur la **Figure 3.1**

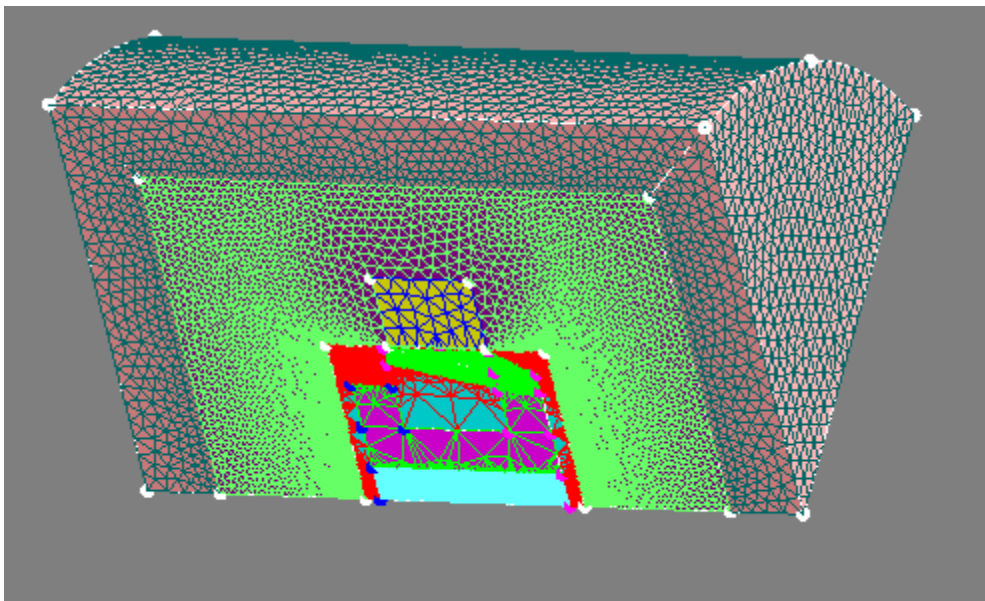


Figure 3.1 .le maillage de l'alternateur à griffes avec la boite infinie

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

Le maillage obtenu comprend 1541291 éléments volumiques du premier ordre. La qualité de maillage est par la figure 3.2 suivante :

```
Elements volumiques :  
  Nombre d'elements non evalues      : 0 %  
  Nombre d'elements d'excellente qualite : 62.68 %  
  Nombre d'elements de bonne qualite   : 29.04 %  
  Nombre d'elements de qualite moyenne : 7.5 %  
  Nombre d'elements de qualite mediocre : 0.77 %  
  
Nombre de noeuds : 268211  
Nombre d'elements lineiques : 7209  
Nombre d'elements surfaciques : 164423  
Nombre d'elements volumiques : 1541291  
Ordre de maillage : 1er ordre  
  
Verification des faces reliees ...  
  15 face(s) respecte(nt) la periodicite forte (NOEUDS + ELEMENTS).
```

Figure 3.2. résultat final de maillage

3.4 Le bobinage de l'alternateur à griffes

3.4.1 La bobine d'excitation du rotor

Le rotor est formé de deux plateaux à griffes entre les quelles est placée la bobine d'excitation de forme cylindrique alimentée en continue et de façon contrôlée par le régulateur grâce à ces deux bagues.

Dans Flux3D la bobine d'excitation du rotor fait partie des éléments non maillés. Elle doit être entièrement dessinée, la périodicité et la symétrie cyclique ne sont pas pris en compte. Les paramètres géométriques et électriques sont représentés dans les tableaux suivants

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

Paramètres géométriques

Les paramètres	Les valeurs
Le type	Bobine circulaire
La longueur	La longueur de noyau
La largeur	2mm
Le rayon	Le rayon de noyau

Tableau 3.2. les paramètres géométrique de la bobine rotorique

Paramètres électriques.

Les paramètres	Les valeurs
le nombre de spires	200 spires
Coefficient de foisonnement	0.5
Courant d'excitation	2A
La résistivité	$17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$

Tableau 3.3. Les paramètres électriques de la bobine rotorique

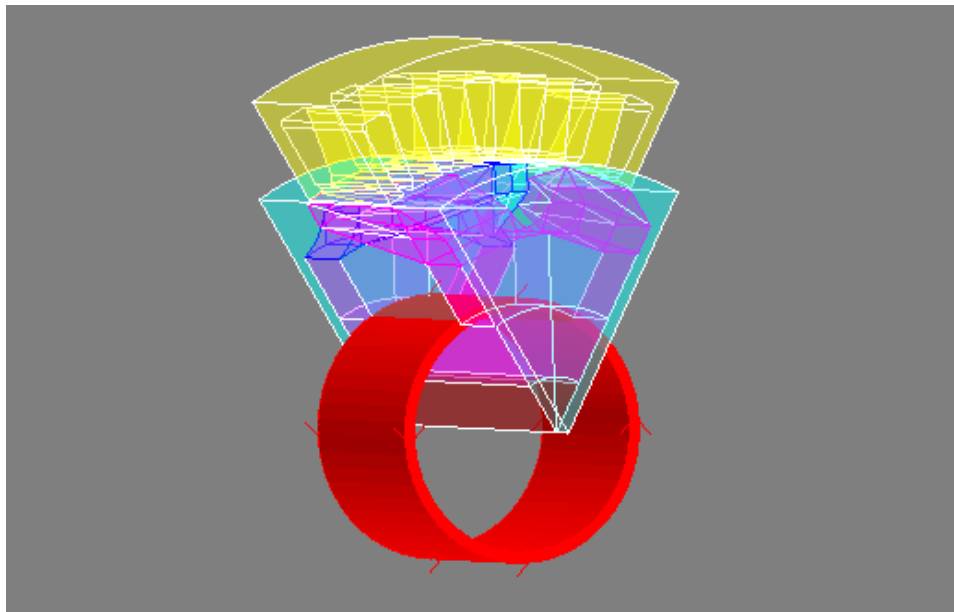


Figure3.3. bobinage cylindrique inséré entre les plateaux à griffes

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.4.2 Le bobinage du stator

Le stator de l'alternateur à griffes comprend trois bobines déphasées de $(3\pi)/2$ couplé en étoile permettant la production d'un réseau triphasé alternatif.

✚ Calcule du nombre d'encoches par pole et par phase (n_e)

L'équation **(3.1)** représente la formule du calcul du nombre d'encoche par pole et par phase

$$n_e = Z / (P_0 * m) \quad (3.1)$$

Avec :

Z : le nombre total d'encoches

P_0 : le nombre de pôles

m : le nombre de phase

Z	36 encoches
P_0	12
m	3

D'après l'équation **(3.1)** on peut dire que nous avons un bobinage statorique d'une encoche par pole et par phase.

✚ Le pas diamétral (pas normal)

Le pas de bobinage c'est un pas diamétral c'est à dire égal aux nombre d'encoches sur le nombre de pôles.

$$\text{Pas diamétrale} = Z / P_0 \quad (3.2)$$

D'après l'équation **(3.2)** le pas diamétral est égal à 3.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

✚ Les paramètres géométriques et électriques de ces enroulements statoriques sont représentées dans le tableau suivant :

Les paramètres	Les valeurs
le nombre de spires	11spires
Coefficient de foisonnement	0.5
La résistivité	$17 \cdot 10^{-9} \Omega.m$
Rayon de la section	0.8

Tableau 3.4. Les paramètres des enroulements statoriques

Comme pour le rotor, On utilise des bobines non maillées. Ces dernières doivent être créées point par point sur tout le chemin d'enroulement statorique sur le logiciel flux-3D. Pour cela on doit créer un repère pour imposer ou commencer le premier point de cette phase. Ensuite on détermine le chemin de l'enroulement par calcul des coordonnées de chaque point du trajet jusqu'à avoir une bobine complète, avec des conducteurs en série. Ces opérations doivent être répétées avec les deux autres enroulements avec un décalage de trois encoches (pas de bobinage).

