

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 Machines électriques

présenté par

Zerfa Youcef

&

Reghmit Sadek

# Modélisation numérique d'un Alternateur à griffe

Proposé par : Mme Brahimi.N

Année Universitaire 2018-2019

## Remerciements

---

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en Premier lieu الله Miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage afin d'accomplir ce modeste travail et de nous avoir permis d'atteindre la fin de notre formation.

Nos remerciements et notre reconnaissance vont à notre promotrice Mme Brahimi.N qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidés pendant l'élaboration de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils précieux.

Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont encouragés et donnés les mains d'aides, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail afin qu'il soit présentable.

Nos vifs remerciements vont à monsieur le président de jury, pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.

Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les Enseignants du département d'Electronique qui ont contribués à notre formation.

Université BLIDA 1

---

## ملخص:

يمثل المولد ذو المخلب المنبع الوحيد للطاقة الكهربائية لسيارات النقل، الذي يدور بواسطة المحرك الحراري و الذي يزود الطاقة اللازمة لمختلف العناصر في السيارة، المولد ذو المخلب هو آلة متزامنة خاصة ثلاثية الأبعاد. الهدف من هذه المذكرة هو النمذجة الرقمية للمولد ذو المخلب التي تعتمد على طريقة العناصر المنتهية، واستعملنا لهذا السبب برنامج للحساب الشعاع ثلاثي الأبعاد.

كلمات المفاتيح: نمذجة ، المولد ذو المخلب ، بطريقة العناصر المنتهية.

---

## Résumé :

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. L'alternateur à griffe est une machine synchrone typiquement tridimensionnelle. L'objet de ce mémoire est la modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis de l'alternateur à griffe. A cet effet un logiciel de calcul de champ 3D a été utilisé.

**Mots clés :** Modélisation ; L'alternateur à griffe ; la méthode des éléments finis.

---

## Abstract :

Nowadays the alternators of claws are the only sources of electromagnetic for electrical energy on board of auto cars. Driven by the engine, they supply the necessary energy for all equipments for auto cars. The objective of this thesis is the numerical modeling on the finite element method of generator of claw. For this purpose a 3D filed calculation software is used.

**Keywords :** Modulization ; The claw alternator ; The finite elements method

---

## DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour leur soutien moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études dans des bonnes conditions, en leur espérant une longue vie et que الله les gardes.

- ❖ A mes chers frères **Ishak** et **Aymen**.
- ❖ A mes sœurs.
- ❖ A mes tantes et mes oncles.
- ❖ A toute la famille **ZERFA** et la famille **FERRACHI**.
- ❖ A mes chers amis **Sami**, **Issam**, **Ahmed**, **Acherf**, **Brahime**, **Hafide**, **Kamel**, **Hadj Teybe**, **Kacha**, **Tarke**, **Yacobe** et **Oussama**.
- ❖ A mes chers amis de l'université.
- ❖ A mes frères de l'université **Adel**, **Badis**, **Abdeslamme** et **Mohmed**.
- ❖ A ma promotrice **Mme Brahimi.N** et mon binôme **Reghmit Sadek**

**ZERFA YUCEF**

# DÉDICACE

- ❖ Je tiens tout d'abord à remercier Allah pour tout ce que je réalisais pendant toute ma vie.
- ❖ Je remercie mes parents pour leur support et leur présence car ils étaient toujours derrière moi, sans oublier mes frères et mes sœurs surtout mon frère **Ayoub** merci pour vous.
- ❖ Je remercie aussi madame **Brahimi** car elle m'aider énormément pendant cette année merci beaucoup.
- ❖ Sans oublier tout mes enseignants Mr. **Bahmoud Lahrech** et madame **Aazzi**.
- ❖ Je remercie tout mes amis... **Kadiro** , **Adel** , **Amine Sebahi** , **Amine Touari** , **Youcef Zerfa**, **Mohssen**, **Mounir** , **Hssan** , **Chemssou**.....grand merci à vous.
- ❖ Je remercie tous les collègues de l'université.

Reghmit Sadek

## Listes des acronymes et abréviations

CAO : Conception assisté par ordinateur

Fmm : Force magnétomotrice

Fem : Force électromotrice

$I_{\text{ex}}$  : Courant d'excitation

Hz : Hertz

S : Seconde

Tr/min ; tour / minute

A : Ampère

V : Volt

rot : Rotationnel

div : Divergence

grad : Gradient

$\mu$  : Permiabilité de matériau

$\rho$  : Densité de charges électriques volumiques

B : Induction magnétique [T]

E : Intensité du champ électrique

H : Champ magnétique [A/m]

D : Induction électrique

$J$  : Densité du courant électrique [A/m<sup>2</sup>]

$g_0$  : La valeur à la frontière

$\emptyset$  : Le flux magnétique

$H_s$  : Champ magnétique de source

$H_r$  : Champ magnétique de l'induit

$\phi_r$  : Potentiel scalaire magnétique

$A$  : potentiel vecteur

$P$  : nombre de paire de pôles

$N_e$  : le nombre total d'encoches

$m$  : nombre de phase

$n_e$  : Le nombre d'encoche par pole par phase

$U$  : Tension simple

$D$  : Diode

$U_{red}$  : Tension de redresseur

$L$  : Les bobines de ligne statorique

$R$  : Les résistances de ligne statorique

$K$  : constante liée aux nombre de spires

FFT : Faste Fourier transformation

# Sommaire

## Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

<b>1.1 Introduction</b> .....	2
<b>1.2 L'électricité dans l'automobile</b> .....	2
<b>1.3 Le générateur d'électricité actuel l'alternateur à griffe</b> .....	3
1.3.1 Le stator.....	4
1.3.2 Le rotor.....	6
1.3.3 Le redresseur.....	7
1.3.4 Le régulateur .....	8
1.3.5 Les palies.....	9
1.3.6 Le refroidissement.....	10
<b>1.4 Le principe de fonctionnement de l'alternateur à griffe</b> .....	11
<b>1.5 Le rendement</b> .....	12
<b>1.6 Les avantages et les inconvénients de l'alternateur à griffe</b> .....	13
1.6.1 Les avantages .....	13
1.6.2 Les inconvénients .....	13
<b>1.7 Conclusion</b> .....	13

## Chapitre 2 : modélisation de l'alternateur à griffe

<b>2.1 Introduction</b> .....	14
<b>2.2 Les différents types de modélisations</b> .....	14
2.2.1 La modélisation analytique.....	14
2.2.2 La modélisation numérique .....	14
2.2.3 La modélisation semi-numérique .....	15
<b>2.3 Méthode des éléments finis</b> .....	15
<b>2.4 Principe de la méthode des éléments finis</b> .....	15
<b>2.5 Les équations de maxwell</b> .....	16

<b>2.6 Équations de Maxwell dans le régime quasi-stationnaire</b>	<b>17</b>
<b>2.7 Conditions aux limites</b>	<b>18</b>
<b>2.8 Modélisation de l'alternateur à griffes</b>	<b>19</b>
<b>2.9 Définition de logiciel flux 3D</b>	<b>21</b>
<b>2.10 Caractéristique de l'alternateur à griffes</b>	<b>22</b>
<b>2.11 La démarche de conception</b>	<b>22</b>
2.11.1 Géométrie de l'alternateur à griffe	23
2.11.2 Matériaux magnétiques	26
2.11.3 Création des régions	27
<b>2.12 Conclusion</b>	<b>28</b>

### **Chapitre 3 : Résolution de modèle numérique**

<b>3.1 Introduction</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Le maillage</b>	<b>29</b>
3.2.1 Application du maillage par Flux3D à l'alternateur à griffe	30
<b>3.3 Les enroulements de l'alternateur à griffe</b>	<b>31</b>
3.3.1 L'enroulement de rotor	31
3.3.2 L'enroulement de stator	32
<b>3.4 Couplage circuit extérieur</b>	<b>35</b>
<b>3.5 Conclusion</b>	<b>36</b>

### **Chapitre 4 : simulation et validation de modèle**

<b>4.1 Introduction</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Étude en magnétostatique</b>	<b>37</b>

4.2.1 L'état de saturation de l'alternateur à griffe.....	37
4.2.2 Trajet de Flux dans l'alternateur à griffe.....	38
<b>4.3 Etude en magnéto-transitoire .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4 Banc d'essai.....</b>	<b>43</b>
4.4.1 Description de banc d'essai.....	43
4.4.2 Mesure de la FEM à vide.....	44
<b>4.5 Validation de modèle de l'alternateur .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 Conclusion .....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion général.....</b>	<b>46</b>

# Liste des figures

## Chapitre 1

<b>Figure1.1:</b> Evolution de la consommation électrique dans un véhicule.....	2
<b>Figure1.2:</b> Vue en coupe d'un alternateur à griffe.....	3
<b>Figure 1.3 :</b> vue éclatée de l'alternateur à griffes.....	4
<b>Figure1.4 :</b> Stator de l'alternateur.....	5
<b>Figure1.5 :</b> Coupe du l'alternateur.....	5
<b>Figure1.6:</b> Process slinky, construction du stator en hélice.....	6
<b>Figure 1.7 :</b> Rotor de l'alternateur à griffe.....	6
<b>Figure 1.8:</b> Vue d'une griffe de l'alternateur.....	7
<b>Figure 1.9 :</b> Vue de la bobine d'excitation et du noyau de l'alternateur.....	7
<b>Figure 1.10 :</b> Redresseur de l'alternateur.....	8
<b>Figure 1.11 :</b> Schéma électrique de redresseur.....	8
<b>Figure1.12 :</b> Le régulateur de l'alternateur.....	9
<b>Figure1.13:</b> Les paliers avant et arrière.....	9
<b>Figure 1.14:</b> Refroidissement par ventilations.....	10
<b>Figure1.15:</b> Refroidissent par circulation d'eau.....	10
<b>Figure1.16 :</b> Schéma électrique de l'alternateur.....	11
<b>Figure 1.17 :</b> L'alternateur dans son environnement.....	11
<b>Figure 1.18 :</b> Cartographie de rendement d'un alternateur à griffes à fort rendement.....	12

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1 :</b> Frontière d'un domaine.....	18
---	----

<b>Figure 2.2</b> : Le sixième de l'alternateur.....	23
<b>Figure 2.3</b> : Paramétrage de la géométrie du stator.....	24
<b>Figure 2.4</b> : Stator de l'alternateur à griffe sur <b>Flux-3D</b> .....	24
<b>Figure 2.5</b> : Paramétrage de la géométrie du rotor.....	25
<b>Figure 2.6</b> : Rotor de l'alternateur à griffe sur <b>Flux-3D</b> .....	25
<b>Figure 2.7</b> : Les courbes d'aimantations pour «flux M270» et « flux M800».....	27
<b>Figure 2.8</b> : Les régions de l'alternateur à griffes.....	28

### **Chapitre 3**

<b>Figure 3.1</b> : le maillage triangulaire.....	29
<b>Figure 3.2</b> : Le maillage de la géométrie avec la boîte infinie.....	30
<b>Figure 3.3</b> : Les résultats de maillage.....	31
<b>Figure 3.4</b> : La bobine d'excitation du rotor.....	32
<b>Figure 3.5</b> : Représentation d'un 6ème des enroulements statoriques.....	34
<b>Figure 3.6</b> : Les enroulements de l'alternateur à griffe.....	35
<b>Figure 3.7</b> : Couplage de circuit extérieur.....	35

### **Chapitre 4**

<b>Figure 4.1</b> : Dégradé de l'induction magnétique à vide.....	38
<b>Figure 4.2</b> : trajet de flux dans l'ensemble de l'alternateur.....	39
<b>Figure 4.3</b> : trajet de flux dans le rotor.....	39
<b>Figure 4.4</b> : trajet de flux dans l'entrefer.....	40
<b>Figure 4.5</b> : trajet de flux dans le stator.....	40

<b>Figure 4.6</b> : Les fuites magnétiques.....	41
<b>Figure 4.7</b> : La FEM à vide.....	42
<b>Figure 4.8</b> : LA FFT de tension à vide.....	43
<b>Figure 4.9</b> : Le banc d'essai.....	44
<b>Figure 4.10</b> : La tension de sortie de L'alternateur a 1500 tr/min.....	44

## Liste des tableaux

### Chapitre 2

<b>Tableau 2.1</b> : Caractéristique de l'alternateur griffes.....	22
<b>Tableau 2. 2</b> : Paramètres géométriques de stator.....	24
<b>Tableau2.3</b> : Paramètres géométriques du rotor.....	26
<b>Tableau 2.4</b> : Caractéristique de chaque région volumique.....	28

### Chapitre 3

<b>Tableau 3.1</b> : Les paramètres mécaniques de la bobine rotorique.....	31
<b>Tableau 3.2</b> : Les paramètres électriques de la bobine du Rotor.....	32
<b>Tableau 3.3</b> : Les paramètres des enroulements statorique.....	34

# Introduction générale

---

Le secteur de l'automobile est un marché très concurrentiel entraînant les constructeurs d'automobiles à améliorer sans cesse leurs produits. Ainsi, l'électricité et l'électronique prennent une grande importance dans les automobiles d'aujourd'hui.

L'électrification de l'habitacle permet d'améliorer le confort et l'agrément des véhicules. De plus, les automobiles deviennent de plus en plus sûres par l'introduction de nouveaux dispositifs électriques qui permettent d'améliorer la sécurité active (système antiblocage des roues) et la sécurité passive (airbags). La croissance de ces dispositifs électriques embarqués entraîne inévitablement une augmentation de la consommation électrique dans les véhicules. L'alternateur à griffe constitue jusqu'à ce jour le générateur d'énergie électrique le plus utilisé dans le domaine de l'automobile. Cet alternateur présente plusieurs avantages dont les deux principaux sont sa robustesse et le coût de production qui est très réduit comparativement aux autres types d'alternateurs. Un de ces principaux inconvénients est la complexité de sa forme géométrique qui est typiquement tridimensionnelle. Cependant la modélisation de ce type de machine doit être aussi tridimensionnelle.

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude, concerne la modélisation numérique basée sur les éléments finis de l'alternateur à griffe. La saturation des matériaux ainsi que le couplage électromagnétique seront pris en considération. Le logiciel de calcul en 3D sélectionné pour cette modélisation est le logiciel **Flux-3D**.

Le premier chapitre présentera l'alternateur à griffes (l'alternateur automobile). Tout d'abord nous détaillerons les éléments constitutifs de l'alternateur à griffes et son principe de fonctionnement. Ensuite on décrit le problème majeur de cette machine qui est le rendement. Quelques avantages et inconvénients seront présentés. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

Dans le deuxième chapitre on trouvera la modélisation numérique de l'alternateur à griffes par la méthode des éléments finis.

Dans le troisième chapitre, le maillage et le bobinage du stator et rotor seront traités. Le dernier chapitre consistera en la résolution du modèle numérique ainsi que l'exploitation des résultats. Une validation du modèle par comparaison des résultats numériques obtenus avec les mesures effectuées sur l'alternateur du laboratoire.

Finalement une conclusion générale sera présentée.

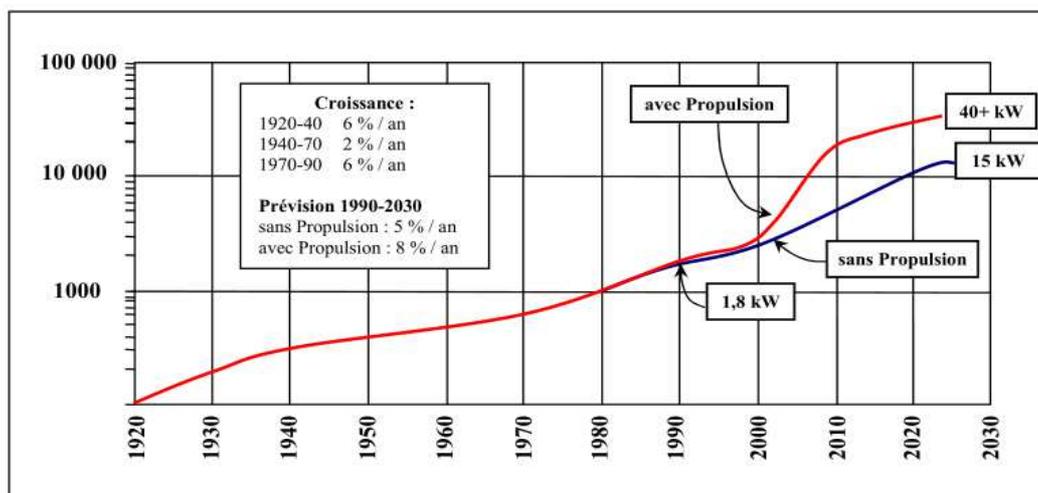
# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

## 1.1 Introduction

Les véhicules automobiles modernes sont maintenant équipés par des circuits électriques et électroniques aussi variés que nombreux. Il est donc nécessaire de disposer d'une source d'énergie électrique embarquée et autonome, faisant face à la consommation permanente d'électricité. Cette fonction qui était, autrefois dévolu à une Dynamo, est maintenant confiée à un alternateur.

## 1.2 L'électricité dans l'automobile

Au-cours des dernières années l'électricité dans l'automobile a pris beaucoup d'importance. En effet, l'électricité et l'électronique offrent la possibilité de rajouter des dispositifs permettant l'amélioration de certaines caractéristiques des automobiles comme le confort (électrification des vitres et des sièges, chauffage, désembuage), la sécurité active (système antiblocage des roues ABS, contrôle de stabilité ESP), la sécurité passive (airbags, pré-tensionneurs de ceintures de sécurité) et enfin la consommation d'essence et la pollution (gestion électronique du moteur, soupapes électromagnétiques, catalyseur).....etc.



**Figure1.1:** Evolution de la consommation électrique dans un véhicule (Source: SAE – Society of Automotive Engineers)

Aussi 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, de

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

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.

L'électricité du véhicule 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 50%. 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 griffe

L'alternateur à griffes **figure 1.2** est une machine synchrone triphasée à pôles saillants. Sa particularité provient de la structure du rotor, qui comporte une bobine excitatrice alimentée à travers deux bagues, et enserrée entre deux roues polaires munies de griffes axiales.



**Figure1.2** : Vue en coupe d'un alternateur à griffe.

La plage de la vitesse de l'alternateur varie entre 0 et 21000 tours/mn, le rotor doit être alors suffisamment robuste pour faire face aux problèmes de tenue mécanique. La facilité de la réalisation du rotor, conduit à une réduction importante du temps de fabrication et donc du prix de revient de la machine, c'est une des raisons pour lesquelles il est largement répandu dans l'automobile. Une vue éclatée de la machine est présentée à la **figure 1.3**.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

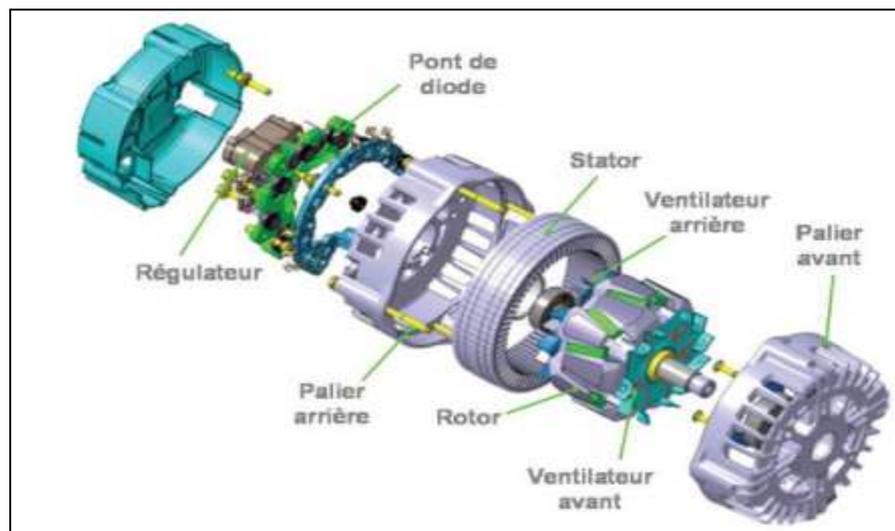


Figure 1.3 : vue éclatée de l'alternateur à griffes

Dans ce qui suit, nous présenterons les différentes parties de l'alternateur qui sont :

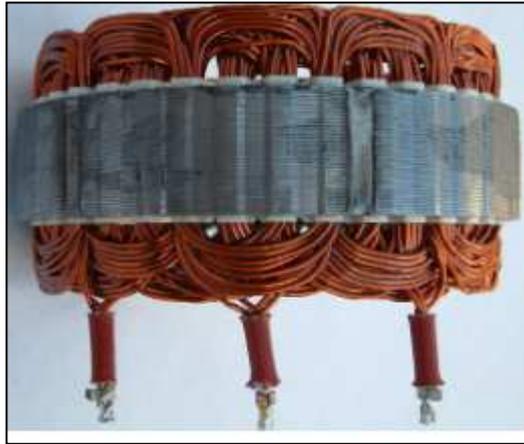
- Le stator
- Le rotor
- Le redresseur
- Le régulateur
- Les paliers
- Refroidisseur

## 1.3.1 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 étoile. La plupart des alternateurs ont une encoche par pôle et par phase, cependant certains en présentent deux.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

---



**Figure1.4** : Stator de l'alternateur.



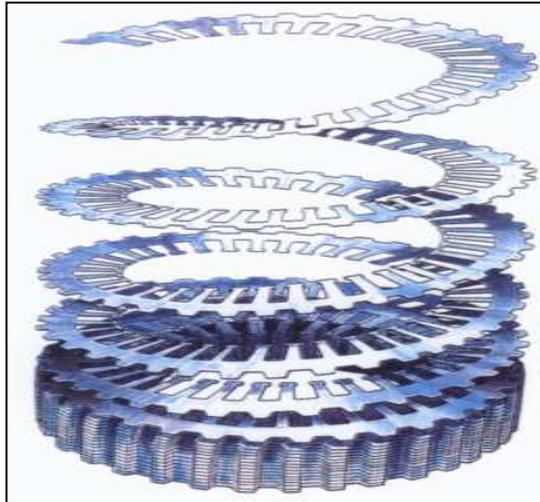
**Figure1.5** : Coupe du l'alternateur.

Certains stators d'alternateurs à griffes sont fabriqués avec un processus un peu spécial. En effet, le process Slinky 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 1.6**.

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. [1]

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

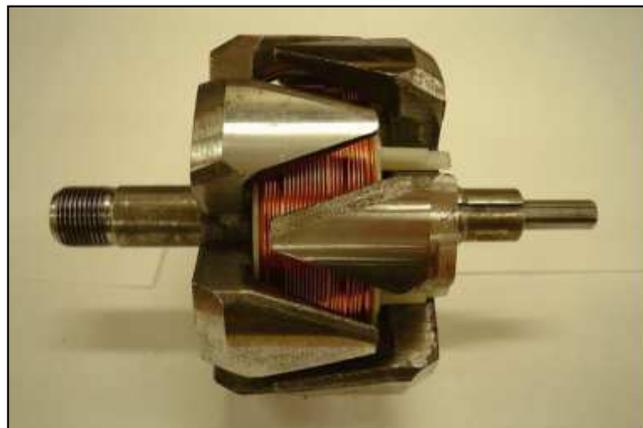
---



**Figure1.6:** Process slinky, construction du stator en hélice.

## 1.3.2 Le rotor

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, permettant de créer les pôles. Ces plateaux à griffes sont réalisés 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).



**Figure 1.7 :** Rotor de l'alternateur à griffe.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

---



*Figure 1.8:* Vue d'une griffe de l'alternateur.



*Figure 1.9 :* Vue de la bobine d'excitation et du noyau de l'alternateur.

Généralement le nombre de pôles est de 12, voire de 16 pour certains modèles de puissances importantes. [1]

### **1.3.3 Le redresseur**

Le stockage de l'énergie électrique à travers la batterie est essentiel, donc on a besoin d'un redressement de courant alternatif vers un courant continu. Pour ce la le bobinage statorique est relié à un redresseur de diode, afin de redresser le courant triphasé en courant continue nécessaire, pour la charge de la batterie et couvrir par la suite les besoins du réseau de bord.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

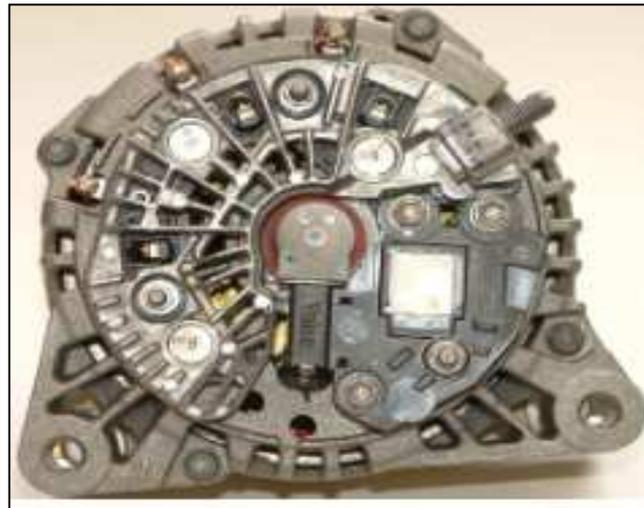


Figure 1.10 : Redresseur de l'alternateur.

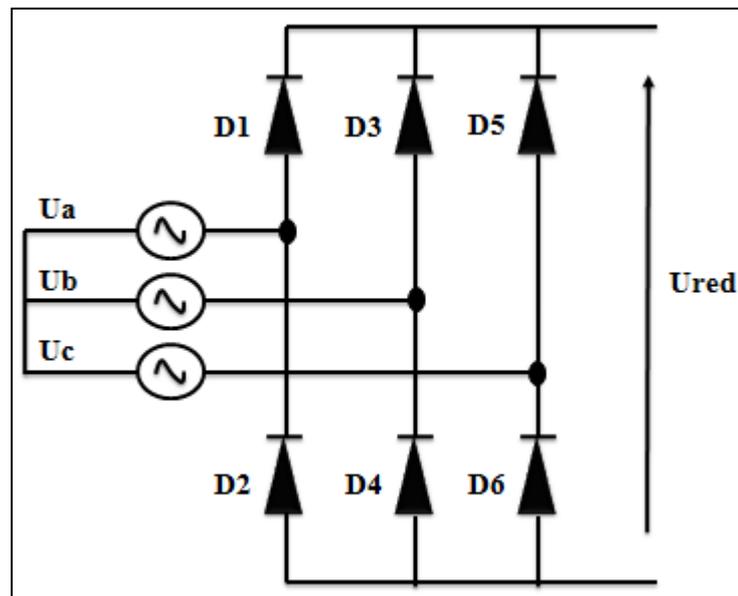


Figure 1.11 : Schéma électrique de redresseur.

## 1.3.4 Le régulateur

Le régulateur électronique permet de réguler la tension du réseau de bord en fonction de la charge de la batterie. Cet organe contrôle donc, sert à ajusté le courant d'excitation de l'alternateur afin que le débit de l'alternateur, quelle que soit sa vitesse de rotation, s'adapte à la charge de la batterie. En général, le régulateur est couplé avec les balais de l'excitation.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

---



**Figure1.12** : Le régulateur de l'alternateur.

## 1.3.5 Les paliers

Les paliers représentent l'armature externe de l'alternateur. L'alternateur possède un palier avant et un palier arrière. Ces paliers sont tous les deux en fonte d'aluminium, ils 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 pont de diodes, le porte-balais et le régulateur.



**Figure1.13**: Les paliers avant et arrière.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

## 1.3.6 Le refroidissement

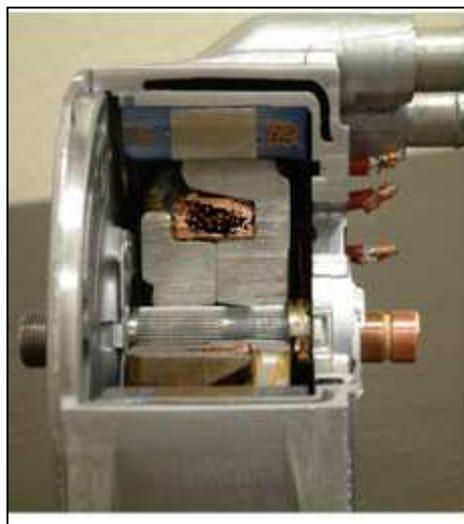
Les alternateurs ont besoin du refroidissement à cause des pertes par échauffement.

Il existe deux technologies de refroidissement, l'un par utilisation de deux ventilateurs internes entraînés par le rotor (ils sont placés aux deux extrémités du rotor, l'un pour faire entrer l'aire et l'autre pour le faire sortir) **figure 1.14**.



**Figure 1.14:** Refroidissement par ventilations.

L'autre est le refroidissement par circulation d'eau sur la carcasse de l'alternateur **Figure 1.15**.