Les trois enroulements statoriques sont illustrés par la figure 3.4 suivante

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

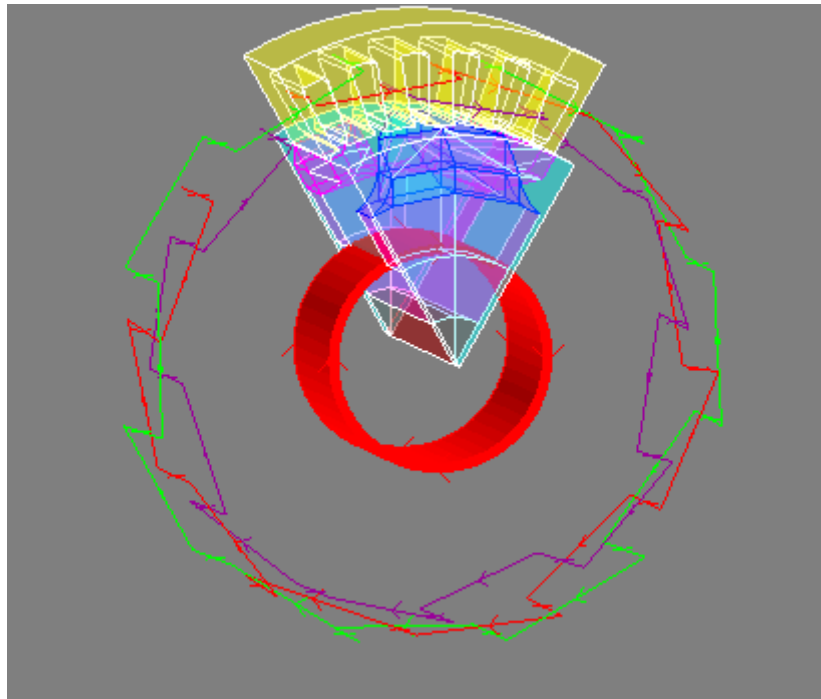


Figure 3.4. Les enroulements de l'alternateur à griffes

La figure 3.5 ci-dessous représente l'entrée et sortie (le sens du courant) de ces enroulements statoriques. Seulement le 6^{ème} de l'alternateur est présenté.

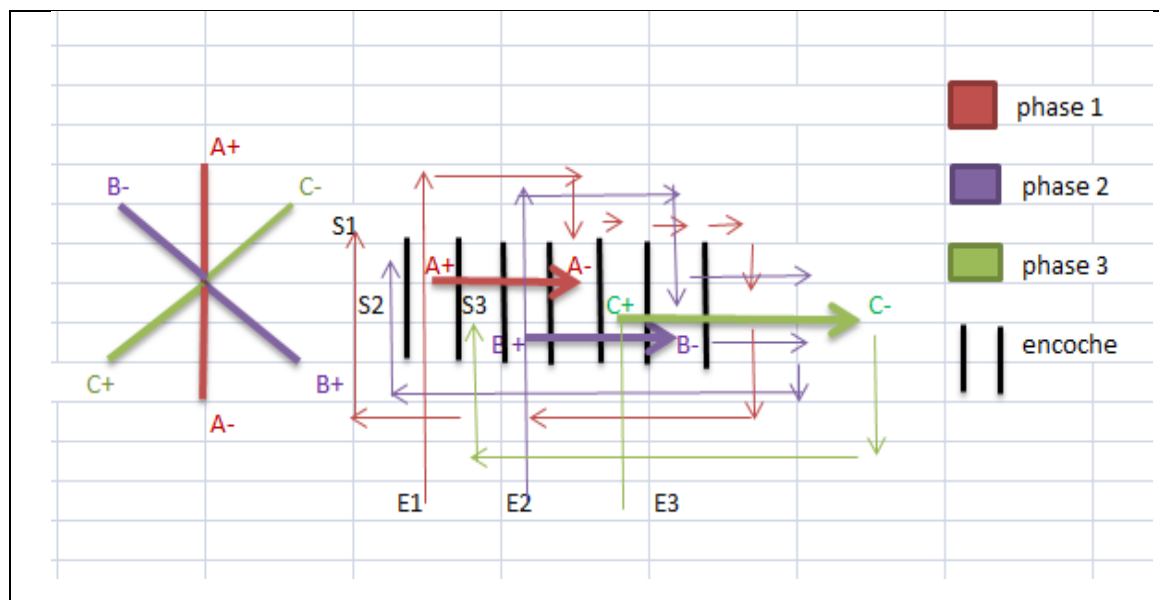


Figure 3.5. L'entrée et sortie d'enroulement statorique

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.5 Couplage Circuit électrique

Les bobines du stator sont reliées au circuit électrique en étoile de la **figure 3.4**. Pour un couplage magnéto-électrique, on relie les phases représentées par les bobines B1, B2 et B3 à des charges, résistives. Pour avoir un système triphasé alternatif à la sortie de la l'alternateur à griffes et résolve le modèle en magnéto-transitoire.

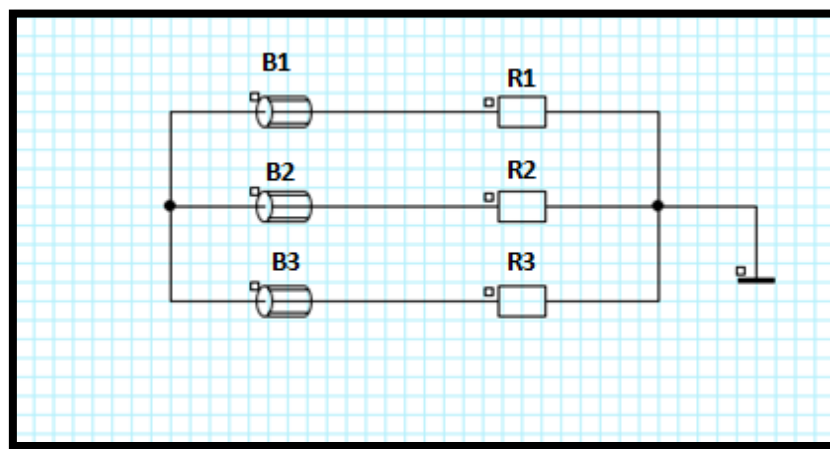


Figure 3.6. Couplage en étoile de circuit extérieur

3.6 Le scénario de la résolution

La première étape à faire avant le lancement de la résolution c'est de choisir l'application qui correspond au scénario qu'on veut résoudre, c'est-à-dire choisir le nombre de pas par période et les bornes de l'intervalle (valeur min et valeur max), une fois le scénario crée on lance la résolution soit en magnétostatique ou en magnéto-transitoire. Plusieurs essais doivent être réalisés pour le choix du bon pas de calcul qui assure la convergence du programme de résolution.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.7 Conclusion

Le maillage est une étape très importante de la résolution numérique par éléments finis de cet alternateur, la qualité de maillage influe directement sur la précision de la solution du modèle. La résolution du modèle impose l'insertion des paramètres électriques aux bobine d'excitation du rotor qui est la source de champ d'induction magnétique de la machine ainsi qu' aux trois enroulements statorique, en tenant compte du nombre de paire de pôles et le nombre totale d'encoche statorique afin d'assurer la création d'un système alternatif triphasé à la sortie de l'alternateur à griffes.