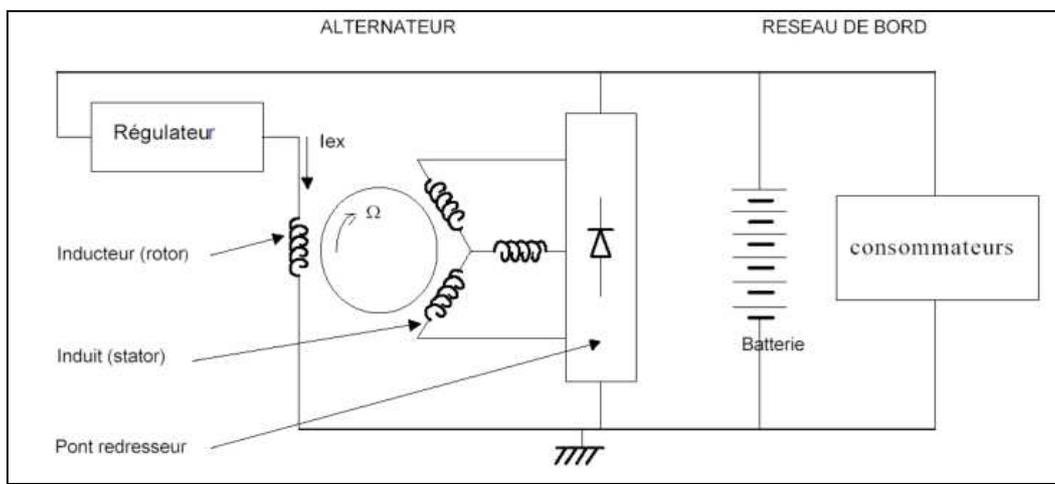


**Figure 1.15:** Refroidissement par circulation d'eau.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

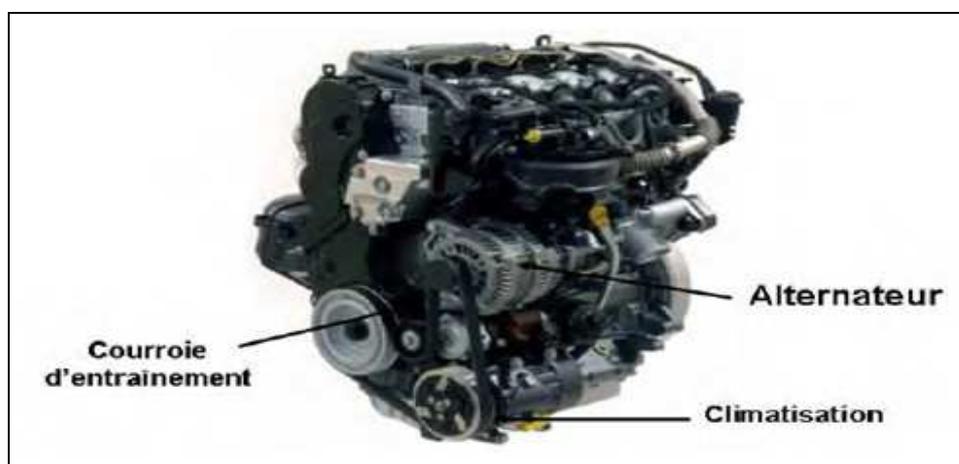
## 1.4 Le principe de fonctionnement de l'alternateur à griffe

L'alternateur à griffes est 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 1.16** représente un schéma électrique de l'alternateur.



**Figure 1.16** : 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 [2] par rapport à la vitesse du moteur thermique, **Figure 1-17** 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. [2]

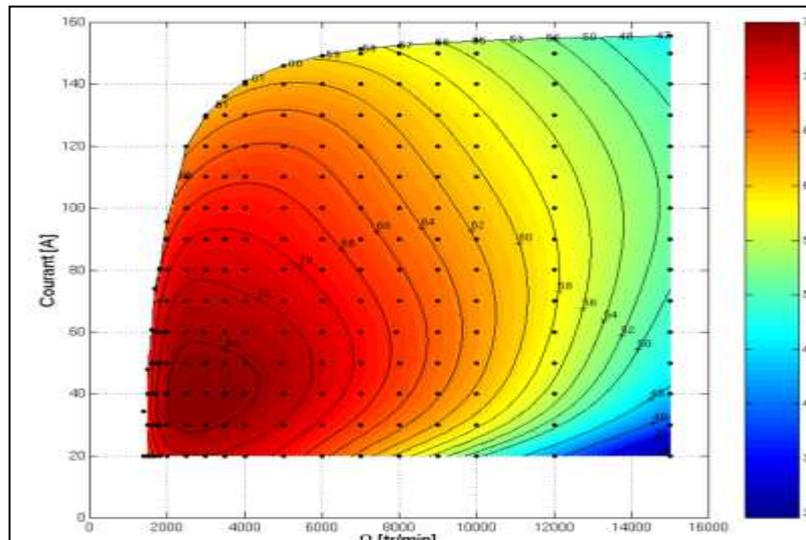


**Figure 1.17** : L'alternateur dans son environnement.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

## 1.5 Le rendement

L'alternateur peut fournir une puissance électrique maximale d'environ 2 kW. Cependant, cet alternateur est très rarement utilisé à pleine charge.



**Figure 1.18** : Cartographie de rendement d'un alternateur à griffes à fort rendement.

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 (soit 2,2 chevaux) 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 élevé. Il présente un rendement nettement supérieur, son rendement est proche de 70 % pour le point de fonctionnement décrit ci-dessus. [2]

Augmenter le rendement de l'alternateur est un objectif très important pour réduire le niveau de la pollution atmosphérique. En effet, il faut savoir que 100 W de pertes électriques, soit une consommation d'environ 0.1 litre d'essence par 100 km, représentent environ deux points de rendement en fonctionnement pleine charge de la machine à 3000 tours/mn.

# Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

---

## 1.6 Les avantages et les inconvénients de l'alternateur à griffe

### 1.6.1 Les avantages

- Un coût de conception raisonnable grâce à sa forme de rotor et l'utilisation d'un seul bobine excitatrice.
- Une machine très robuste à la force de centre refuge.
- Elle supporte des grandes vitesses.

### 1.6.2 Les inconvénients

- Un mauvais rendement environ 60%.
- Des pertes énormes notamment par échauffement, les pertes de courant de Foucault et courant de d'hystérisasse.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'alternateur à griffes, a été présenté. Cet alternateur l'ultime fournisseur d'électricité dans le véhicule. En premier lieu, nous avons présenté la génératrice à griffes dans son environnement dans l'auto mobile. En suite nous avons d'écrit ces principaux éléments constructifs ainsi que son principe de fonctionnement et son rendement. On dernier lieu les avantages et les inconvénients des alternateurs ont été présentés.

# Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

## 2.1 Introduction

Il existe trois grandes familles de modélisation des systèmes électromagnétiques à savoir ; les méthodes analytiques, les méthodes numériques et les méthodes semi-numériques. Le choix de la méthode de modélisation dépend des objectifs visés. En effet, les méthodes de modélisation analytiques permettent de faire des études de conception préliminaires alors que les méthodes de modélisation numériques permettent la validation et le perfectionnement des solutions obtenues par les modèles analytiques. Ce chapitre consiste en la modélisation numérique de la machine à griffe, basée sur les éléments finis. Le trajet de flux dans la machine à griffe est différent de celui des machines conventionnelles, Il varie tout au long de l'axe Z. De ce fait une modélisation en trois dimensions s'impose. Le logiciel de conception assistée par ordinateur, Flux 3D, est utilisé pour la modélisation de notre alternateur à griffe.

## 2.2 Les différents types de modélisations

Il existe trois grandes familles de modèles permettant la simulation d'une machine électrique: les modèles analytiques, les modèles numériques et les modèles semi-numériques.

### 2.2.1 La modélisation analytique

Les modèles analytiques décrivent les systèmes à développer avec des équations liées entre elles par des grandeurs physiques (magnétisme, thermique..., géométriques...). Dans certains cas, ils sont difficiles à mettre en place, car ils nécessitent de décrire de façon analytique des phénomènes complexes (non- linéarité des matériaux, calcul de pertes...ect). Les méthodes analytiques sont rapides mais, peu précise car il est difficile de prendre en compte certains phénomènes complexes tel que le mouvement des parties mobiles.

### 2.2.2 La modélisation numérique

Cette méthode consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène en se basant, généralement, sur la méthode des éléments finis.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

Cette modélisation est souvent utilisée car elle permet le calcul avec une bonne précision les performances de phénomène.

### 2.2.3 La modélisation semi-numérique

Un modèle semi-numérique est un modèle analytique qui est mis en équation et résolu de façon numérique facilitant ainsi le travail du concepteur [3]. Cette méthode et la collaboration des deux méthodes précédentes.

## 2.3 Méthode des éléments finis

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960. En 1970, Silvestre et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'électrotechnique. La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques, De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système, La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques. [6]

## 2.4 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites. Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation. Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques. [7]

### 2.5 Les équations de Maxwell

James Clark Maxwell est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction en développant la formulation mathématique des travaux précédents réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère. Il a démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Les équations de Maxwell dérivent d'un ensemble de vingt équations différentielles à vingt variables, plus tard réduites à quatre.

Les équations de Maxwell :

- Equation de Maxwell-Gauss :  $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$  (2.1)

- Equation de Maxwell-Ampère :  $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  (2.2)

- Equation de Maxwell-Faraday :  $\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  (2.3)

- Equation de Conservation du flux magnétique :  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$  (2.4)

Où  $\vec{E}$  [V/m] et  $\vec{H}$  [A/m] sont respectivement le champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$  [C/m] et  $\vec{B}$  [T] sont respectivement l'induction électrique et magnétique.

$\vec{J}$  [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] sont respectivement la densité de courant de conduction et de charge électrique.

L'équation (2.2) est une généralisation de théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique sous les courants électriques de conduction et de déplacement.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

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.

Les équations (2.2) et (2.3) définissent la relation entre les champs et leurs sources. D'autre part, les équations (2.1) et (2.4) traduisent respectivement la conservation du champ magnétique et de la charge électrique [8].

### 2.6 Equation de Maxwell dans le régime quasi-stationnaire

Ces équations lient les différentes grandeurs qui caractérisent le fonctionnement d'un système électromagnétique soit le champ électrique  $\vec{E}$ , le champ magnétique  $\vec{H}$ , l'induction électrique  $\vec{D}$  et l'induction magnétique  $\vec{B}$  [3], pour des applications à basse fréquence le vecteur courant de déplacement  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  de l'équation de Maxwell-Ampère est négligé, on obtient donc le système suivant.

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

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.7)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.8)$$

$\vec{j}$  : Densité de courant

$\rho$  : Densité de charge électrique

# Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

## 2.7 Conditions aux limites

Le problème de calcul de champ électromagnétique revient à la résolution des équations aux dérivées partielles dans un domaine (D) limité par une frontière ( $\Gamma$ ) sur laquelle sont définies les conditions aux limites.

On distingue plusieurs types aux conditions limites :

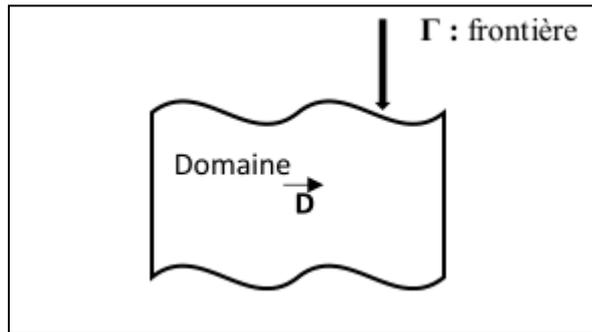


Figure 2.1 : Frontière d'un domaine.

➤ Condition de Dirichlet

Cette condition nous informe sur la valeur de l'inconnu à la frontière du domaine de résolution  $\Gamma$ .

$$U = g_0 \quad (2.9)$$

Où, U est la fonction inconnue et  $g_0$  la valeur de la fonction définie le long de la frontière.

➤ Condition de Neumann :

Elle nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine à étudier. Elle apparaît aussi souvent sur les plans de symétrie :

$$\frac{\partial U}{\partial n} = g_0 \quad (2.10)$$

➤ Condition mixte Dirichlet – Neumann :

C'est une combinaison des deux conditions aux limites de type Dirichlet et Neumann qui s'exprime comme suit :

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

$$aU + b\frac{\partial U}{\partial n} = g_0 \quad (2.11)$$

a et b, sont des coefficients définis dans le domaine d'étude [5]

### 2.8 Modélisation 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 par élément fini en 3D.

➤ Formulation en potentiel vecteur magnétique du problème :

La source de courant de l'alternateur à griffes en question est une bobine excitatrice alimentée par une source de tension extérieure continue. La saturation des matériaux statorique et rotorique est prise en considération. Ceci nous permet d'écrire les relations suivantes :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (2.12)$$

avec :

$$\vec{B} = \mu(H) * \vec{H} \quad (2.13)$$

$\mu$  est la permittivité magnétique du milieu.

Soit  $\vec{A}$  le potentiel vecteur de l'induction magnétique  $\vec{B}$ , tel que :

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (2.14)$$

En combinant les deux équations (2.12), (2.13) et de (2.14) on trouve :

$$\text{Rot}\left(\left(\frac{1}{\mu(H)}\right) * \text{rot}(A)\right) = \vec{J} \quad (2.15)$$

L'équation (2.15), dont l'inconnu est le vecteur  $\vec{A}$ , résolue par la méthode des éléments finis dans ce cas, devient :

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

$$\text{rot}((v) * \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J} \quad (2.16)$$

Ou :

(v) La réductivité magnétique du milieu, considéré dans notre cas, isotrope.

➤ Formulation en potentiel scalaire magnétique ( $\phi_r$ ) 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 statorique 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 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 l'excitation magnétique H est composée par deux composantes.

$$\vec{H} = \vec{H}_s + \vec{H}_r \quad (2.17)$$

La première composante  $\vec{H}_s$  représente l'excitation magnétique produite par la source de courant (bobine excitatrice rotorique) dont la densité de courant est désignée par  $\vec{J}$ .

La deuxième composante est l'excitation magnétique  $\vec{H}_r$  induite dans le matériau qui est produite par les courants d'induit. Pour le cas d'une résolution 3D, le calcul des 3 composantes est nécessaire et par conséquent le temps de calcul devient énorme. Le vecteur  $\vec{H}_s$  est déterminé par la loi de Biot et Savart et vérifie la relation (2.12)

Il s'en suit, en reprenant l'équation (2.12) :

$$\text{rot}(\vec{H}_r) = 0 \quad (2.18)$$

Il est alors possible d'introduire un potentiel scalaire magnétique  $\phi_r$  pour calculer la partie  $H_r$  du champ  $\vec{H}$

$$\vec{H}_r = -\text{grad}(\phi_r) \quad (2.19)$$

En utilisant l'équation de Maxwell (2.7) on trouve:

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

$$\text{div}(\vec{H}_r) = \text{div}(-\text{grad}(\phi_r))=0$$

En tenant compte de la loi B(H) donnée par l'équation (2.13), on obtient :

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

Par conséquent :

$$\text{div}(\mu(H) * \text{grad}(\phi_r)) = 0 \quad (2. 20)$$

Cette équation, dont l'inconnu est le potentiel magnétique scalaire  $\phi_r$  sera résolu par élément finis.

### 2.9 Définition de logiciel flux 3D

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 puis par ALTAIR. Il est actuellement utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnéto-statiques, il 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 qui 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 de couple moyen calculé par les méthodes classiques. [4]

Le FLUX est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) destiné en premier lieu à l'électrotechnique. Basé sur la méthode des éléments finis, FLUX calcule les états magnétiques, électriques et thermiques des dispositifs bidimensionnels et tridimensionnels [5].

# Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---

## 2.10 Caractéristique de l'alternateur à griffes

L'alternateur à griffe est décomposé par deux parties, stator qui comporte trois bobines permettant la production d'un réseau triphasé et le rotor qui comporte deux roues polaires à 6 paires de pôles avec une bobine excitatrice contrôlée par un régulateur électrique. Le tableau suivant décrit les caractéristiques électriques de notre alternateur :

Le caractère	La valeur
Puissance	1500 Watt
Nombre de paire de pôles	6
Vitesse	1500 Tr/minute
Tension de la sortie	12 Volt alternative
Couplage	Etoile

**Tableau 2.1** : Caractéristique de l'alternateur à griffes.

## 2.11 La démarche de la conception

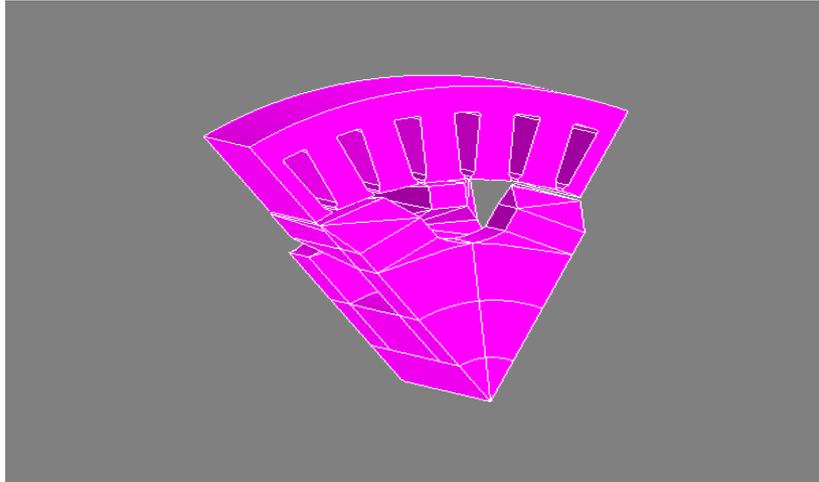
La géométrie et les propriétés physiques de l'alternateur à griffes à construire sont périodiques. On peut donc représenter seulement une paire de pôles de la machine et appliquer une périodicité égale à six fois pour obtenir la forme complète de l'alternateur. On introduit le sixième afin de réduire le temps de résolution par le **Flux-3D**, comme indique la **figure 2.2**.

La conception de machine à griffes sous le logiciel **Flux-3D**, doit suivre les étapes suivantes :

- Dessin de la géométrie du sixième de la machine (prototypage)
- Dessin de la boîte infini qui détermine les conditions aux limites.
- Affectation des régions physiques à la géométrie.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

---



**Figure 2.2 :** Le sixième de l'alternateur

### 2.11.1 Géométrie de l'alternateur à griffe

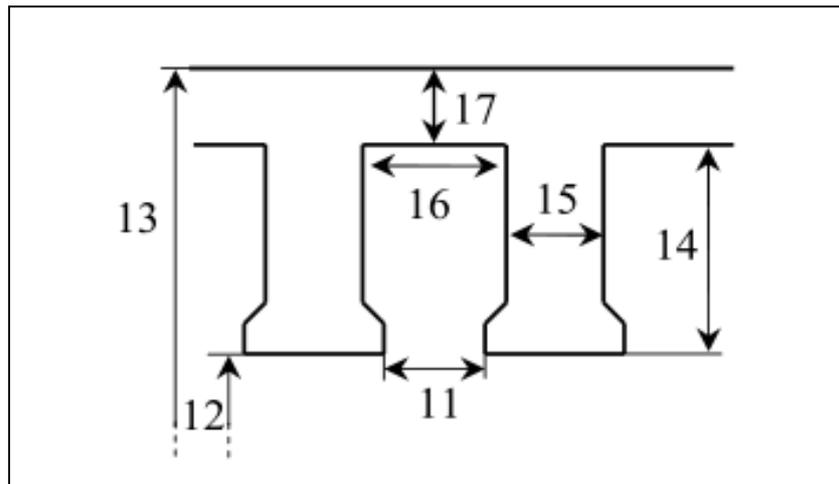
La géométrie de l'alternateur à griffes est tout simplement une liaison entre des points, des segments et des arcs, pour obtenir des faces. Après on connecte les faces pour créer les volumes de la machine.

Les étapes à suivre pour sa réalisation de la géométrie sont :

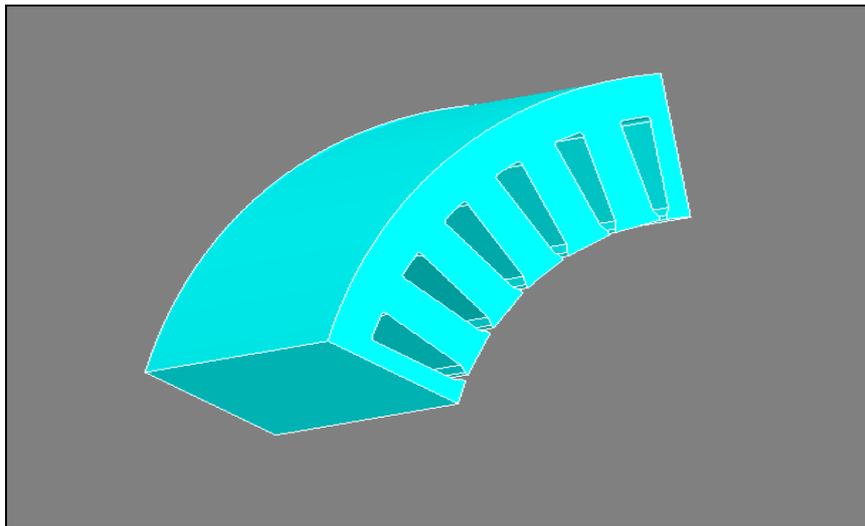
- Création des systèmes de coordonnées (Systèmes des coordonnées principales, Systèmes de travail, systèmes locaux)
- Introduction des points en respectant le type de coordonnées de système.
- Introduction des segments et des arcs.
- Connexion des segments et les arcs en formant des surfaces fermées pour la création des faces.
- Connexion des faces afin de déterminer les volumes.

On commence par le stator, la **figure 2.3** décrit les différents paramètres de sa géométrie.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe



**Figure 2.3 :** Paramétrage de la géométrie du stator



**Figure 2.4 :** Stator de l'alternateur à griffe sur Flux-3D.

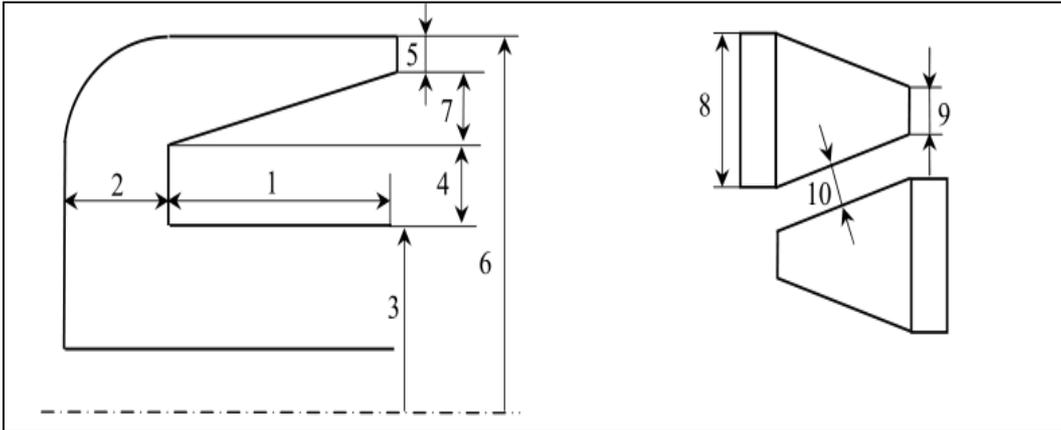
Dans le tableau suivant on donne les désignations des paramètres et leurs valeurs :

Référence du paramètre	Désignation	Valeur
11	Ouverture d'encoche	2 mm
12	Rayon intérieur du stator	44.3 mm
13	Rayon extérieur du stator	63.5 mm
14	Hauteur d'une dent	1.5 mm
15	Largeur d'une dent	3.36 mm
16	Largeur du fond d'encoche	2 mm
17	Hauteur de la culasse	5.5 mm
	Entrefer	0.65 mm

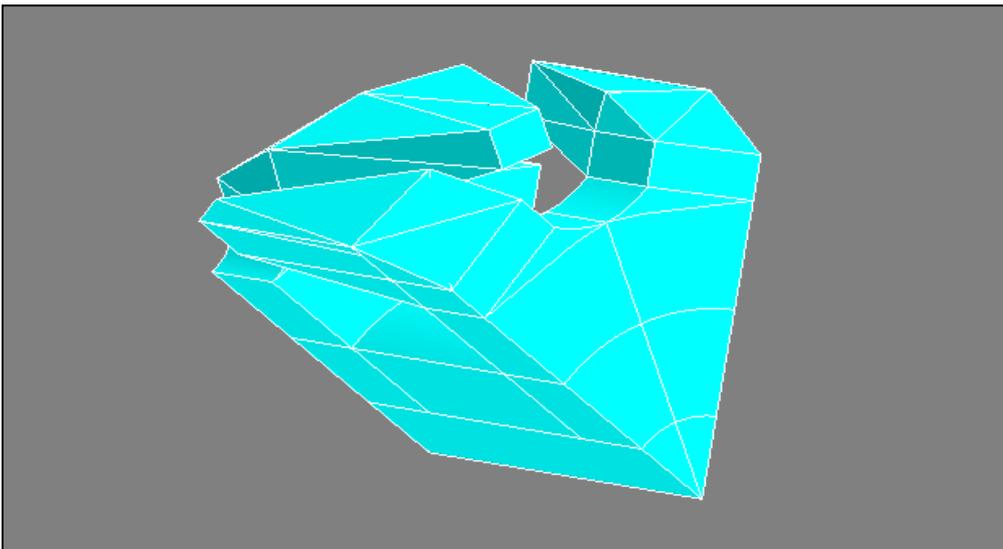
**Tableau 2. 2 :** Paramètres géométrie de stator.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

En suite en passe au rotor, cette partie est un peut complexe à réaliser a cause de sa forme atypique (présence des griffes), la **figure 2.5** illustre les paramètres de la géométrie du rotor :



**Figure 2.5** : Paramétrage de la géométrie du rotor



**Figure 2.6** : Rotor de l'alternateur à griffe sur Flux-3D.

Les désignations des paramètres de rotor et leurs valeurs sont cités dans le tableau suivant :

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

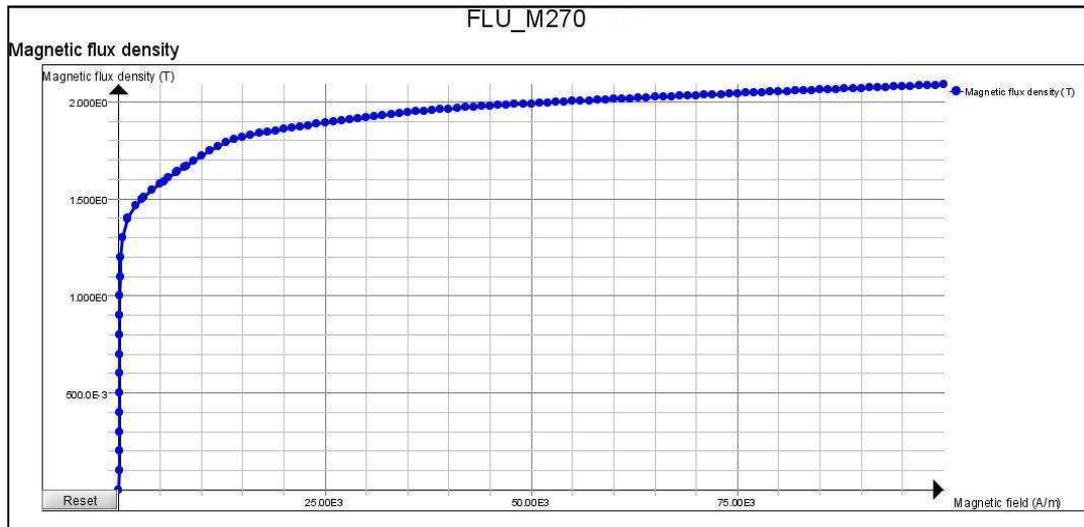
Référence du paramètre	Désignation	Valeur
1	Longueur du noyau	29 mm
2	Epaisseur du plateau	11.5 mm
3	Rayon extérieur du noyau	20.7 mm
4	Hauteur du plateau	11.95 mm
5	Hauteur du bout de la griffe	4.7 mm
6	Rayon extérieur du rotor	43.65 mm
7	Hauteur de la griffe sans le bout	6.3 mm
8	Largeur de la base d'une griffe	24.7 mm
9	Largeur du bout d'une griffe	6 mm
10	Distance entre griffe	6.6mm