Chapitre 4: simulation et validation du modèle

4.1 Introduction

Ce dernier chapitre consiste en l'exploitation des résultats de la résolution du modèle numérique de l'alternateur à griffes. Deux types de résolutions seront étudiés. La première résolution concernera une simulation, en magnétostatique, à vide. La seconde résolution s'agit de deux simulations en régime magnéto-transitoire, une à vide et la seconde en charge. En dernier lieu, une étude sur l'effet de certains paramètres géométriques sur le rendement de la machine à griffes sera présentée

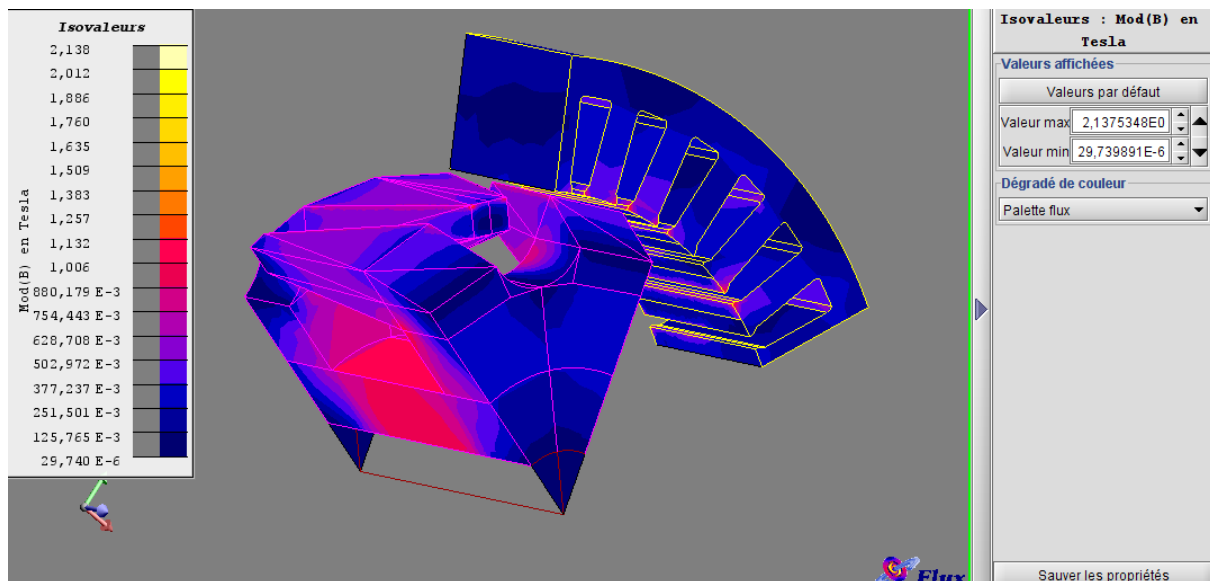
4.2 Résolution en Magnétostatiques à vide

La simulation en magnétostatique, à vide, permet d'observer la répartition et le trajet de l'induction magnétique de la machine ainsi que l'état de saturation du circuit magnétique.

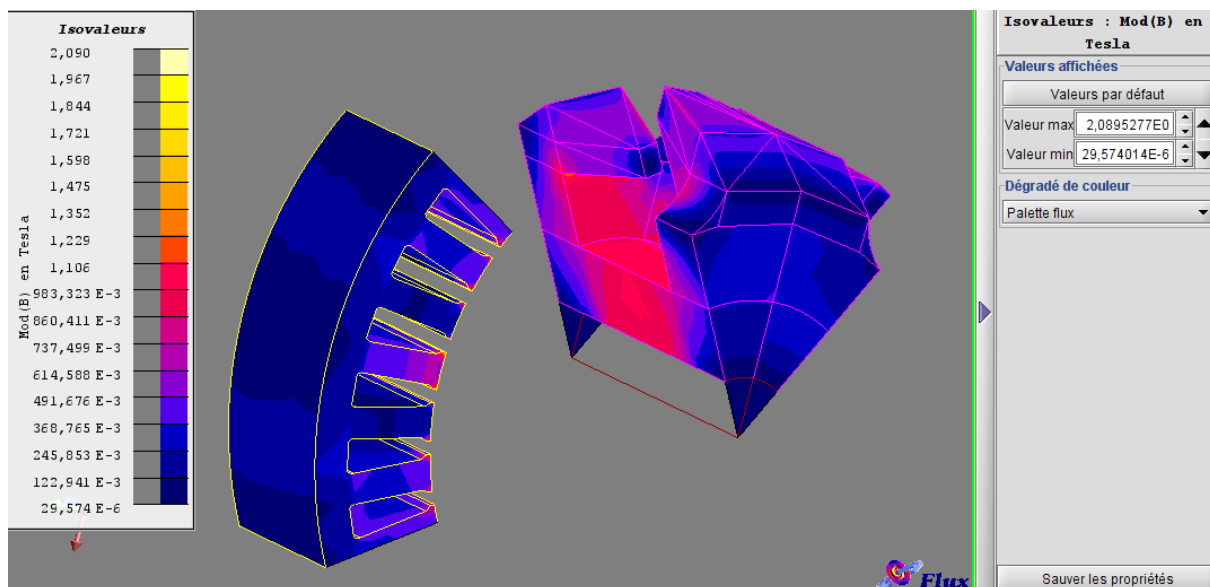
4.2.1 L'induction magnétique dans la machine à griffes

Nous avons effectué un calcul en multi positions à vide, en imposant un courant d'excitation de 2A dans l'enroulement rotorique. La figure 4.1 montre le dégradé de l'induction magnétique de notre alternateur. Nous constatons que l'induction dans le noyau peut atteindre une valeur élevée (1.227 T) à cause de la bobine d'excitation qui se trouve a ce niveau, plus la machine sera éloignée de cette dernière plus l'induction diminue. La valeur dans les plateaux est de (0.880 T) et de (0.754 T) dans les griffes. Concernent l'induction magnétique du stator, on remarque qu'elle est faible relativement à l'induction du rotor, surtout au niveau de la culasse pour une valeur de (0.125 T) par contre on observe une valeur un peu plus grande au niveau des dents statorique (0.628 T).

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle



(a)



(b)

Figure4.1. Dégradé de l'induction magnétique à vide pour une position donnée à 45 et 90 degré

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

4.2.2 L'effet du paramètre courant d'excitation sur l'état de saturation de la machine

Nous avons imposé des différentes valeurs du courant d'excitation 5A, et 6A en multi positions comme sont représentées dans les figures suivantes afin de faire connaître l'effet du courant d'excitation sur l'induction magnétique de la machine.