**Tableau2.3** : Paramètres géométriques du rotor.

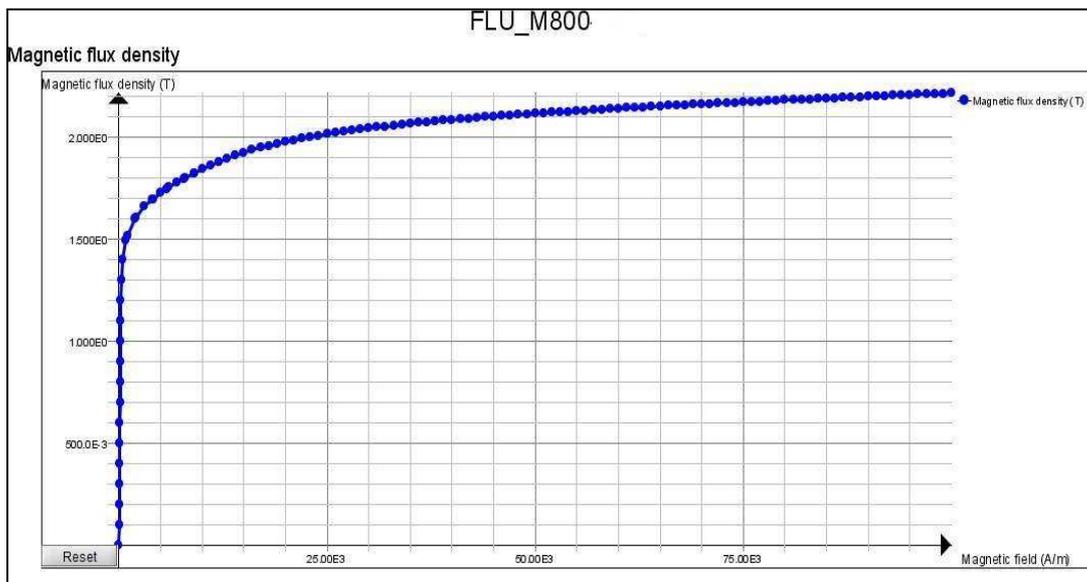
### 2.11.2 Matériaux magnétiques

Nous avons attribué à la région volumique du stator le matériau « flux M 270» et à la région volumique du rotor le matériau « flux M 800». Les courbes d'aimantation sont données par les **figures (2.7.a et b)**. L'ensemble mécanique de stator est fixe, par contre le rotor est tournant, 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 statorique.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe



(a)



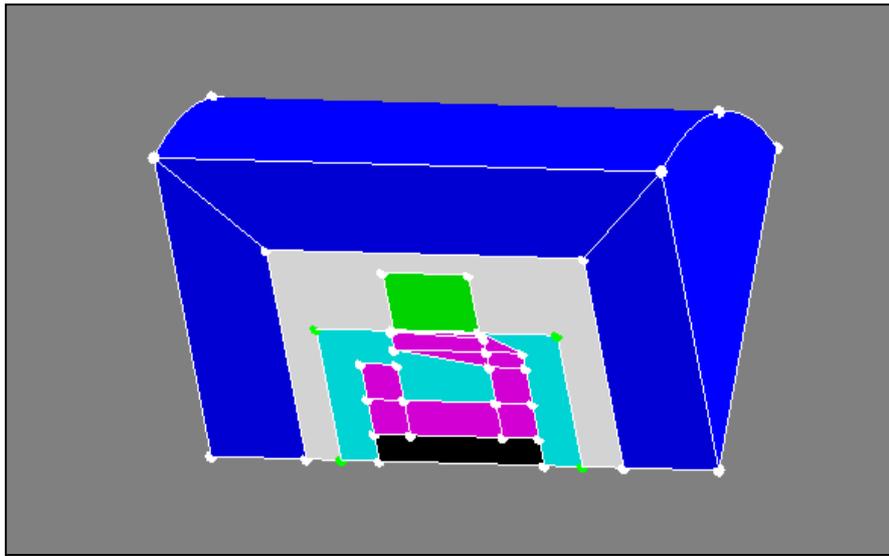
(b)

Figure 2.7: Les courbes d'aimantations pour «flux M270» et «flux M800».

### 2.11.3 Création des régions

On décompose l'alternateur par des régions volumique comme sont illustrées dans la figure 2.8, cette étape sert à localiser les différentes parties de la machine : l'arbre, rotor (noyau, les rous polaires), stator, l'entrefer, le cylindre de glissement et la boîte infinie. Afin de les remplir par les matières appropriées.

## Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe



**Figure 2.8 :** Les régions de l'alternateur à griffes.

Le tableau indique les caractéristiques de chaque région.

Couleur	Nom	Matériau utilisé	Ensemble mécanique
Vert	Stator	Flux M270-35A	Fixe
Blue	Boite infinie	Air	Fixe
Gris	Air stator	Air	Fixe
Cyan	Cylindre de glissement	Air	Tournant
Rose	Rotor	Flux M270-35A	Tournant
Noire	Arbre	Inactif	Tournant

**Tableau 2.4:** Caractéristique de chaque région volumique.

### 2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, a été présentée, la première étape de la modélisation de l'alternateur à griffe. Cette étape concerne la conception géométrique et physique de la machine.

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

---

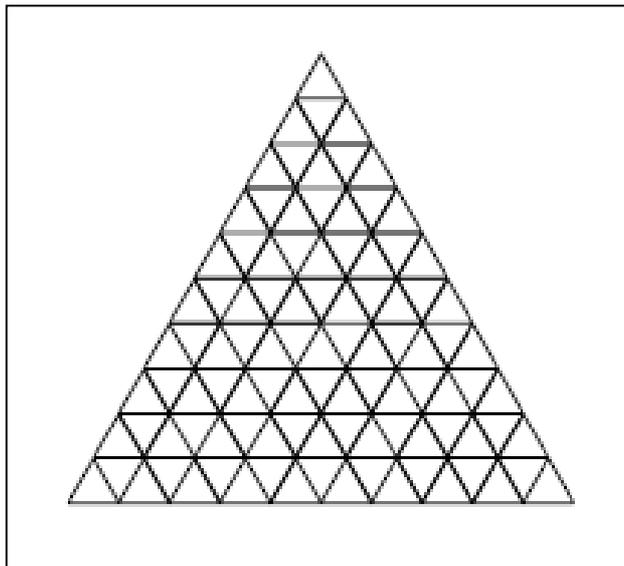
## 3.1 Introduction

Ce chapitre concerne les étapes de résolution du modèle de la machine. La première étape de la résolution par éléments finis concerne le maillage. Ce dernier consiste en la discrétisation du domaine d'étude. Cette étape est importante à la résolution car elle influe fortement sur la qualité et la précision de la solution. Une fois cette étape effectuée les enroulements statoriques et rotoriques doivent être insérés.

## 3.2 Le maillage

La génération de maillage peut se définir très brièvement comme l'art de partitionner un domaine en éléments de géométrie simple comme des triangles, des quadrilatères, des tétraèdres, etc. La figure 3.1 représente un exemple de maillage triangulaire.

La méthode générale consiste à placer des points sur la frontière et à l'intérieur d'un domaine, et à connecter ces points entre eux. Dans le cadre d'une simulation numérique par éléments ou volumes finis, la forme et la taille des éléments du maillage obtenus influent fortement sur la précision des calculs, indispensable à une bonne compréhension du phénomène physique étudié. Ainsi, depuis ses origines qui remontent à plus de quatre décennies, la génération automatique de maillage est un domaine de recherche qui ne cesse de progresser. [9]



**Figure 3.1** : le maillage triangulaire

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

---

Pour que le processus de simulation converge rapidement et atteigne la précision voulue, la qualité en taille et en forme du maillage joue un rôle primordial. [10]

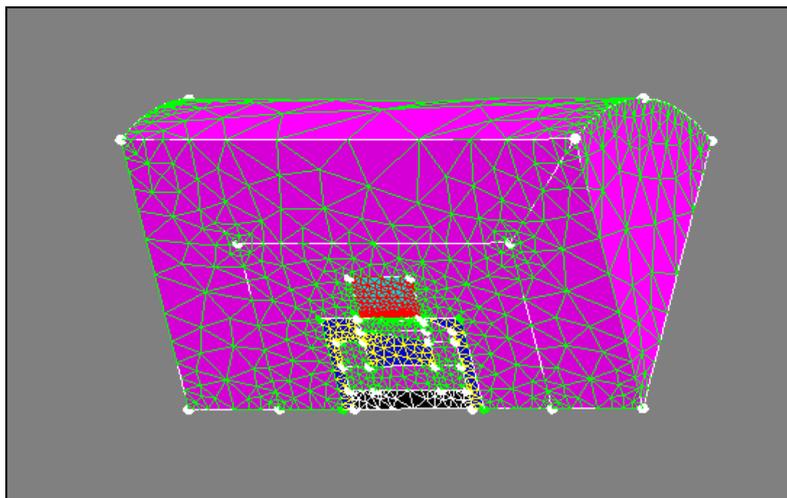
Le maillage d'une géométrie 3D est une tâche délicate, pour le faire il faut trouver le bon compromis entre précision et temps de calcul [1] et régler les problèmes des faces et les volumes, tout en assurant la convergence quelque soit la géométrie.

## 3.2.1 Application du maillage par Flux3D à l'alternateur à griffe

Le maillage choisi pour notre alternateur à griffes est un maillage triangulaire. Après plusieurs essais, nous avons adopté un maillage du premier ordre par discrétisation ponctuelle ce qui nécessite d'affecter manuellement à chaque point du domaine d'étude une valeur de discrétisation. Le maillage est également soumis à des conditions cycliques. A cet effet, et pour un maillage entier de la machine, nous avons utilisé, pour toutes les faces frontales, un mailleur de type « relié ». Ce mailleur permet d'assurer un maillage identique sur les plans de symétrie opposés.

Le maillage doit être fin là où la précision est imposée. Pour notre cas, c'est la zone « entrefer » qui a été minutieusement discrétisée.

Après plusieurs tentatives le maillage final obtenu pour la géométrie de l'alternateur est présenté par la **figure 3.2**.



**Figure 3.2 :** Le maillage de la géométrie avec la boîte infinie

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

La qualité de maillage est déterminée par le nombre d'éléments excellents, bons, moyens et médiocres. Le maillage utilisé est un maillage de premier ordre, les résultats sont présentés dans la figure suivant :

```
Volume elements :
  Number of elements not evaluated      : 0 %
  Number of excellent quality elements  : 51.94 %
  Number of good quality elements       : 36.34 %
  Number of average quality elements    : 10.83 %
  Number of poor quality elements       : 0.89 %

Number of nodes : 34824
Number of line elements : 6046
Number of surface elements : 57480
Number of volume elements : 197072
Mesh order : 1st order

Verifying of linked faces ...
  16 face(s) respect strongly (ELEMENTS) linked mesh generator.
```

Figure 3.3 : Les résultats du maillage.

## 3.3 Les enroulements de l'alternateur à griffe

### 3.3.1 L'enroulement de rotor

L'alternateur à griffe possède une seule bobine excitatrice dans le rotor alimenté par deux bagues. Cette bobine est conçue à laide de **Flux 3D**, avec ses paramètres réelles ; mécaniques et électriques.

- **Les paramètres mécaniques** : le type de la bobine, la longueur, la largeur et le rayon.

Le paramètre	La valeur
Le type	Bobine circulaire
La longueur	La longueur de noyau
La largeur	2 mm
Le rayon	Le rayon de noyau

Tableau 3.1 : Les paramètres mécaniques de la bobine rotorique.

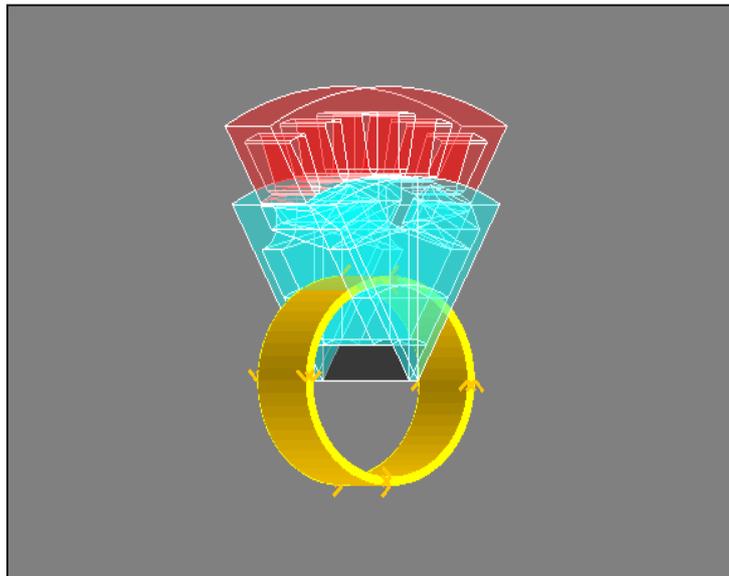
# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

- **Les paramètres électriques :** le nombre de spires, coefficient de foisonnement, courant d'excitation, résistivité.

Le paramètre	La valeur
Le nombre de spires	200 spires
Coefficient de foisonnement	0.5
Courant d'excitation	2 A
La résistivité	$17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$

**Tableau 3.2 :** Les paramètres électriques de la bobine du rotor.

La **Figure 3.4** montre la bobine d'excitation de l'alternateur à griffes.



**Figure 3.4 :** La bobine d'excitation du rotor.

## 3.3.2 Les enroulements de stator

Le stator de l'alternateur à griffe comporte trois enroulements déphasés de  $(3 \cdot \pi) / 2$  qui doivent créer un système triphasé alternatif couplé en étoile.

- Calcul du nombre d'encoches par pôle et par phase ( $n_e$ )

L'équation 3.1 permet le calcul du nombre d'encoches par pôle et par phase

## Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

---

$$n_e = N_e / (2 * p * m) \quad (3.1)$$

avec :

$N_e$  est le nombre total d'encoches ( $N_e = 36$  dans notre cas)

$P$  est le nombre de paire de pole ( $p=6$  )

$m$  est le nombre de phase ( $m=3$ )

D'après l'équation 3.1 on peut dire que nous avons 1encoche par pole et par phase.