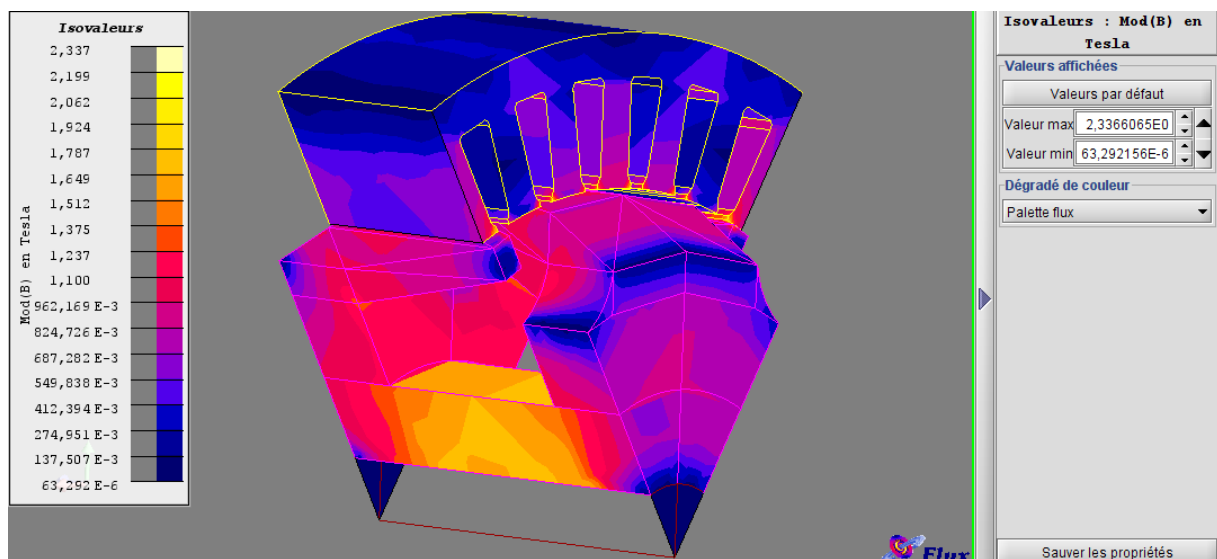


Figure4.2. Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 5A

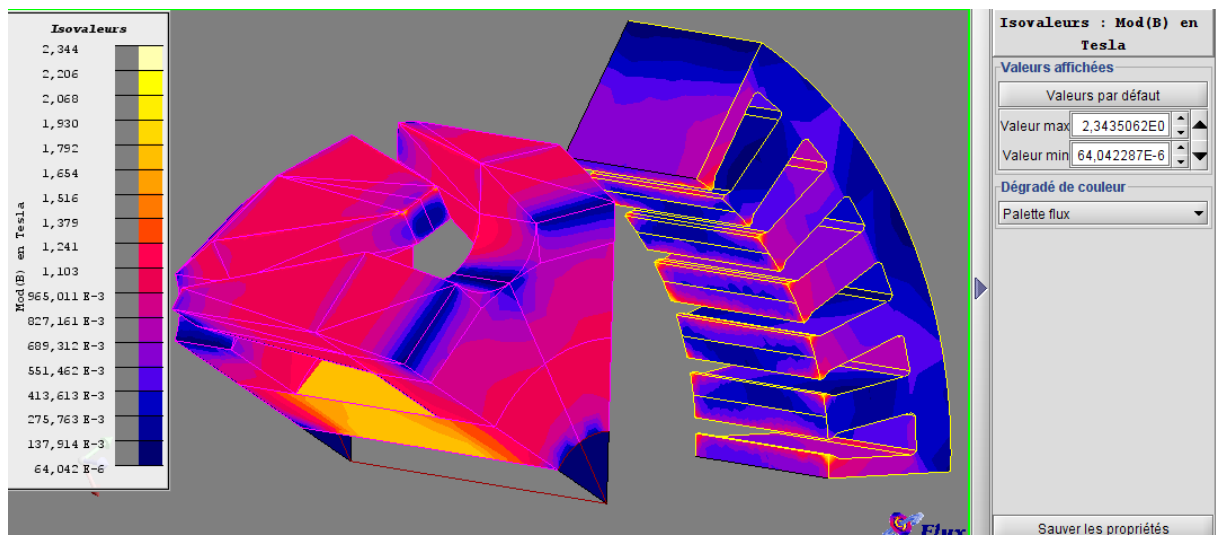


Figure4.3. Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 6A

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

D'après le dégradé des couleurs des figures précédentes. Nous avons constaté que pour un courant d'excitation de 5 A, le noyau a atteint la valeur maximale de l'induction (1.924 T). La couleur à ce niveau est jaune. Cette couleur exprime que la machine est en état de saturation.

Pour le courant d'excitation de 2A la machine n'est pas saturé elle fonctionne en zone linéaire. Plus le courant d'excitation augmente et plus B augmente et conduit la machine à l'état de saturation. Ce changement de courant d'excitation se fait par un régulateur qui pilote le courant d'excitation en fonction de la vitesse pour régler la tension à la sortie de l'alternateur afin de pour pouvoir charger la batterie.

La figure ci dessous représente le dégradé de couleur de l'induction magnétique de la machine à une position donnée à un courant d'excitation de 8A, la machine est fortement saturée.

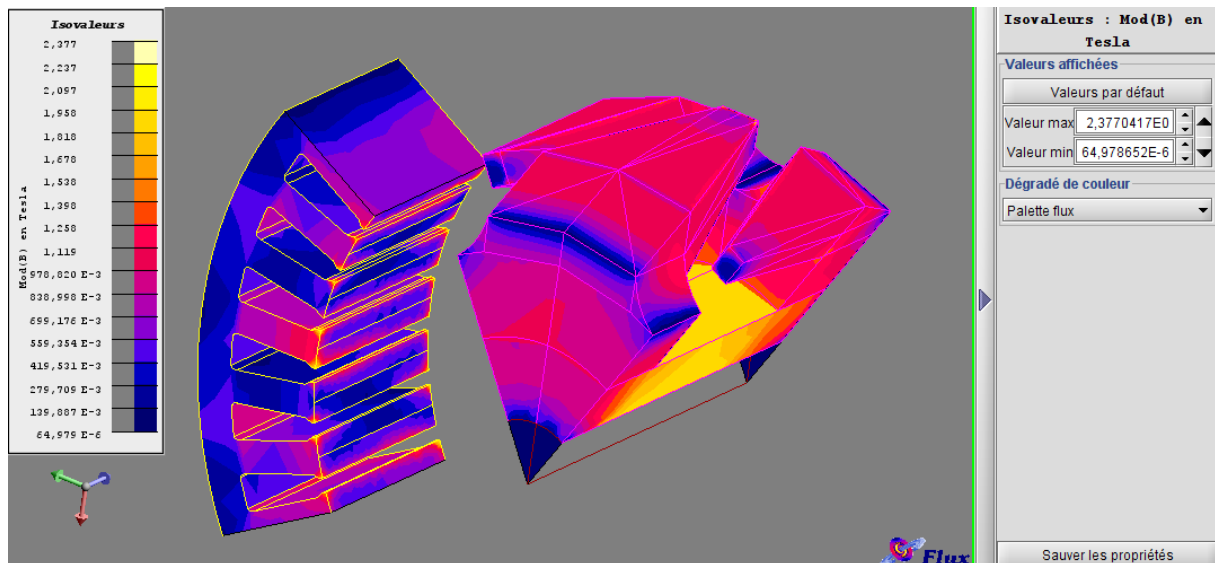


Figure4.4. Dégradé de l'induction magnétique à vide avec un courant de 8A

4.2.3 Le trajet de flux dans la machine à griffes

La géométrie de l'alternateur à griffes est complexe notamment au niveau du rotor ce qui induit un trajet de flux en 3D. La figure 4.5 représente le trajet de flux dans l'ensemble de l'alternateur à griffes.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

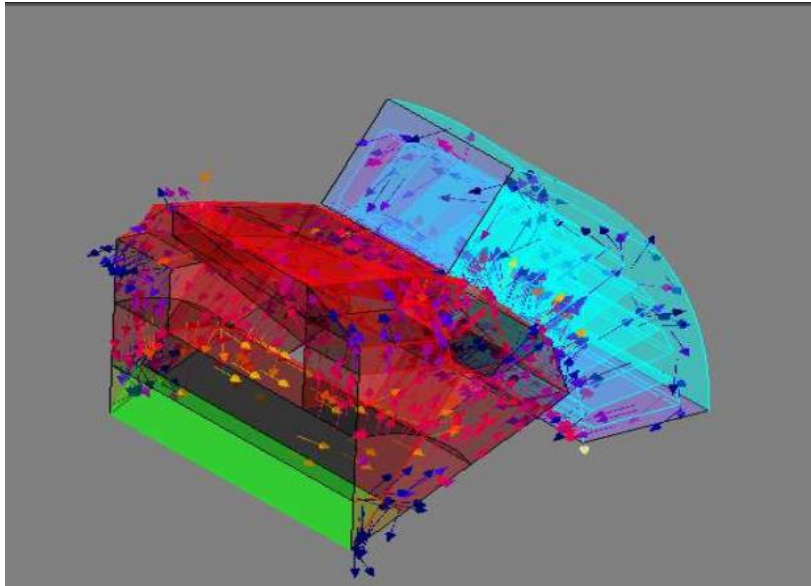


Figure 4.5. Le trajet de flux dans l'ensemble de l'alternateur à griffes

La bobine d'excitation enroulée autour du noyau génère un flux inducteur axial. On a donc d'un côté du noyau un flux entrant et de l'autre un flux sortant. Ce flux transite verticalement (radial) en direction du stator par les deux plateaux qui sont respectivement polarisés nord/sud. Le flux dans les griffes est axial et radial toujours en direction du stator. Il traverse ensuite l'entrefer qui contient une succession de pôles nord et sud. Il passe dans la denture statorique (tout cela dans une direction radiale) et passe dans la culasse où là le champ à une direction azimuthale (dans le sens du feuilletage). Il faut bien observer que le flux qui sort d'une griffe se sépare en deux pour redescendre par polarité opposée, après le passage dans le stator, dans les deux griffes adjacentes.

Les figures suivantes représentent le trajet de flux dans le rotor et stator.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

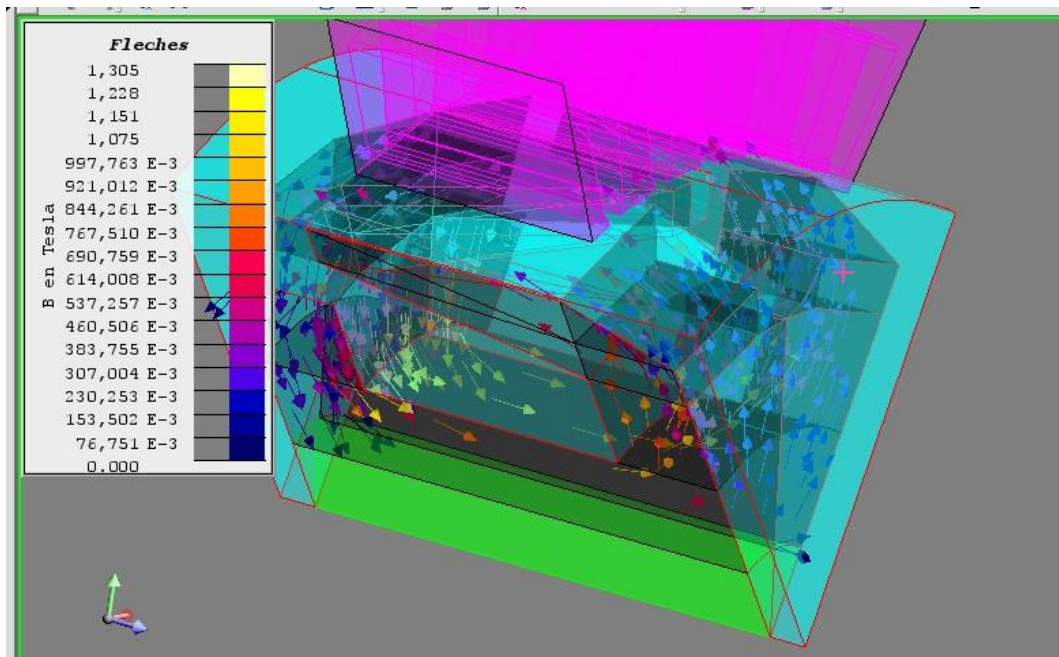


Figure 4.6. Le trajet de flux dans le rotor

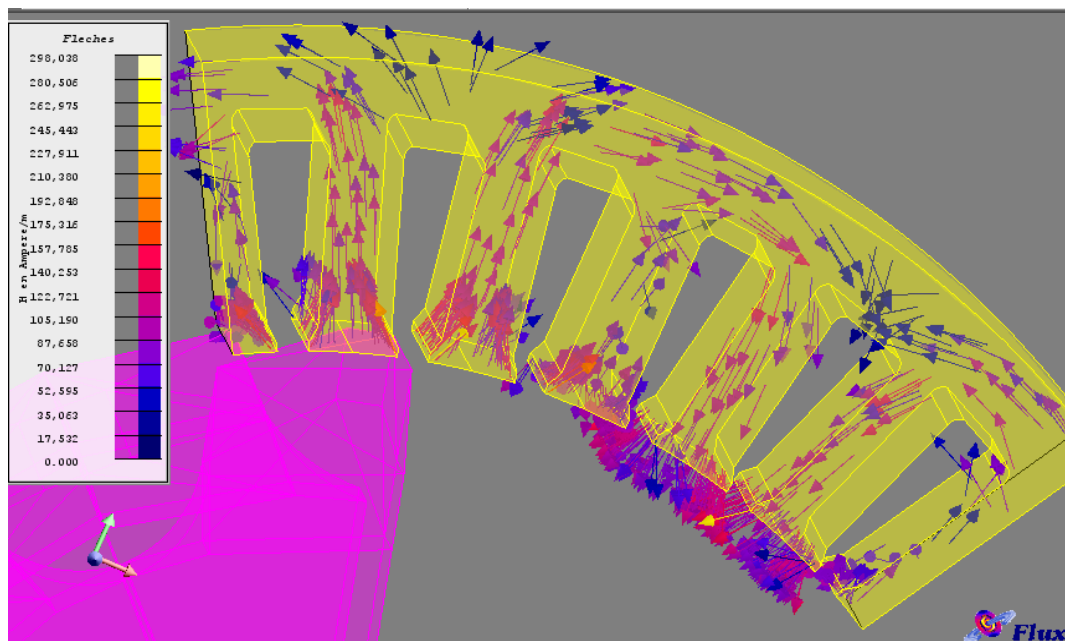


Figure 4.7. Le trajet de flux dans le stator

La forte excitation magnétique du rotor combinée avec la spécificité de la géométrie implique des fuites magnétiques importantes, surtout entre griffes. Ces fuites prennent de l'importance lorsque le matériau magnétique est saturé. A cause de cela la machine donne un mauvais rendement.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

4.3 Résolution en régime magnéto-transitoire

4.3.1 Caractéristique à vide

La résolution du fonctionnement à vide de l'alternateur est faite en magnétique évolutif, les bobines du stator sont reliées au circuit électrique, et un courant imposé au rotor avec la prise en compte de son mouvement, ce qui permet d'imposer une vitesse de rotation. Nous avons effectué l'opération de calculs à une vitesse de 1500 tour/min avec une position initiale nulle. L'alternateur est simulé à vide.

La première chose à faire après la résolution est de tracer la FEM à vide, cela nous confirme que le bobinage est bien fait, par ce que le choix du type de bobinage assure le décalage des trois phases statorique et la valeur de l'induction magnétique assure l'amplitude pour les tensions à la sortie.

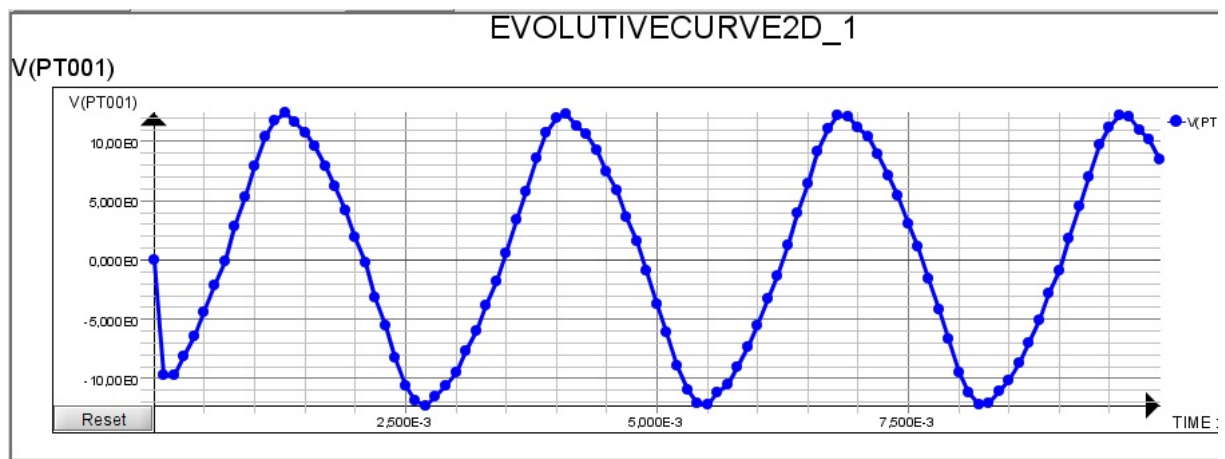


Figure 4.8. La force électromotrice à vide

La force électromotrice dépend du champ magnétique créé par l'inducteur. (Elle est le lien entre le flux qui est une grandeur magnétique et la tension qui est une grandeur électrique), donc elle est proportionnelle au courant d'excitation. En manipulant le courant d'excitation, on peut faire varier la FEM.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

4.3.2 Validation du modèle de l'alternateur à griffes

a Description du banc d'essai

Le Banc d'essai comporte l'alternateur à griffes, une alimentation continue pour l'excitation de rotor, un moteur asynchrone pour l'entraînement de rotor de l'alternateur qui joue le rôle de moteur à combustion, un variateur de vitesse pour régler la vitesse de moteur synchrone, un oscilloscope pour visualiser la tension de sortie de l'alternateur.



Figure 4.9. Le banc d'essai

b Mesure de la FEM à vide

On fait un essai à vide de l'alternateur pour extraire la tension simple de l'alternateur, tous d'abord on règle l'alimentation continue pour la bobine excitatrice avec un courant de 2A. On impose une vitesse de 1500 tr/min sur le variateur de vitesse donc le moteur synchrone tourne avec la même vitesse. Ensuite on prend la tension simple de l'alternateur par l'oscilloscope.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

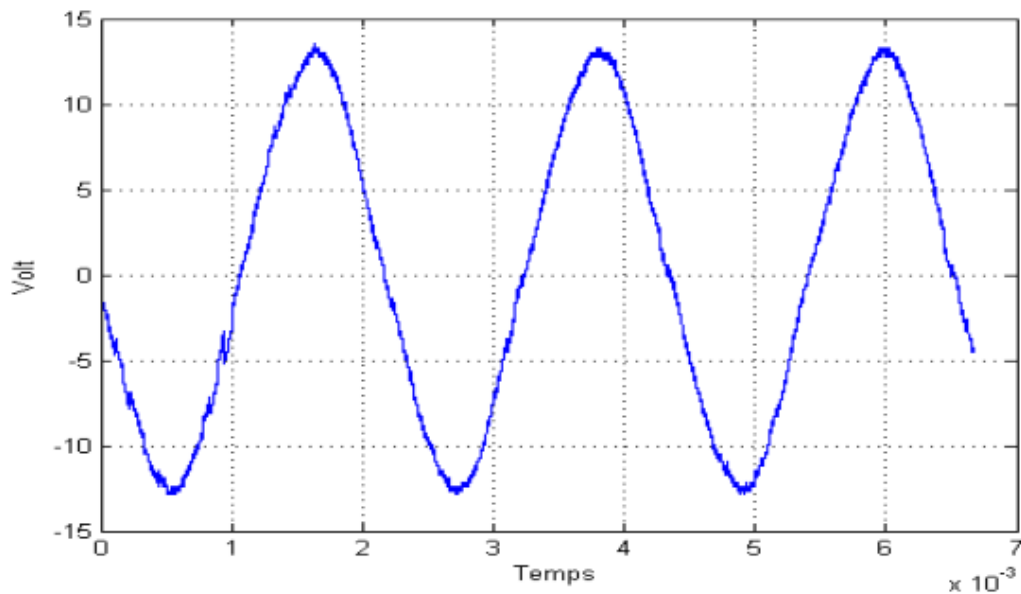


Figure 4.10. La tension de sortie de l'alternateur a 1500 tr/min

On remarque que, la FEM à vide obtenue par les mesures sur l'alternateur et la FEM obtenue par la résolution du modèle numérique sont pratiquement identiques. Elles possèdent la même fréquence et la même amplitude.

4.3.3 Caractéristique en charge et calcul du rendement

La seconde simulation est la simulation en charge. C'est le mode de fonctionnement le plus lourd en terme du temps de calculs. Nous avons effectué des calculs pour un point de fonctionnement où la machine est en état de saturation. La vitesse de rotation est de 6000 tours/min, et une charge nominale de 5 Ω . Le courant d'excitation est fixé à 5A. Les figures suivantes représentent la valeur de tension et courant à la sortie de l'alternateur dans ce point de fonctionnement

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

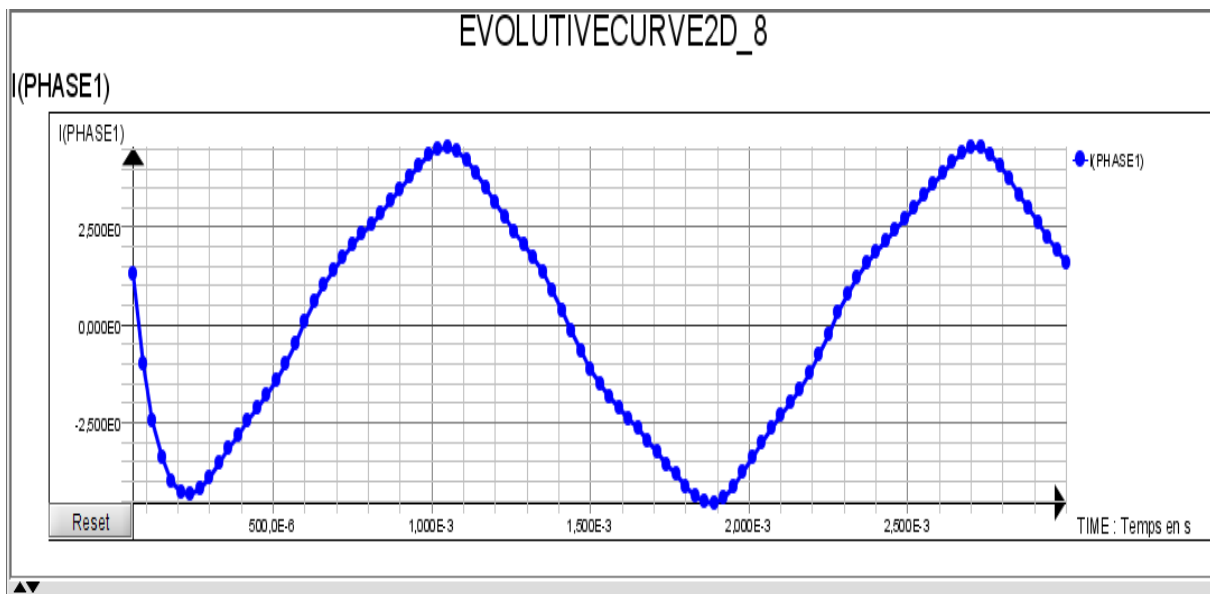


Figure 4.11. Le courant de sortie de l'alternateur à griffes

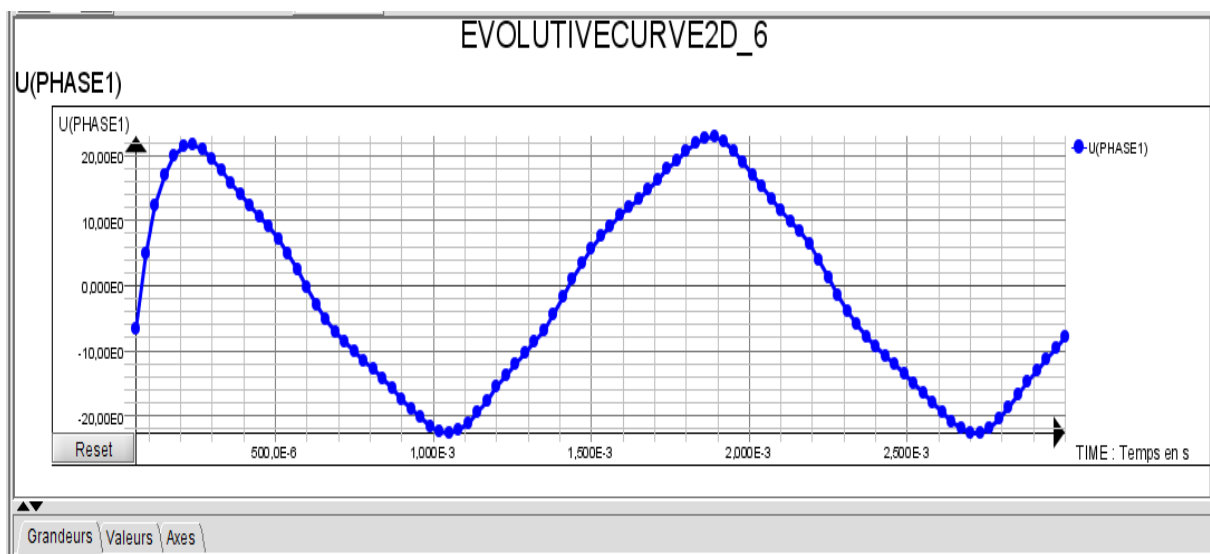


Figure 4.12. La tension de sortie de l'alternateur à griffes

calcul du rendement de la machine à griffes

Dans cette partie, nous allons utiliser la totalité du modèle (magnétique et électrique) pour calculer le rendement, qui est le rapport entre la puissance électrique utile et la puissance mécanique absorbée par l'induit, d'où

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

L'alternateur reçoit une puissance absorbée P_a , produite du moment du couple utile provenant d'un système auxiliaire (machine asynchrone dans notre cas) et de la vitesse angulaire, et Fournie une puissance électrique P_u .
donc les puissances mises en jeu dans ce point de fonctionnement peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

$$\bullet P_u = 3 * U_{eff} * I_{eff} \quad (4.1)$$

Avec :

U_{eff} La tension efficace de sortie de l'alternateur à griffes dont la valeur est de 16.190 V

I_{eff} Le courant efficace de sortie de l'alternateur dont la valeur est de 3.568 A

Ces valeurs sont obtenues à partir des deux simulations ci-dessus.

D'après la relation **(4.1)** la puissance électrique est égale à 173.295 w

Concernant la puissance absorbée, nous avons :

$$\diamond P_a = C_u * V \quad (4.2)$$

Avec :

C_u le couple utile mesuré, il est de 0.551 N.m, et V est La vitesse angulaire qui égale à 628.3 rad/s qui correspond à 6000tr/min

On obtient alors la puissance absorbée égale à 346.193 W

Tous calculs faits, donc le rendement final de la machine pour ce point de fonctionnement est de 51%

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

4.4 L'effet de quelques paramètres géométriques sur le rendement

L'objectif de cette partie est d'observer la sensibilité du rendement à quelques paramètres géométriques de l'alternateur. Ceci sera effectué sur le même point de fonctionnement précédent.

Nous avons choisi trois paramètres géométriques, importants, qui constituent la griffe du rotor, à savoir, **Hauteur du bout du bec**, **Largeur du bout du bec** et **Largeur de la base de la griffe**. La plage de variation de ces paramètres doit respecter la cohérence géométrique du rotor. Cependant, la forme trapézoïdale de la griffe ainsi que le diamètre du rotor doivent être maintenus.

Les limites, inférieures et supérieures des paramètres géométriques sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres géométriques (mm)	Valeur de référence	Limites	
		Inferieur	Supérieur
Hauteur du bout du bec (mm)	4.7	4.2	5.2
Largeur du bout du bec (mm)	6	5.5	7
Largeur de la base de la griffe (mm)	24.7	23.7	25.7

Tableau 4.1. Les limites liées aux cohérences géométriques

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

❖ L'effet du paramètre « Hauteur du bout du bec » sur le rendement :

Vu la grande consommation en temps de calcul par les algorithmes de résolutions, nous avons jugé suffisant de prendre trois valeurs seulement pour ce paramètre. La valeur (4.7mm) représente la valeur de référence.

Paramètres géométriques	Valeurs		
Hauteur du bout de bec (mm)	4.2	4.7	5.2
Rendement (%)	66.5	51	62.4

Tableau 4.2. variation du rendement en fonction du paramètre « Hauteur du bout du bec »

On remarque, selon les résultats obtenus par le tableau 4.2, que le rendement est plus important lorsque le paramètre «Hauteur du bout de bec » est différent de sa valeur de références.

❖ L'effet du paramètre « largeur du bout du bec» sur le rendement :

Le paramètre « largeur du bout du bec » est un paramètre important car il est directement lié à la surface de la griffe. Cependant nous avons décidé de prendre quatre valeurs différentes. La valeur (6mm) représente la valeur de référence.

Paramètres géométriques	Valeurs			
largeur de bout de bec (mm)	5.5	6	6.6	7
Rendement (%)	67	51	61.25	59.73

Tableau 4.3. Variation du rendement en fonction du paramètre « Largeur du bout du bec »

Selon les résultats du tableau 4.3. On constate que le rendement est meilleur pour une valeur de « largeur du bout du bec » plus petite que celle de référence.

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

❖ L'effet du paramètre « Largeur de la base de la griffe » sur le rendement :

Selon la figure 4.6 qui représente le trajet du flux dans le rotor, on remarque que l'induction magnétique est plus importante au niveau de la base de la griffe qu'au bout de la griffe. Ceci explique l'importance de ce paramètre. La valeur 24.7mm est la valeur de référence.

Paramètres géométriques	Valeurs			
Largeur de la base de la griffe (mm)	23.7	24.7	25.13	25.7
Rendement (%)	52.37	51	49.14	48.81

Tableau 4.4.variation du rendement en fonction du paramètre
«Largeur de la base de la griffe »

On remarque que plus la largeur de la base est large le rendement diminue Ceci est dû à l'augmentation des flux de fuites entre griffes adjacentes

Chapitre 4 : simulation et validation du modèle

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre Nous avons fait des simulations sur le modèle numérique de l'alternateur à griffes. En premier temps nous avons simulé le modèle numérique en magnétostatique pour avoir le dégradé de l'induction magnétique et l'effet de courant d'excitation sur l'état de saturation de la machine ainsi que le trajet de flux dans cet alternateur à griffes. Ensuite Nous avons simulé ce modèle en transitoire pour tracé la FEM en fonctionnement à vide. Une comparaison entre la FEM tracé d'après la résolution transitoire et la FEM mesuré au banc d'essai a été représentée afin de valider le modèle. La dernière partie de ce chapitre a été dédiée à l'observation de la sensibilité du rendement à quelques paramètres géométriques de la griffe de l'alternateur.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une étude de l'effet de quelques paramètres géométriques, que nous avons jugé importants, sur le rendement de l'alternateur à griffes. Ce travail a été basé sur le logiciel FLUX3D

Le premier chapitre a fait l'objet de la présentation de la machines à griffes. Les éléments constitutifs de l'alternateur, son principe de fonctionnement et son rendement ont été détaillés. Les avantages et les inconvénients ont été cités

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation numérique de l'alternateur à griffes avec la méthode d'éléments finis, en utilisant le logiciel FLUX3D. Cette modélisation prend en considération la géométrie réelle de la machine, les matériaux utilisés ainsi que l'effet de saturation.

Le troisième chapitre a porté sur la résolution numérique de l'alternateur à griffes. Deux applications ont été développées. La première en magnétostatique et la seconde en magnéto transitoire ou le couplage magnétique et électrique est pris en compte. La première étape de résolution du modèle est le maillage. Cette étape est très délicate et demande énormément de temps pour pouvoir trouvé le meilleur compromis entre précision est temps de calcul. Le même maillage a été effectué pour les deux applications. Pour avoir une f.e.m triphasée un bobinage adéquat du stator a été programmé.

Le chapitre quatre a été dédié à la résolution du modèle et à l'exploitation des résultats. En magnétostatique, la résolution du modèle nous a permis de voir le trajet du flux ainsi que l'état de saturation de la machine en fonction du courant d'excitation. La résolution en régime transitoire nous a permis de tracé la FEM à vide. Cette dernière a été validée par les essais à vide effectués sur le banc d'essai.

Le rendement a été calculé en un point de fonctionnement assez important, c'est au point ou la vitesse de rotation est égale à 6000tr/min. cette vitesse est appelée la vitesse de croisière de l'alternateur. Le débit en courant de l'alternateur ne peut augmenter au-delà de cette vitesse.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'observer la sensibilité du rendement à quelques paramètres géométriques du rotor, et spécialement, ceux de la griffe. Trois paramètres ont été choisis. La base de la griffe, la hauteur et la largeur du bout du bec. La variation, de ces paramètres, un par un, sur une plage limitées par les contraintes liées à la cohérence géométrique de la griffes nous a permis de conclure que la géométrie actuelle de la griffe de cette alternateur donne le rendement le plus bas, et la moindre variation de l'un des trois paramètres choisis donne un rendement bien meilleur.



Figure 1 : l'alimentation en courant continu



Figure 2 : le variateur de vitesse



Figure 3 : le moteur asynchrone d'entrainement



Figure 4 : l'alternateur à griffes

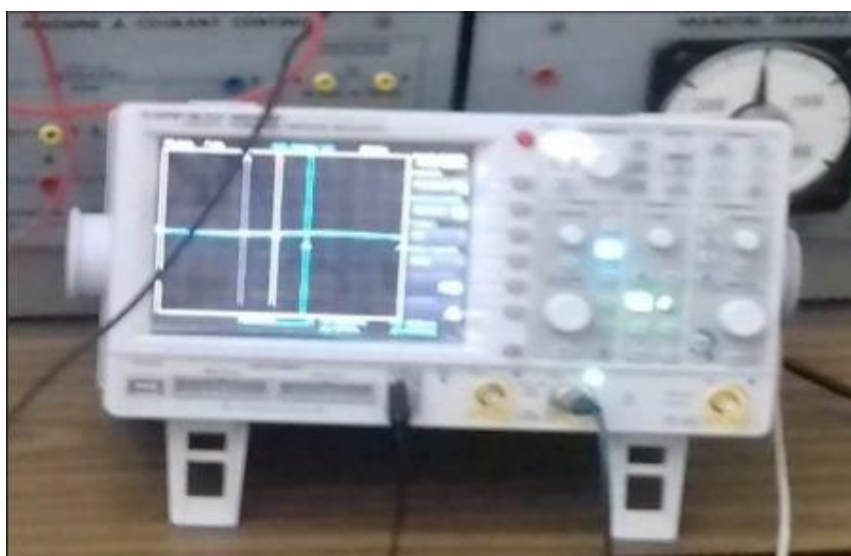


Figure 5 : oscilloscope



Figure 6 : rotor de l'alternateur à griffes

Flux 3D est un logiciel de conception assisté par ordinateur utilisant la méthode des éléments fini. Flux est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A et maintenant par la société ALTAIRE.

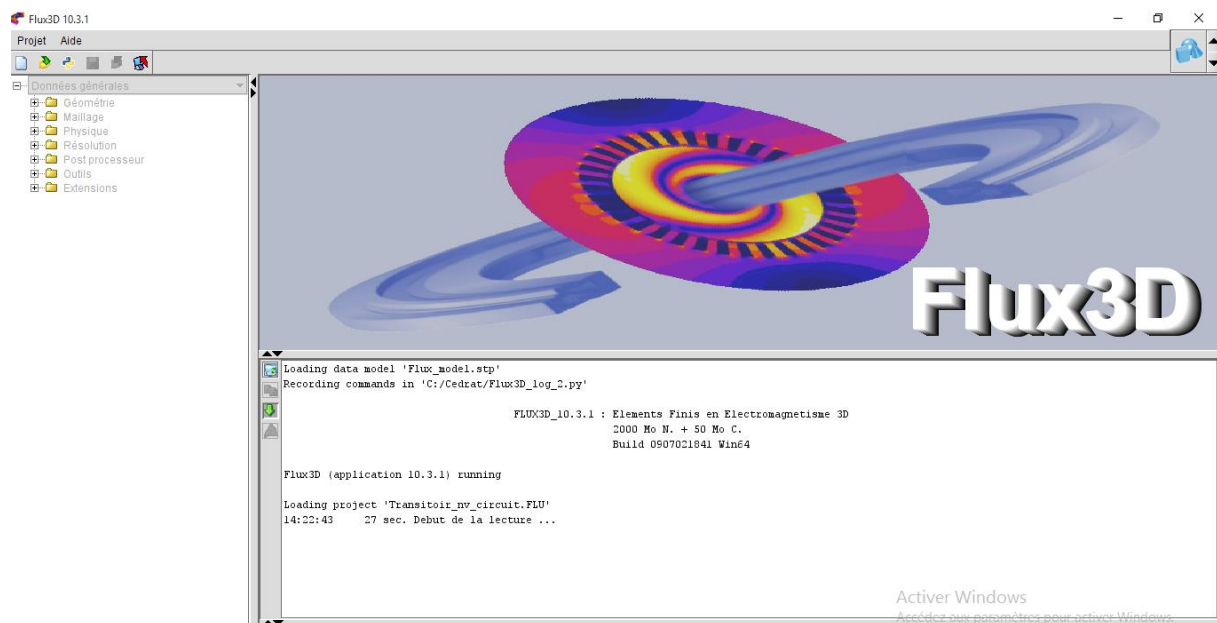


Figure7. Logiciel de simulation Flux 3D

Bibliographie

- [1] Laurent Albert. « Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes Application au domaine automobile ».thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INPG. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. tel-00007091
- [2] Sylvain PEREZ « Contribution au dimensionnement optimal d'alternateur à griffes sans aimant - Apport des alliages FeCo ». Thèse de doctorat. Université de GRENOBLE 2013- spécialité génée électrique
- [3] Lilya Bouarroudj « Contribution à l'étude de l'alternateur à griffes Application au domaine automobile » Energie électrique. Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français. tel00165565
- [4] MOHAMED AMINE KHALF « conception optimale d'un alternateur de faible puissance pour le simulateur de groupe turbine- alternateur d'Hydro-Québec » Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue école de génie. Mémoire d'ingénieur.2013
- [5] M. Bouray Islam « Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis le superviseur » thèse Master Ingénierie Electrique Electronique et Informatique Industrielle. Energie électrique .Université de Lorraine. 2014
- [6] R. HACHLAF cour « conception associer par ordinateur » université de blida1 2019/2020
- [7] REBBAH REDJEM « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques Application aux moteurs asynchrones ». Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de magister en Electrotechnique. Université Constantine .2006
- [8] SARAOUI RACHIDA « Etude d'une machine synchrone avec la méthode des éléments finis » Mémoire de Magister électrotechnique .université MOULOUD MAMMERI D.2010
- [9] Albert FOGGIA « méthode de calcule des inductances de fuites » institut national polytechnique de Grenoble date de publication :10 févr 1999 Réf : D3440v1.
- [10] DAF.YOUCCEF « Etude par méthodes stochastique de l'Effet de Distribution d'un Dispositif Electromagnétique ». Mémoire d'ingénieur d'état en machine électrique. Université tizi ouazou.2011
- [11] TALEB M'HAMMED Mustapha - GHEDAMSI Elhachmi «Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur » Mémoire Master académique- Spécialité: Matériaux Electrotechnique- UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA
- [12] GhaniaBara « Modélisation des machines électriques dans Flux3 Overlay 3D » Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. hal-01827424