- Le pas diamétral (pas normal)

Le pas diamétral d'une bobine est calculé par l'équation suivante:

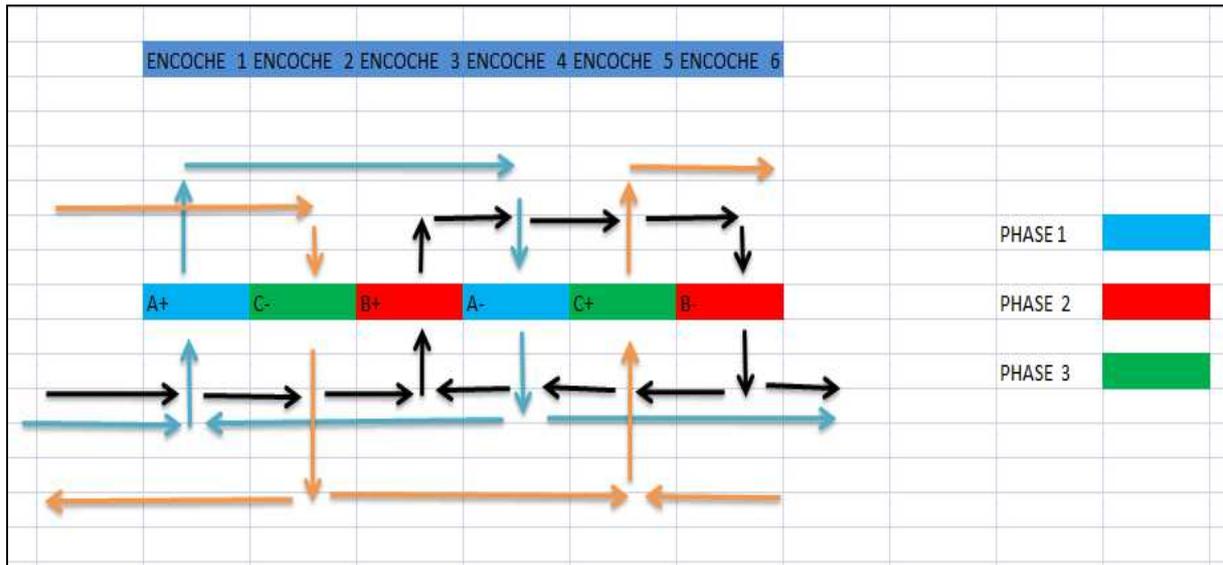
$$\text{Le pas diamétral} = N_e / (p * 2) \quad (3.2)$$

$$\text{Le pas diamétral} = 3.$$

On programme point par point le chemin des enroulements statorique sur logiciel **Flux 3D**, le type de bobinage utilisé est de type série .on choisit pour chaque phase un bobinage composé avec un chemin ouvert de la circulation de la bobine entre les encoches. Pour faire une phase on doit créer un repère pour imposer où va commencer la premier point de cette phase. Ensuite on détermine le chemin de l'enroulement par les cordonnés de chaque point du trajet jusqu'à avoir une bobine complète. Ces opérations doivent être répétées avec les deux autres enroulements avec un décalage de trois encoches (pas diamétral).

Dans la figure 3.5 nous présenterons le 6ème du bobinage des 3phases statoriques :

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique



**Figure 3.5 :** Représentation d'un 6ème des enroulements statoriques

On décrit les différents paramètres des enroulements dans le tableau suivant :

Le paramètre	La valeur
Rayon de la section	0.8 mm
Nombre de tour de la bobine	7 spires
Coefficient de foisonnement	0.5
La Résistivité	$17 \cdot 10^{-9} \Omega.m$

**Tableau 3.3 :** Les paramètres des enroulements statorique

Les trois enroulements statorique sont illustrés par la figure suivante :

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

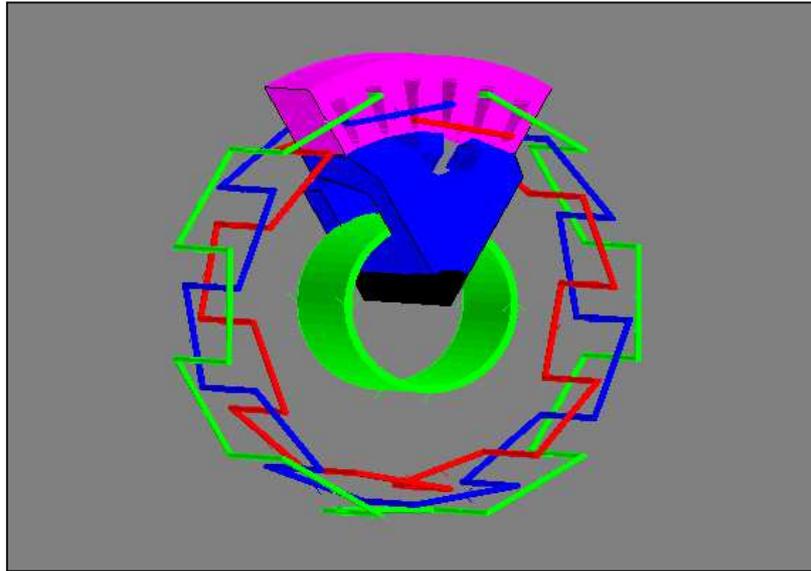


Figure 3.6 : Les enroulements de l'alternateur à griffe

## 3.4 Couplage circuit extérieur

Le couplage magnéto-électrique permet d'obtenir les tensions de sortie, avec le couplage étoile. La figure 3.7 illustre les enroulements et les résistances de circuit, branchées à la sortie de l'alternateur.

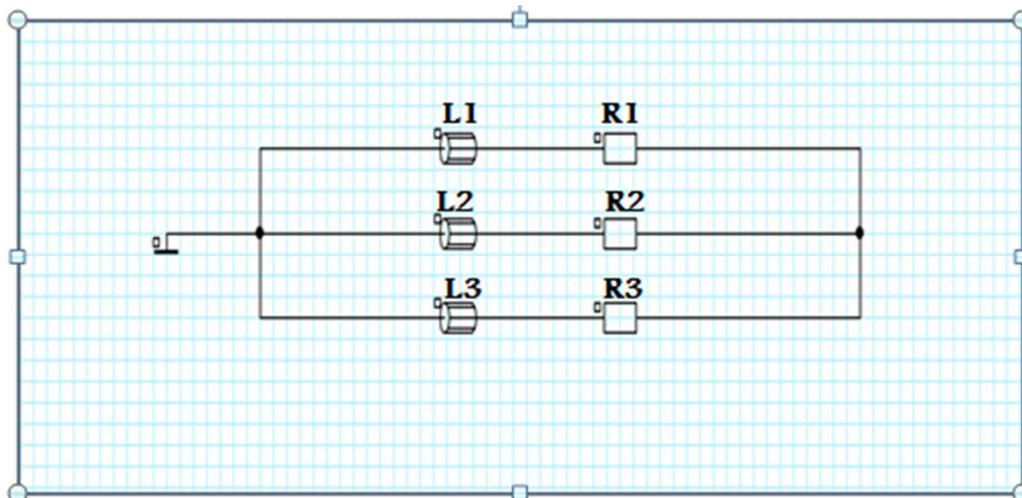


Figure 3.7 : Couplage de circuit extérieur.

# Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

---

## 3.5 Conclusion

Le maillage est une étape importante pour la résolution des problèmes par la méthode des éléments finis. Un compromis entre précision de la solution et le temps de calcul doit être effectué. La bobine d'excitation rotorique est la source du champ d'induction magnétique de la machine. Le choix du type de bobinage des 3 enroulements statorique, en tenant compte du nombre de paire de pole et le nombre total d'encoches statorique, assure la création d'un système alternatif triphasé à la sortie de l'alternateur à griffe.

# Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

## 4.1 Introduction

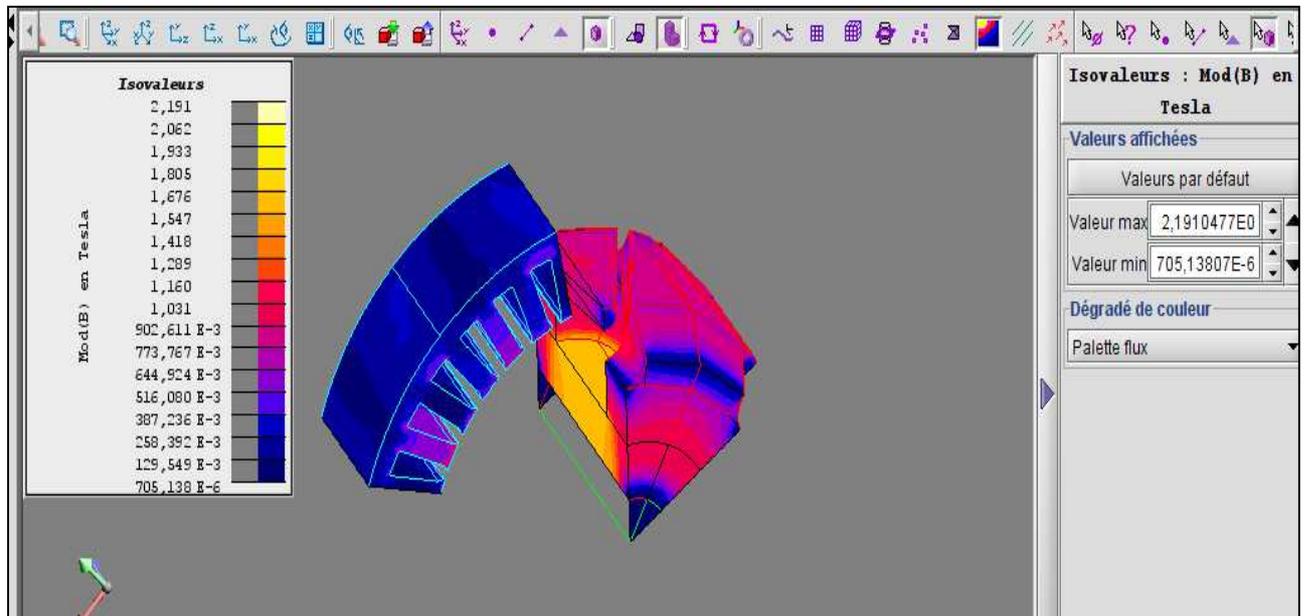
Ce dernier chapitre consiste à l'exploitation des résultats de la résolution du modèle numérique de l'alternateur à griffe. Deux types de résolutions seront étudiées la résolution en magnétostatique et la résolution en magnéto-transitoire. On finira par la validation du modèle numérique obtenu.

## 4.2 Etude en Magnétostatique

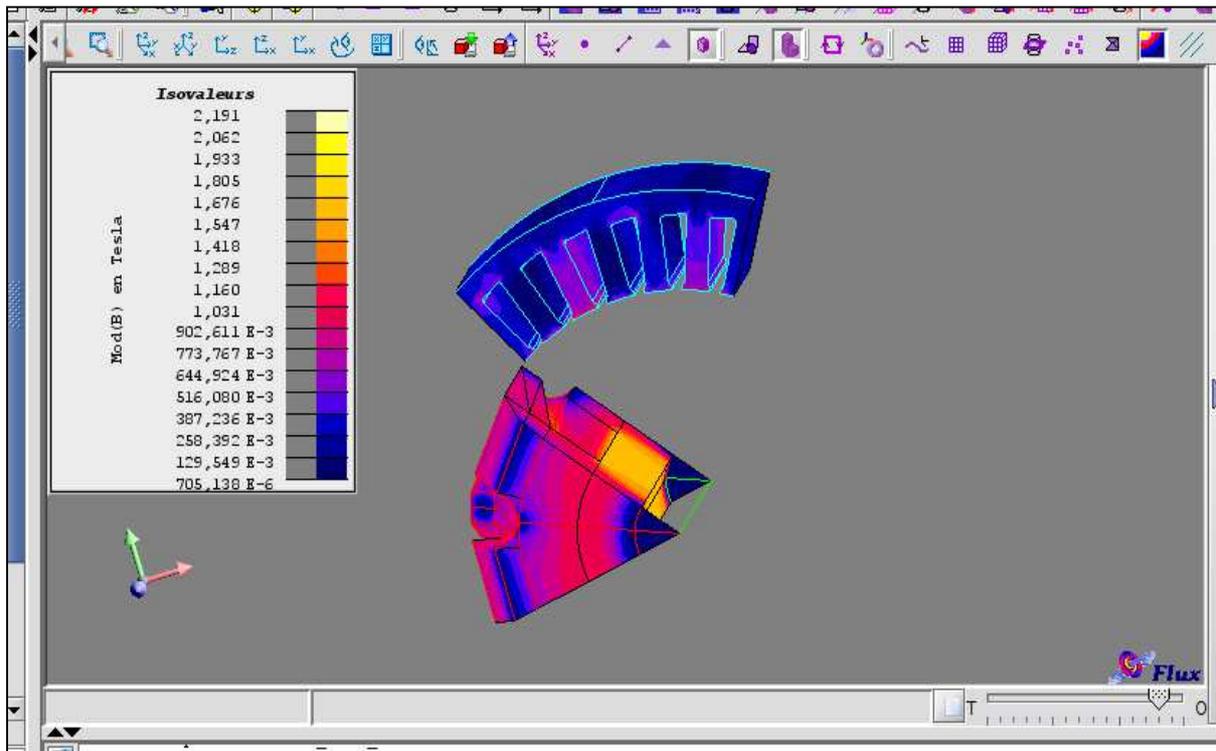
Parmi les résultats significatifs que l'on peut obtenir en magnétostatique sont Les champs d'inductions magnétiques et l'état de saturation d'un circuit.

### 4.2.1 L'état de saturation de l'alternateur à vide

Pour connaître l'état de saturation du circuit magnétique de l'alternateur, nous avons effectué un calcul en multi-positions à vide. La **figure 4.1** montre le dégradé de l'induction magnétique. Nous constatons que l'induction est maximale (2.19 T) dans le noyau, car la bobine excitatrice est la source d'induction magnétique, par contre elle est diminuée à l'extrémité de noyau (les plateaux) environ (1.5 T), la dégression continue au niveau de la griffe (1.1 T).



(a)



(b)

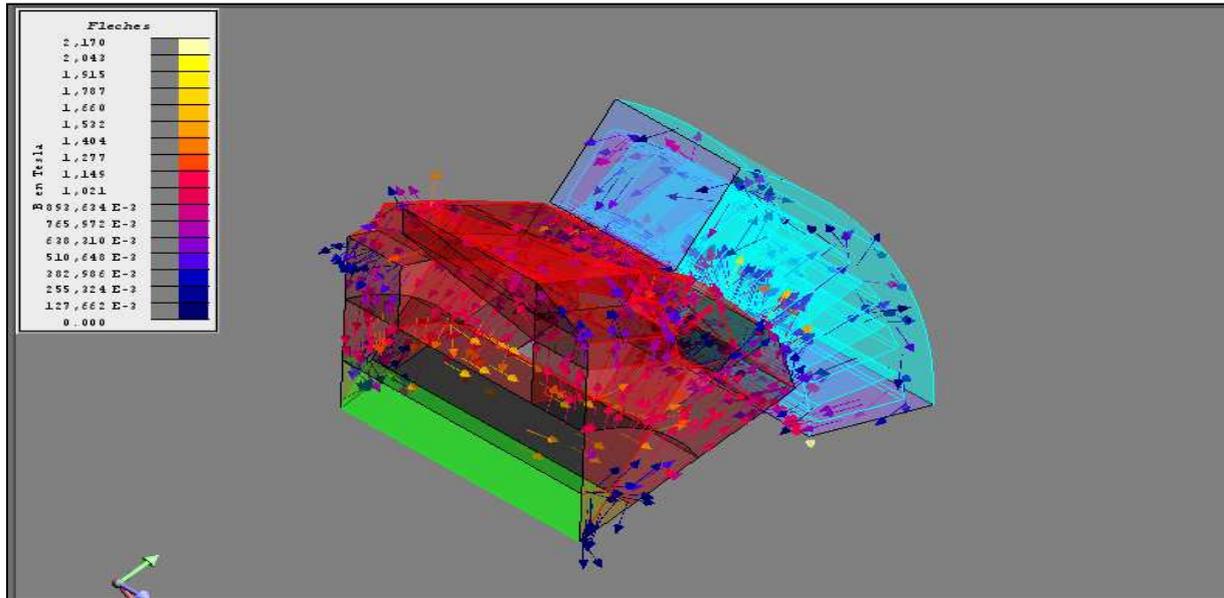
**Figure 4.1** : Dégradé de l'induction magnétique à vide.

On passant au stator, on remarque que l'induction magnétique est faible notamment au niveau de la culasse (0.26 T), par contre dans les dents statorique on observe que l'induction magnétique est plus grande avec une valeur de (0.644 T).

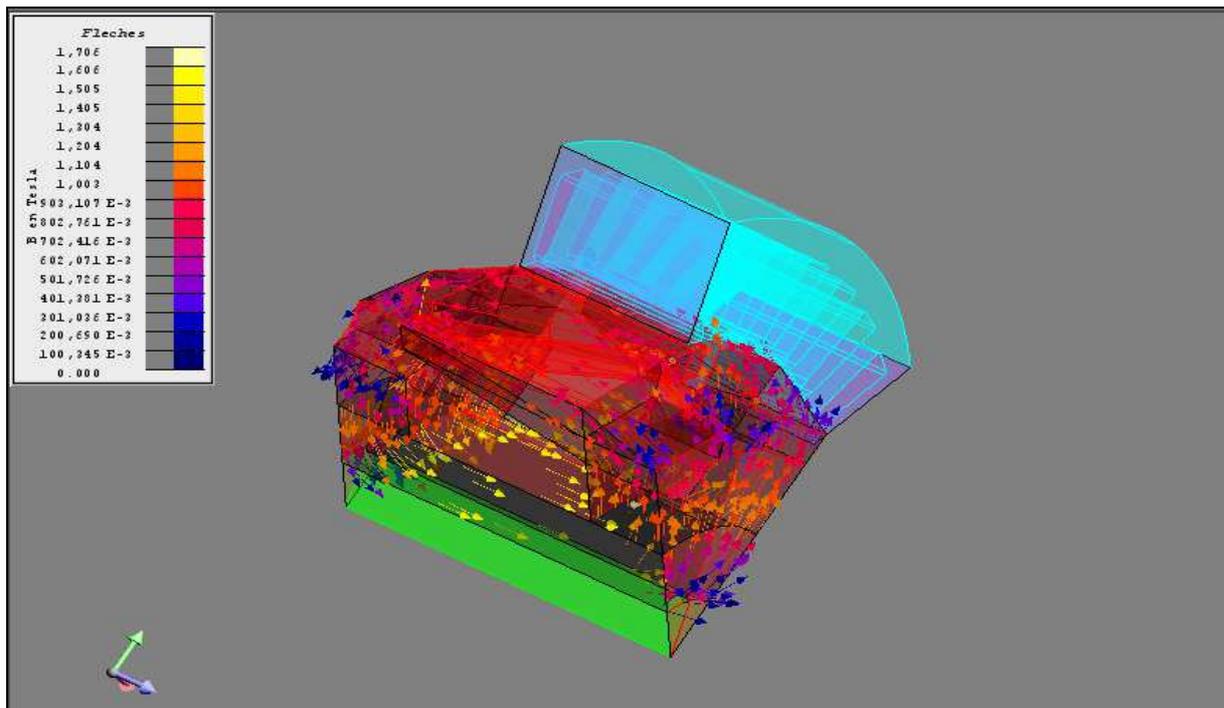
### 4.2.2 Trajet de flux dans l'alternateur à griffe

La bobine d'excitation crée un champ axial dans le noyau, et il apparaît donc aux extrémités du noyau (qui sont les plateaux à griffes) une polarisation magnétique « nord » et une polarisation magnétique « sud ». Les plateaux à griffes sont réalisés de façon à ce que lorsqu'on assemble le rotor, les griffes viennent s'intercaler les unes entre les autres. On obtient donc finalement au niveau de l'entrefer, une succession de pôles nord et sud.

## Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle



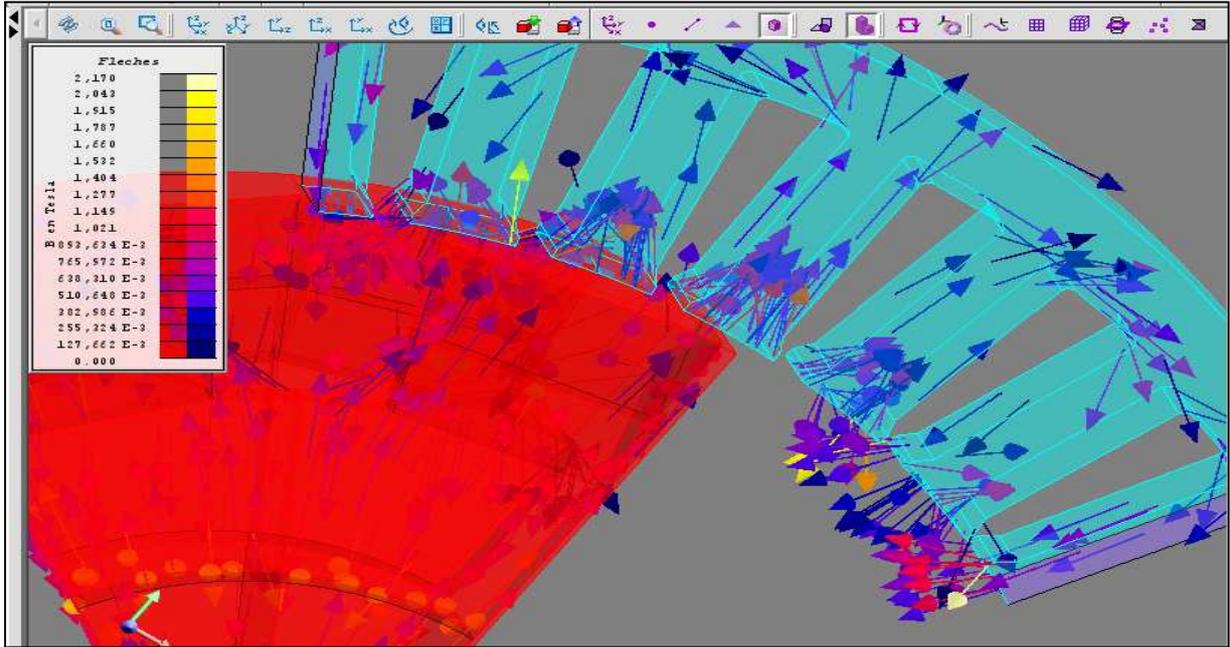
**Figure 4.2** : trajet de flux dans l'ensemble de l'alternateur.



**Figure 4.3** : trajet de flux dans le rotor

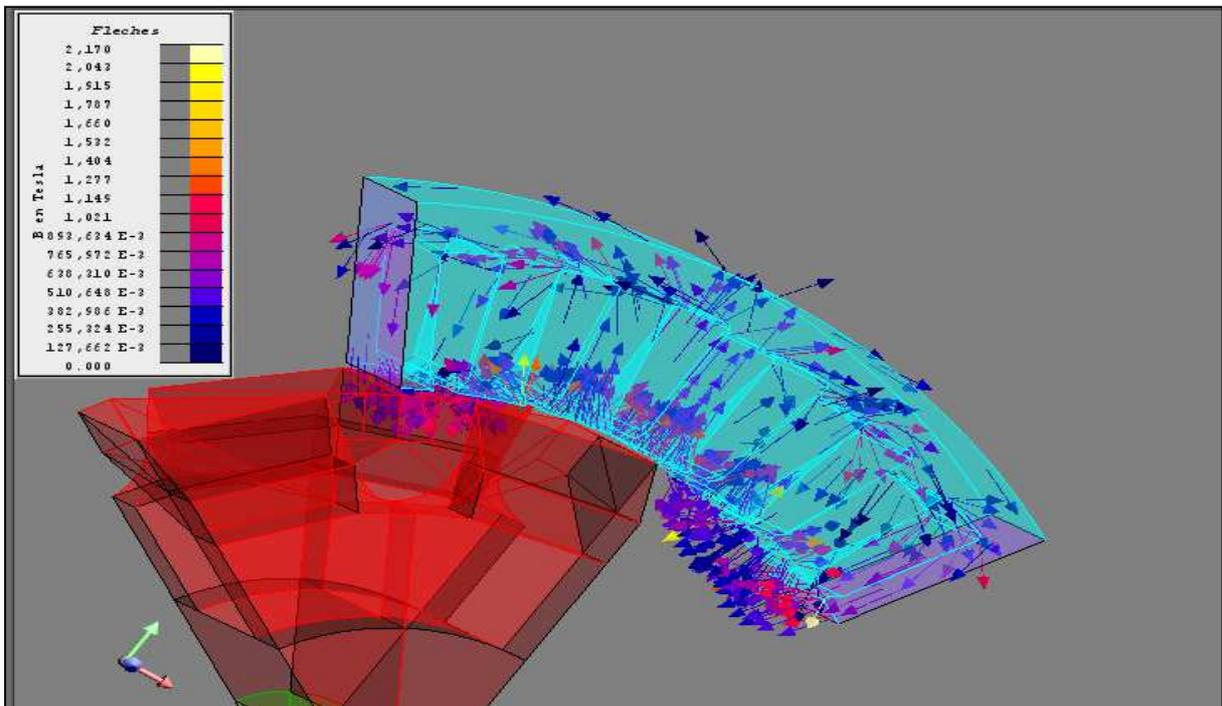
Sur la **figure 4.3**, on comprend aisément le trajet du flux inducteur : il traverse axialement le noyau, devient radial dans le plateau et il est axial et radial dans la griffe.

## Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle



**Figure 4.4** : trajet de flux dans l'entrefer

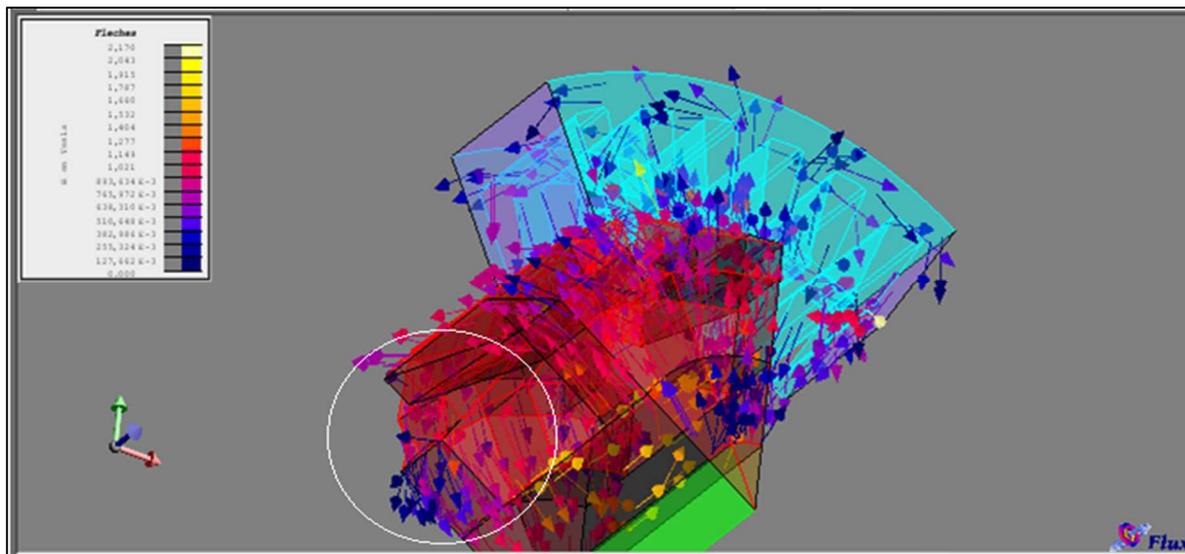
Ensuite, il traverse l'entrefer, passe dans la denture statorique (tout cela dans une direction radiale) et passe dans la culasse où là le champ a une direction azimuthale (dans le sens du feuilletage). Il faut remarquer que le flux qui « sort » d'une griffe se sépare en deux pour « rentrer », après le passage dans le stator, dans les deux griffes adjacentes **figure4.4**.



**Figure 4.5** : trajet de flux dans le stator.

## Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

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. La **figure 4.6** montre les fuites magnétiques de l'alternateur à griffe, voilà pour quoi le rendement est médiocre pour cette machine.



**Figure 4.6** : Les fuites magnétiques

### 4.3 Etude en Magnéto-transitoire

Pour simuler le fonctionnement de l'alternateur à vide, nous avons choisi le module magnétique-évolutif de Flux 3D. Ce module présente des avantages tels que le couplage avec un circuit électrique et la prise en compte du mouvement du rotor, ce qui permet d'imposer une vitesse de rotation. Nous avons effectué les calculs à une vitesse de 1500 tours/mn, l'alternateur est simulé à vide par l'utilisation des résistances de ligne avec une valeur très élevée ( $10 \cdot 10^{10} \Omega$ ).

- La Force électromotrice à vide :

L'induction magnétique utile qui passe du rotor vers le stator, génère, selon la loi de Lenz-Faraday, une force électromotrice (FEM) aux bornes de chaque bobine statorique.

Le choix du bon type de bobinage assure le décalage des trois phases et la valeur de l'induction magnétique assure l'amplitude pour les tensions de sortie.

## Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

$$FEM = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{max} \quad (4.2)$$

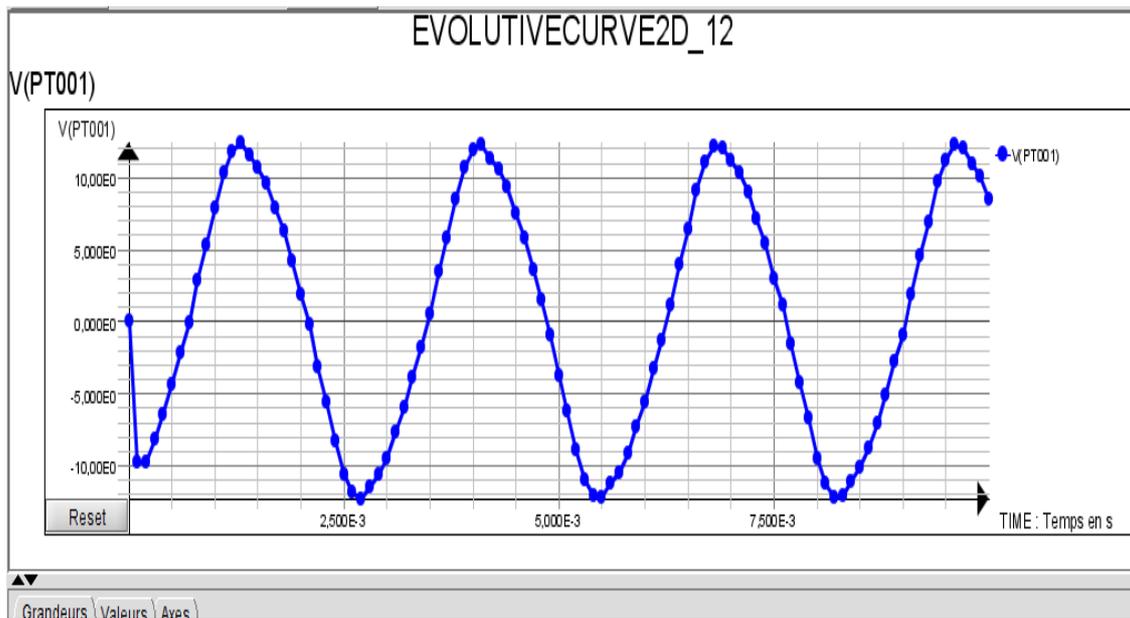
Avec

K : constante liée aux nombre de spires

f : fréquence (HZ)

$\phi_{max}$  : flux utile (WB)

La figure 4.7 montre l'évolution de la tension simple à vide en fonction du courant d'excitation, le stator est couplé en étoile.



**Figure 4.7 :** La FEM à vide.

# Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

- La FFT de la force électromotrice à vide :

On remarque que tension est composé par un spectre fondamentale et le reste sont des harmonique, ces harmonique influent un peut sur le réseau de bord de l'automobile.

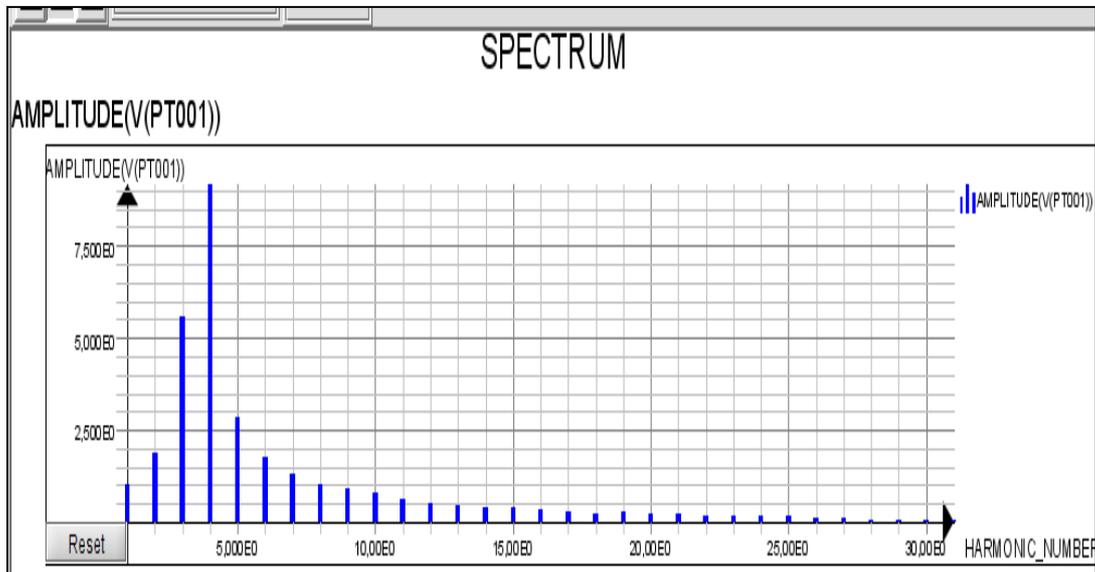
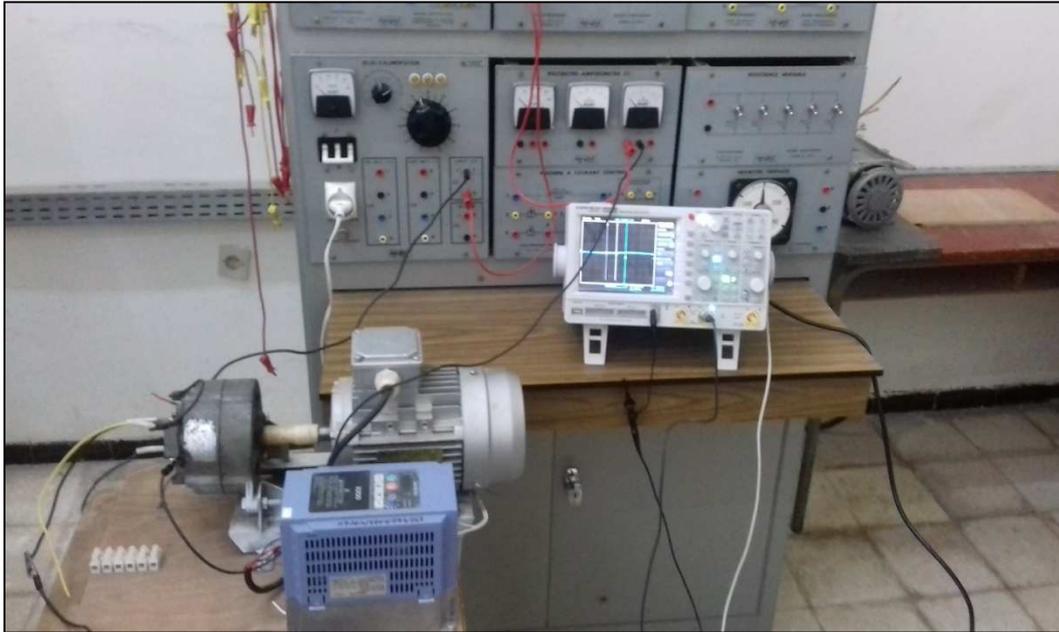


Figure 4.8 : LA FFT de tension à vide.

## 4.4 Banc d'essai

### 4.4.1 Description du banc d'essai

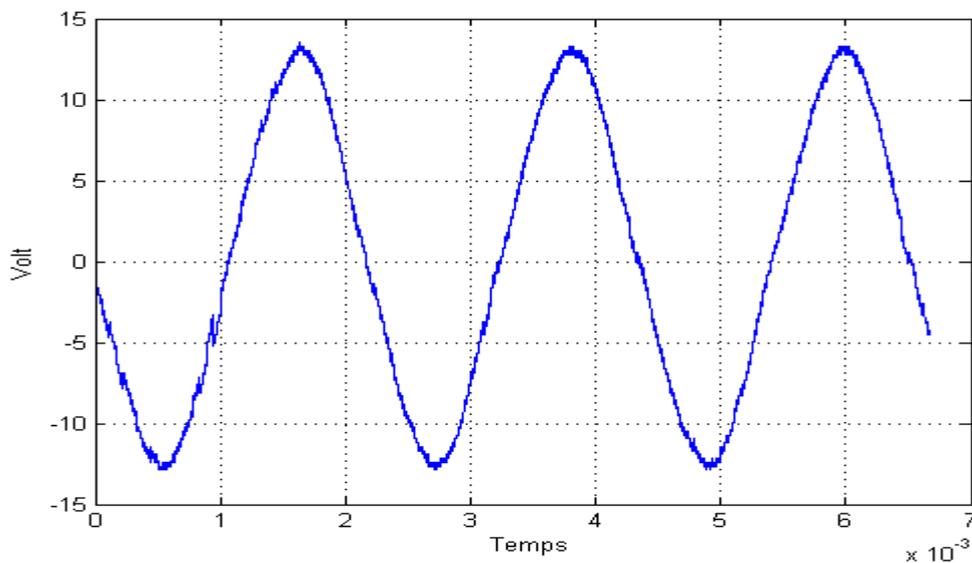
Le Banc d'essai comporte l'alternateur à griffe, une alimentation continue pour l'excitation de rotor, un moteur asynchrone pour l'entraînement de rotor de l'alternateur qui joue le rôle de moteur à combustion, un variateur de vitesse pour régler la vitesse de moteur synchrone, un oscilloscope pour visualisé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



**Figure 4.9 :** Le banc d'essai.

## 4.4.2 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 2 A, on impose une vitesse de 1500 tr/min sur le variateur de vitesse donc le moteur synchrone tourne avec la même vitesse. En suite on prend la tension simple de l'alternateur par l'oscilloscope.



**Figure 4.10 :** La tension de sortie de L'alternateur a 1500 tr/min.

# Chapitre 4 : Simulation et validation du modèle

---

## 4.5 Validation du modèle de l'alternateur

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.

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la résolution du modèle numérique de l'alternateur à griffe, en magnétostatique et magnéto-transitoire. La résolution en magnétostatique nous a permis de voir l'état de saturation et le trajet de flux dans l'alternateur. La résolution en magnéto-transitoire nous a permis de calculer et tracer la FEM à vide. Cette dernière, comparée à la FEM mesurée au banc d'essai, a permis la validation de modèle.

# Conclusion générale

---

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation de l'alternateur à griffe par la méthode des éléments finis. Cette approche a permis, en utilisant un logiciel de calcul de Champ 3D approprié, d'obtenir un modèle numérique de cet alternateur synchrone et typiquement tridimensionnel.

Le premier chapitre a fait l'objet de la présentation de la machine à griffe. Les éléments constitutifs de l'alternateur ont été détaillés. Les avantages et les inconvénients de cette machine ont été cités.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation numérique et tridimensionnelle de la machine. Une formulation du problème, tenant compte du couplage électrique et la saturation des matériaux a été présentée. Cette modélisation est basé sur le calcul du champ magnétique dans tous le domaine de la machine, pour cela le logiciel de calcul de champ 3D, basé sur les éléments finis, FLUX3D a été utilisé.

Le chapitre trois a été consacré au maillage qui représente la première étape de résolution par éléments finis d'un modèle numérique. Cette étape de résolution est très importante pour la résolution par éléments finis car elle influe fortement sur la précision de la solution. Cette étape a nécessité plusieurs tentative de discrétisation manuelle du domaine pour aboutir a un bon compromis entre une bonne qualité de maillage et un temps de calcul raisonnable.

Le chapitre quatre a été dédié à la résolution du modèle et l'exploitation des résultats. La résolution en magnétostatique nous a permis de voir l'état de saturation de la machine. Ainsi que le trajet du flux magnétique. La résolution en magnéto transitoire, qui nécessite un couplage électrique nous a permis de calculer la force électromotrice récoltée à la sortie de l'alternateur. Afin de valider le modèle obtenu, cette FEM ainsi obtenue a été comparée à la FEM obtenu par des mesures prises d'un banc d'essai du laboratoire.



**Figure 1 :** L'alimentation de courant continu.



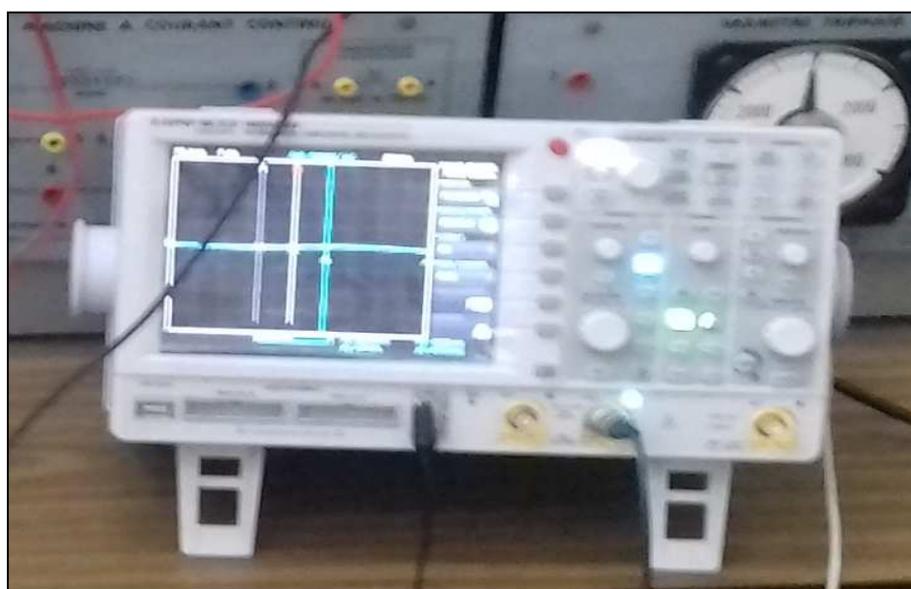
**Figure 2 :** Le variateur de vitesse.



**Figure 3 :** Le moteur asynchrone d'entraînement



**Figure 4 :** L'alternateur à griffe.



**Figure 5 :** L'oscilloscope.



**Figure 6 :** La roue polaire de rotor de l'alternateur à griffe.

- [1] Laurent Albert. Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. <tel-00007091>.
- [2] Lilya Bouarroudj. Contribution à l'étude de l'alternateur à griffes Application au domaine automobile. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français. <tel- 00165565>
- [3] Sylvain Perez. Contribution au dimensionnement optimal d'alternateur à griffes sans aimant – Apport des alliages FeCo. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2013. Français. <tel- 00990653v1>
- [4] R. 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 thème. 2006
- [5] Z. BOUZIANE « Rétro-conception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible (Tlemcen) » Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master En Génie2 Mécanique thème soutenu en 2013.
- [6] AYACHE MOHAMED et EL FANI YASSINE «Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'une machine asynchrone» Mémoire de Master Filière Electrotechnique Spécialité Machines électriques. 2017
- [7] HAMADOU Adil et NESSISSEN Abdelkader « Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil » Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention de diplôme Master En Génie électrique .2015
- [8] T. bouchala “Modélisation semi analytique d'un capteur a noyau de ferrite “ thèse de magister en électronique, université H. Lakhdar de Batna, 2007.
- [9] F. Jawad « Etude du problème inverse en électromagnétisme vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aiment permanents » thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de technologie de belfort -Sciences Pour l'Ingénieur .2008.
- [10] Paul RAPIN Lauréat de l'Institut Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité