

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

MECHERI CHEMS-EDDINE

&

HAMMOUDANE MOHAMED

Modélisation numérique à base d'EF en charge d'un alternateur à griffes

Mme Brahimi.N

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui nous a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré les bons pas et les justes reflexes, sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

Nous remercions vivement notre chère promotrice Madame **Brahimi.N**, pour nous avoir dirigé le long de l'élaboration de ce travail, pour sa disponibilité et son aide.

Nous exprimons toutes nos gratitudees et nos remerciements aux membres de jury qui ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

Notre profond respect et notre reconnaissance à tous nos professeurs qui nous ont enseignés durant notre cursus, à nos collègues et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

ملخص: المولد ذو المخلب هو جهاز توليد الطاقة الأكثر استخدامًا في المركبات. يتمثل دورها في توفير جميع أجهزة الاستقبال المتصلة بالشبكة الداخلية، وبشكل أكثر تحديدًا لشحن البطارية. حتى لو تم استخدام مبدأ الآلات الكهربائية لأكثر من قرن، فإن تصميمها لا يزال قيد التطوير حتى اليوم.

في مذكرتنا هاته سنتطرق لدراسة وتحليل سلوك مولد المخلب تحت الحمل عن طريق النمذجة الرقمية بناءً على طريقة "FLUX-3D" العناصر المحدودة باستخدام برنامج الحساب.

كلمات المفاتيح: المولد ذو المخلب ، النمذجة العددية ، العناصر المحدودة

Résumé : L'alternateur à griffes constitue le dispositif de génération d'énergie le plus couramment utilisé dans les véhicules. Il a pour rôle d'alimenter tous les récepteurs reliés au réseau de bord, et plus particulièrement de charger la batterie. Même si le principe des machines électriques est utilisé depuis plus d'un siècle, leur conception fait encore aujourd'hui l'objet d'améliorations.

Dans cette optique, notre contribution opte pour étudier et analyser le comportement de l'alternateur à griffes en charge par modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel de calcul « **FLUX-3D** ».

Mots clés : L'alternateur à griffes, modélisation numérique, éléments finis, **FLUX-3D**

Abstract : The claw alternator is the most commonly used power generation device in vehicles. Its role is to supply all the receivers connected to the on-board network, and more particularly to charge the battery. Even if the principle of electric machines has been used for more than a century, their design is still being improved today. With this in mind, our contribution opts to study and analyze the behavior of the claw alternator under load by numerical modeling based on the finite element method using the "FLUX-3D" calculation software.

Keywords: The claw alternator, numerical modeling, finite elements, **FLUX-3D**

Dédicaces

Je remercie Dieu le "Tout Puissant" pour m'avoir donné la force et le courage de surmonter tous les obstacles pour mener ce travail à terme.

Je dédie affectueusement ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers ;

A mes parents

Qui n'ont jamais cessé de me soutenir, de m'épauler et de formuler des prières à mon égard.

Que Dieu vous procure bonne santé et longue vie.

A mon frère "Aboubakre".

A mes sœurs.

A mes grands-parents.

Aux grandes familles "MECHERI" et "KESSAR".

A ma chère promotrice Mme Brahimi.N, pour son aide et sa disponibilité.

A mes amis "Abdou, Bilal, Nadir, Ihab, Sadek..... "

À tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leurs conseils.

Chemseddine

Listes des acronymes et abréviations

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

Hz : Hertz

μ : La perméabilité 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

μ : La perméabilité magnétique du milieu

ϵ : La permittivité du milieu

σ : La conductivité du milieu

tr : Tour

min : Minute

FEM : Force électromotrice

ne : Nombre d'encoches par pole et par phase

Z : Le nombre total d'encoches

P : Le nombre de pôles

m : Le nombre de phase

R : Résistance

B : Bobine

T : Tesla

A : Ampère

V : Volte

Ω : Ohm

P : Puissance

W : Watt

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

1.1. Introduction	2
1.2. L'électricité dans l'automobile	2
1.3. Le générateur d'électricité actuel l'alternateur à griffe	3
1.3.1. Le stator	4
1.3.2. Le rotor	5
1.3.4. Le régulateur	8
1.3.6. Le refroidissement	8
1.4. Le principe de fonctionnement de l'alternateur à griffe	9
1.5. Le trajet du flux de l'alternateur	10
1.6. Les avantages et les inconvénients de l'alternateur à griffe	11
1.6.1. Les avantages	11
1.6.2. Les inconvénients	11
1.7. Conclusion	12

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

2.1. Introduction	13
2.2. Les différents types de modélisation	13
2.2.1. Les modèles analytiques	13
2.2.2. Les modèles numériques	13
2.2.3. Les modèles semi-numériques	14
2.3. Méthode d'élément finis	14
2.3.1. Principe de la méthode des éléments finis	14
2.4. Condition aux limites	15
2.5. Les équations de maxwell	15
2.6. L'approximation des régimes quasi stationnaire	17
2.7. Modélisation de l'alternateur à griffes	17

2.8. Définition de logiciel flux 3D	20
2.8.1. La modélisation par FLUX-3D	20
2.8.2. Construction géométrique	20
2.8.3. La partie physique.....	25
a) Création des régions volumiques	25
b) Création des matériaux	25
2.9. Conclusion	28

Chapitre 3 : Résolution du modele numérique

3.1. Introduction	29
3.2. Le maillage	29
3.2.1. Le maillage dans le FLUX-3D	29
3.2.2. Le maillage de l'alternateur a griffes	29
3.3. Le bobinage de l'alternateur a griffes	31
3.3.1. Le bobinage rotorique	31
3.3.1. Le bobinage statorique	32
3.4. Couplage Circuit électrique.....	33
3.5. Résolution en magnéto-transitoire	34
3.5.1 Scénario de résolution	34
3.5.2 Caractéristique à vide de l'alternateur (courbe de saturation).....	34
3.6. Conclusion	36

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

4.1. Introduction	37
4.2. Résolution à vide et points de fonctionnement.....	37
4.3. Résolution du modèle en charge	39
4.4. L'évolution de l'induction magnétique radiale.....	42
4.4.1. L'induction magnétique radiale à vide.....	42
4.4.2. L'induction magnétique radiale en charge	44
4.5. Résolution du modèle à différentes charges	46
4.6. Conclusion	49

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1. Evolution de la consommation électrique dans un véhicule (source : SAE – Society of Automotive Engineers).	3
Figure 1. 3. Stator de l’alternateur.	4
Figure 1. 2. Vue éclatée de l’alternateur à griffes.....	4
Figure 1. 4. Process slinky, construction du stator en hélice.....	5
Figure 1. 5. Vue éclatée du rotor de l’alternateur	6
Figure 1. 6. Vue de coté du redresseur de l’alternateur A (pièces métalliques écartées volontairement).....	7
Figure 1. 7. Schéma électrique d’un alternateur à deux redresseurs.	7
Figure 1. 8. Régulateur de l’alternateur.	8
Figure 1. 9. Alternateur refroidi à l’eau.	9
Figure 1. 10. Schéma électrique de l’alternateur.....	10
Figure 1. 11. Ligne moyenne du flux inducteur sur un pas polaire.	11

Chapitre 2

Figure 2. 1. Paramètres géométriques du rotor.....	21
Figure 2. 2. (a) et (b) la géométrie du rotor sur FLUX-3D.....	22
Figure 2. 3. Paramètres géométriques du stator.....	23
Figure 2. 4. La géométrie du stator sur FLUX-3D.	23
Figure 2. 5. Le sixième de l’alternateur	24
Figure 2. 6. Les régions volumiques de l’alternateur.	25
Figure 2. 7. Courbe d’aimantation de matériaux magnétique IHPHY_AFK502.	26
Figure 2. 8. Courbe d’aimantation de matériaux magnétique FLU_M270-35A.....	26

Chapitre 3

Figure 3. 1. Le maillage obtenu sur le FLUX-3D.....	30
Figure 3. 2. La qualité de maillage.	30
Figure 3. 3. La bobine d’excitation du rotor.....	31
Figure 3. 4. Un sixième de chemin des enroulements statoriques.	33
Figure 3. 5. Les enroulements dans FLUX-3D.	33
Figure 3. 6. Le couplage de circuit électrique (sortie alternative sans redresseur).	34

Figure 3. 7. La caractéristique à vide de l'alternateur à vide.	35
--	----

Chapitre 4

Figure 4. 1. Circuit électrique.	38
Figure 4. 2. La f.e.m à vide à 1800 tr/min.	38
Figure 4. 3. La f.e.m à vide à 3000 tr/min.	38
Figure 4. 4. La f.e.m à vide à 6000 tr/min.	39
Figure 4. 5. Le dégradé de l'induction magnétique en charge ($R=5 \Omega$) à 1800 tr/mn.....	39
Figure 4. 6. Le dégradé de l'induction magnétique à vide à 1800 tr/mn.	40
Figure 4. 7. Le dégradé de l'induction magnétique en charge ($R=5 \Omega$) à 6000 tr/mn.....	40
Figure 4. 8. Le dégradé de l'induction magnétique à vide à 6000 tr/mn.	41
Figure 4. 9. Supports ponctuels.....	42
Figure 4. 10. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT1.	43
Figure 4. 11. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT2.	43
Figure 4. 12. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT3.	43
Figure 4. 13. Evolution de l'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn.	44
Figure 4. 14. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5 \Omega$) a 1800 tours/mn au PT1.	44
Figure 4. 15. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5\Omega$) a 1800 tours/mn au PT2.	45
Figure 4. 16. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5\Omega$) a 1800 tours/mn au PT3.	45
Figure 4. 17. Evolution de l'induction magnétique radiale en charge à 1800 tours/mn...46	46
Figure 4. 18. La courbe des puissances en fonction de la tension de sortie.	48

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2. 1. Les paramètres géométriques du rotor.....	22
Tableau 2. 2. Les désignations des paramètres et leurs valeurs.....	24
Tableau 2. 3. Les caractéristiques physiques, les couleurs et l'ensemble mécanique des régions volumiques de l'alternateur à griffes.	27

Chapitre 3

Tableau 3. 1. Les résultats de maillage.	30
Tableau 3. 2. Les paramètres géométriques.	31
Tableau 3. 3. Les paramètres électriques.....	32

Chapitre 4

Tableau 4. 1. Les résultats de simulation à différentes charges à 1800 tr/min.	47
Tableau 4. 2. Les résultats de simulation à différentes charges à 3000 tr/mn.	47
Tableau 4. 3. Les résultats de simulation à différentes charges à 6000 tr/min.	47

Introduction générale

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). De plus, les remplacements progressifs de dispositifs mécaniques ou hydrauliques, comme par exemple la direction assistée, par des actionneurs électrotechniques permettant de diminuer les coûts, de limiter l'encombrement et d'être plus facile à commander. La sollicitation croissante d'énergie électrique à bord des véhicules automobiles implique une production d'énergie embarquée plus importante.

L'alternateur à griffes constitue le dispositif de génération d'énergie le plus couramment utilisé dans les véhicules terrestres et est principalement conçu à faible coût. Même si le principe des machines électriques est utilisé depuis plus d'un siècle, leur conception fait encore aujourd'hui l'objet d'améliorations.

Dans cette optique, nous nous sommes intéressés à l'analyse du comportement de l'alternateur à griffes par modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Le logiciel de calcul en 3D sélectionné pour cette modélisation est le logiciel **FLUX-3D**.

Le présent travail comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'alternateur à griffes : Ces éléments constitutifs, son principe de fonctionnement ainsi que son trajet du flux, en plus de quelques avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est réservé à la description de la modélisation numérique de l'alternateur à griffes par la méthode des éléments finis. Ainsi a la conception géométrique de notre modèle par le **FLUX-3D**.

Le troisième chapitre fait trait au maillage, le bobinage et la résolution du modèle numérique pour le but de voir les caractéristiques à vide de notre alternateur.

Le dernier chapitre s'intéresse à la simulation de l'alternateur a griffes à différents points de fonctionnement pour but d'analyser le comportement du notre alternateur ainsi que l'exploitation des résultats.

Une conclusion générale a aussi été énoncée à la fin de ce travail.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

1.1. Introduction

Le générateur d'électricité des véhicules terrestres est actuellement un alternateur à griffes. 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 [1].

Ce premier chapitre s'intéresse à la présentation d'alternateur à griffes : Ces éléments constitutifs, son principe de fonctionnement ainsi que son trajet du flux et quelques avantages et inconvénients.

1.2. L'électricité dans l'automobile

Le secteur de l'automobile est un marché très concurrentiel entraînant les constructeurs d'automobiles à améliorer sans cesse leurs produits. De ce fait, 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 (électrification des vitres et des sièges, chauffage, désembuage), et l'agrément des véhicules. Par ailleurs, les remplacements de dispositifs mécaniques ou hydrauliques par des actionneurs électriques a permis de diminuer les coûts, de limiter l'encombrement et d'être plus facile à commander.

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**).

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

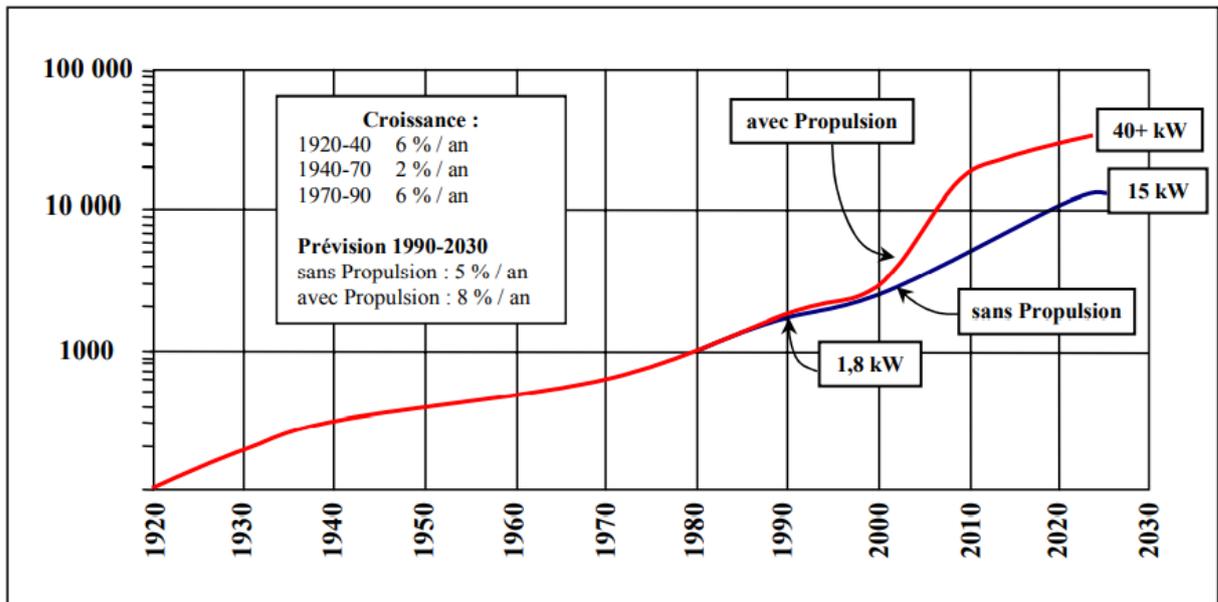


Figure 1. 1. Evolution de la consommation électrique dans un véhicule (source : SAE – Society of Automotive Engineers).

1.3. Le générateur d'électricité actuel l'alternateur à griffe

Les alternateurs à griffes sont classés dans la famille des machines synchrones triphasées. 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 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 [2].

Une vue éclatée de la machine est présentée par la figure 1.2.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

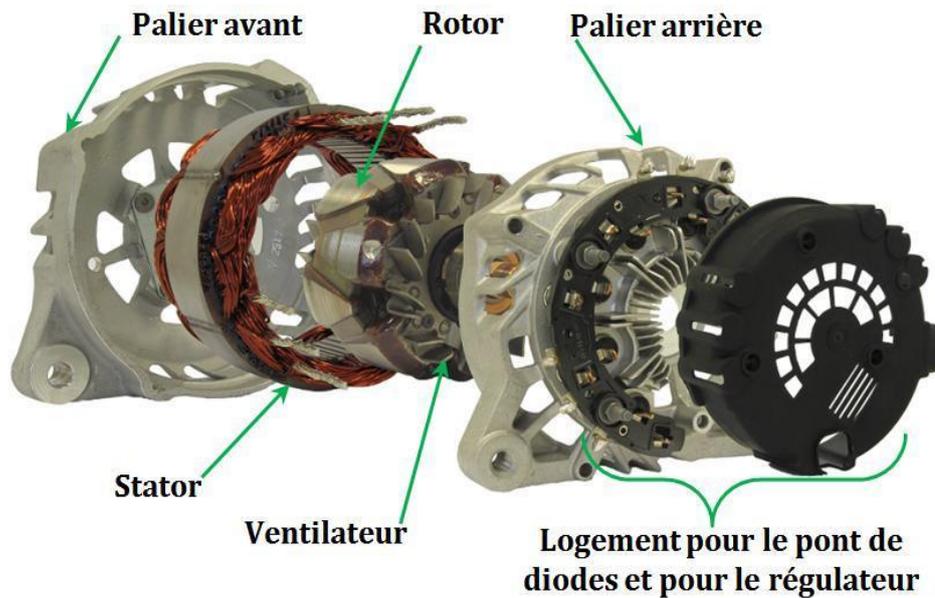


Figure 1. 2. Vue éclatée de l'alternateur à griffes.

Un alternateur à griffes est donc constitué d'un stator, un rotor, un redresseur, un régulateur, des paliers ainsi qu'un refroidisseur.

1.3.1. Le stator

Le stator forme l'induit de la machine (**figure 1.3**). Il est constitué d'un empilage de tôles encochées qui contient un enroulement triphasé. L'épaisseur des tôles est généralement de 0,5 mm et parfois de 0,35 mm [2]. Le bobinage peut être simple, couplé en triangle ou en étoile avec une encoche par pôle et par phase ; ou double, avec deux encoches par pôle et par phase [1].

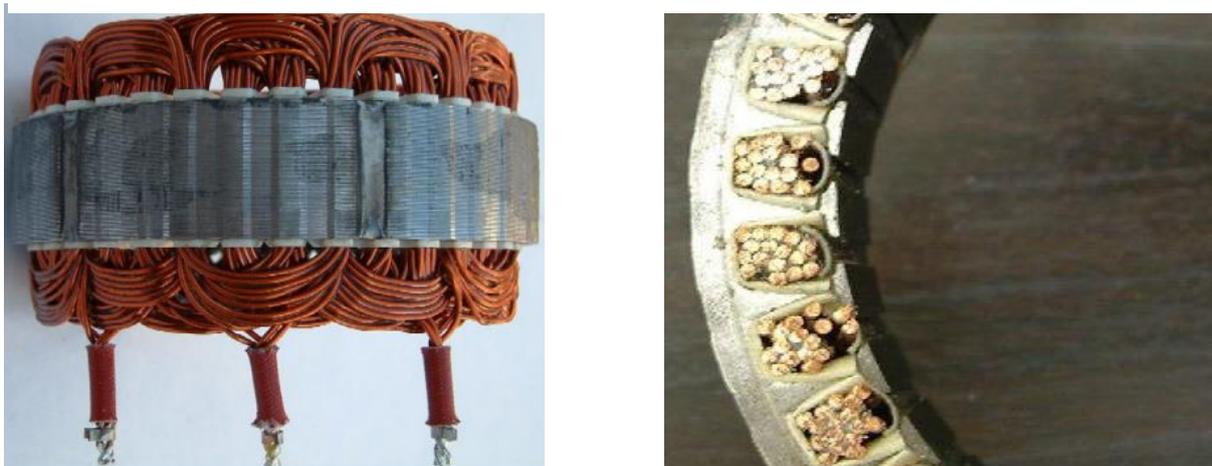


Figure 1. 3. Stator de l'alternateur.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

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 [2]. 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 1.4**. 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. Ensuite le bobinage, ondulé, est mis en forme avant d'être inséré dans le paquet de tôle en une fois ou en plusieurs fois.

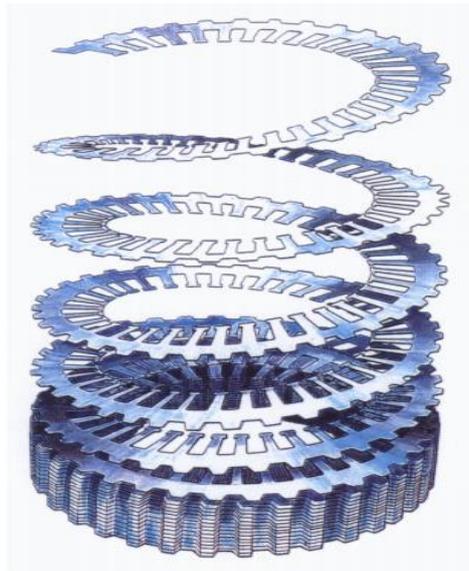


Figure 1. 4. Process slinky, construction du stator en hélice.

1.3.2. Le rotor

Le rotor représente l'inducteur de l'alternateur. Il comporte un noyau cylindrique axial muni d'une bobine excitatrice alimentée par l'intermédiaire de deux bagues, et deux roues polaires en forme de griffes, portant chacune des pôles qui s'intercalent les uns dans les autres de façon à constituer alternativement une succession de pôles Nord et Sud. Le nombre de paires de pôles rotoriques varie entre 6 et 8 suivant les modèles [1].

Dans le cas des alternateurs refroidis par air, deux ventilateurs sont placés à l'avant et à l'arrière du rotor dont une vue éclatée est représentée par **la figure 1.5**.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

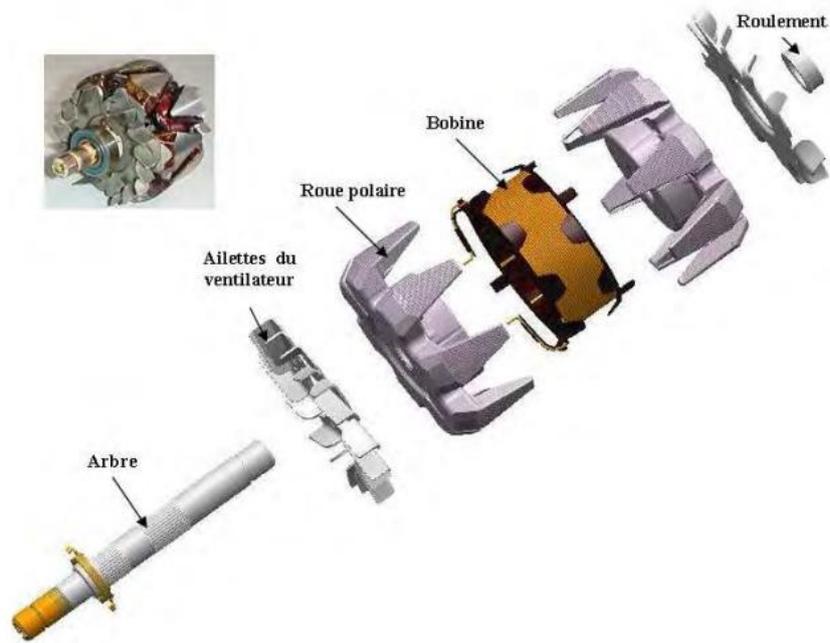


Figure 1. 5. Vue éclatée du rotor de l'alternateur

Le rotor est massif, le matériau utilisé est ferromagnétique (il n'y a pas de feuilletage, donc les pertes fer seront importantes, notamment à cause des courants de Foucault) [2].

1.3.3. Le redresseur

La plupart des alternateurs sont relié à un redresseur (**figure 1.6**) de diodes de puissance permettant un redressement de courant alternatif (triphase) vers un courant continu afin de charger la batterie et alimenter le réseau de bord du véhicule.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

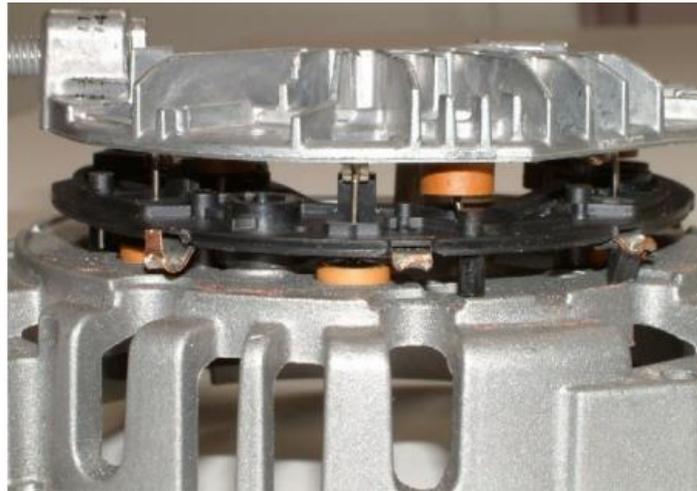


Figure 1. 6. Vue de coté du redresseur de l'alternateur A (pièces métalliques écartées volontairement).

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. [1]

Certains alternateurs, comme par exemple l'alternateur Denso dont le stator a été présenté précédemment, possèdent deux redresseurs à six diodes (**figure 1.7**) pour diminuer les ondulations du courant fourni au réseau de bord.

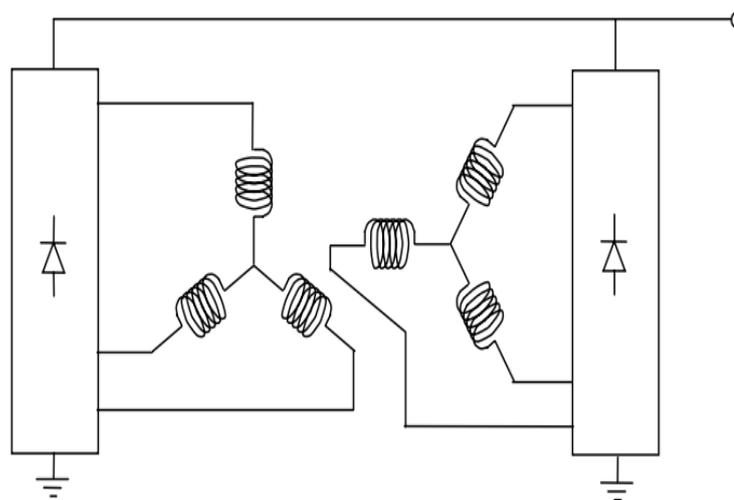


Figure 1. 7. Schéma électrique d'un alternateur à deux redresseurs.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

1.3.4. Le régulateur

Le régulateur a pour rôle d'ajuster la tension du réseau imposée aux bornes de l'enroulement rotorique en fonction de la vitesse de rotation et de la charge aux bornes de l'alternateur. A la manière d'un hacheur série, cet organe contrôle donc le courant d'excitation de l'alternateur afin que le débit de l'alternateur s'adapte à la charge de la batterie. En général, le régulateur (**figure 1.8**) est placé dans un boîtier métallique couplé avec les balais de l'excitation.



Figure 1. 8. Régulateur de l'alternateur.

1.3.5. Les paliers

Les paliers représentent l'armature externe de l'alternateur. Il s'agit des flasques et des paliers (avant et arrière) proprement dit, munis de roulements à billes.

Ils comportent des ouvertures entre lesquelles il y a des ailettes optimisées pour améliorer le refroidissement de la machine. Les paliers enserrant le rotor et le stator et soutiennent l'arbre par le biais des roulements assurant la liaison de l'alternateur avec le moteur thermique.

Le palier arrière supporte également le pont de diodes, le porte-balais et le régulateur.

1.3.6. Le refroidissement

Suite aux différentes pertes induites, l'alternateur nécessite un refroidissement. On distingue deux technologies de refroidissement :

- Le refroidissement par air force, assuré par deux ventilateurs internes placés aux deux extrémités du rotor (un pour faire entrer l'air et l'autre pour le faire sortir).

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

- Le refroidissement par un liquide (eau) qui circule autour de la carcasse de la machine (**figure 1.9**).



Figure 1. 9. Alternateur refroidi à l'eau.

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

L'alternateur à griffes est une machine synchrone triphasée à pôles saillants. L'entraînement de l'alternateur par le moteur à combustion interne du véhicule induit la transformation du courant alternatif en courant continu afin d'alimenter tous les récepteurs reliés au réseau de bord, et plus particulièrement de charger la batterie.

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 [1] par rapport à la vitesse du moteur thermique. 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 [1]. **Figure 1.10** représente un schéma électrique de l'alternateur.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

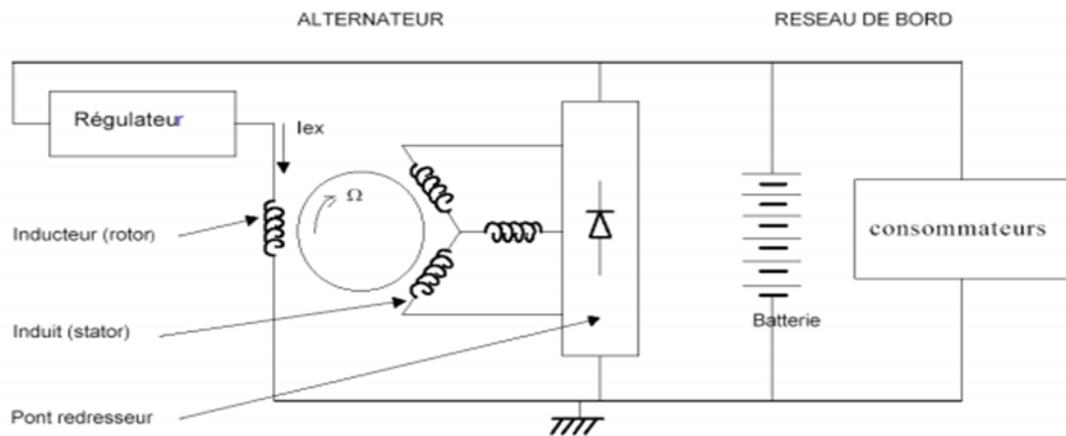


Figure 1. 10. Schéma électrique de l'alternateur

1.5. Le trajet du flux de l'alternateur

Le trajet de flux inducteur est l'une des difficultés confrontées lors de la compréhension du fonctionnement d'un alternateur à griffes.

Sur **la figure 1.11**, on comprend aisément le trajet du flux inducteur : il traverse axialement le noyau, devient radial dans le plateau et est axial et radial dans la griffe. Après, 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 azimutale (dans le sens du feuilletage) [2].

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

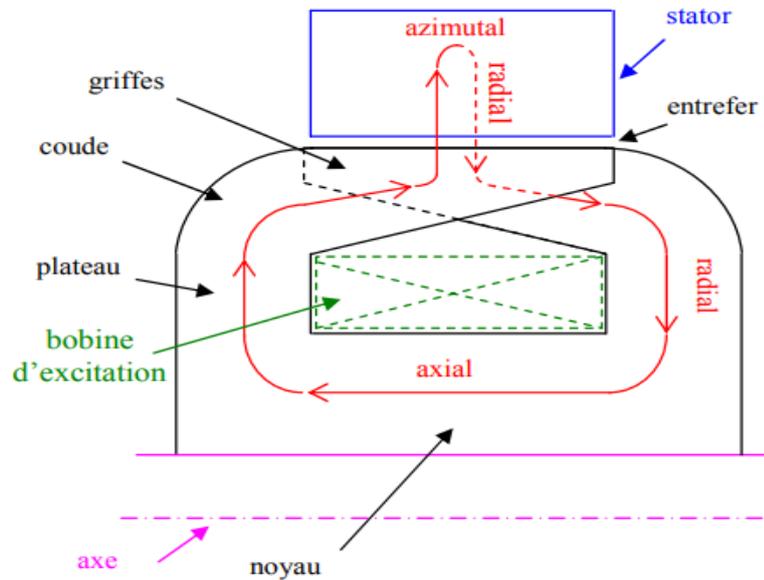


Figure 1. 11. Ligne moyenne du flux inducteur sur un pas polaire.

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'une seule bobine excitatrice.
- Il supporte des grandes vitesses.
- Une machine très robuste à la force de centrifuge.

1.6.2. Les inconvénients

- Le faible niveau du rendement de l'alternateur à griffes (environ 60%).
- Les pertes énormes notamment par échauffement, les pertes de courant de Foucault et courant de d'hystérésis.
- La pollution automobile.

Chapitre 1 : Généralités sur l'alternateur à griffe

1.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à l'alternateur à griffes utilisé comme générateur d'électricité dans les véhicules.

Tout d'abord, nous avons présenté l'évolution des dispositifs électriques dans une automobile, suivie par une présentation des différents éléments de l'alternateur (allant du stator au refroidissement). Par la suite, le principe de fonctionnement ainsi que le trajet de flux de la machine ont été décrits. Machine ont été décrits. Nous avons conclu ce chapitre en énonçant les avantages et les inconvénients des alternateurs.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

2.1. Introduction

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

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés, à la modélisation de l'alternateur à griffe, où on distingue 3 types : Analytique, semi-numérique et numérique. Cette dernière est basée sur les éléments finis tout en permettant d'améliorer les résultats obtenus par les modèles analytiques qui ne permettent que de faire des études de conception préliminaires.

La modélisation des moteurs électriques en trois dimensions a toujours été une tâche complexe. Aujourd'hui, l'outil de calcul **Flux-3D** à rendre ce type de modélisation de plus en plus facile.

2.2. Les différents types de modélisation

Les différents types de modélisation d'un système physiques sont les suivants :

2.2.1. Les modèles analytiques

C'est des systèmes développés avec équations liées entre elles par des grandeurs physiques (magnétique thermique géométrique). Parfois ils sont difficiles à mettre en place, car il faut décrire de façon analytique des phénomènes complexes (non-linéarité des matériaux, calcul de pertes...etc.). Malgré la rapidité des modèles analytiques ces derniers sont peu précis car il existe des phénomènes complexes qui sont difficiles à prendre en compte tel que le mouvement des parties mobiles.

2.2.2. Les modèles numériques

Cette méthode consiste à mettre en place un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène en se basant, généralement, sur la méthode des éléments finis. Cette modélisation est préférable car elle permet le calcul avec une bonne précision les performances de phénomène.

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes, on pourra citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume et la méthode des éléments finis (MEF). [4]

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

2.2.3. Les modèles semi-numériques

C'est un modèle qui est mis en équation et résolu de façon numérique facilitant ainsi le travail du concepteur. Cette méthode est la collaboration des deux méthodes précédentes.

2.3. Méthode d'élément finis

Du point de vue historique les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés en 1940 par Richard Courant, mais dans les années 1940-1960, les mécaniciens ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode. En 1970, Silvestre et son équipe de l'université MC Gill à Montréal ont contribué 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 en permettant de tenir compte de la géométrie de la machine, en plus d'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 permet d'avoir 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 la résolution d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques. [3]

2.3.1. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques.

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.

- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

– Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.

– Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème. [4]

2.4. Condition aux limites

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. Ces conditions aux limites décrivent les interactions entre le système à étudier et l'extérieur. Elles peuvent être de type :

- **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.

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = \phi$$

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

$$a \frac{\partial \phi}{\partial n} + b \phi = 0$$

a et **b** sont des constantes. [5]

2.5. Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz.

Ces équations traduisent sous forme locale différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) qui régissaient l'électromagnétisme, avant que Maxwell ne les réunisse sous forme d'équations

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

intégrales. Elles donnent ainsi un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit en physique par Faraday dans les années 1830.

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable.

Voici les quatre équations de Maxwell :

❖ Equation de MAXWELL-gauss :

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

❖ Equation de MAXWELL-ampère :

$$\mathit{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

❖ Equation de MAXWELL-faraday :

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

❖ Equation de Conservation du flux magnétique :

$$\mathit{div} \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Où \vec{D} ($C.m^{-2}$) et \vec{B} (T) sont respectivement l'induction électrique et magnétique.

\vec{E} ($V.m^{-1}$) et \vec{H} ($A.m^{-1}$) sont respectivement le champ électrique et magnétique.

\vec{J} ($A.m^{-2}$) et ρ ($C.m^{-3}$) sont respectivement la densité de courant de conduction et de charge électrique.

- Les équations du milieu

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

- La loi d'ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Où μ , ε et σ représentent respectivement la perméabilité, la permittivité et la conductivité du milieu.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

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.

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. [6]

2.6. L'approximation des régimes quasi stationnaire

Ces équations lient les différentes grandeurs qui caractérisent le fonctionnement d'un système électromagnétique. 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 :

$$\mathit{div} \vec{D} = \rho \quad (2.8)$$

$$\mathit{div} \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

$$\mathit{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\mathit{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.11)$$

2.7. Modélisation de l'alternateur à griffes

Comme il a été décrit avant, il existe plusieurs méthodes pour modéliser le circuit magnétique de l'alternateur à griffes. Compte tenu de notre objectif qui est l'optimisation et le dimensionnement, nous pensons que la modélisation à base de réseaux de ré reluctances est la mieux adaptée pour modéliser l'alternateur à griffes. En effet, cette méthode permet d'obtenir une bonne précision de calcul à condition de bien construire la topologie du réseau et de bien estimer les ré reluctances. Par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être beaucoup plus rapide à calculer qu'une méthode par éléments finis.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

Enfin, cette méthode apporte un plus en ce qui concerne la sensibilité du modèle à la géométrie. Cette sensibilité est due aux calculs analytiques des ré reluctances et permet de relier explicitement les paramètres géométriques de construction aux flux magnétiques et donc aux performances de l'alternateur. Cette méthode est faite en 3D avec un logiciel de calcul par élément fini en 3D logiciel FLUX 3D. [2]

- **Formulation en potentiel magnétique scalaire**

A vide, Le courant 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 créé par l'induit ne peut pas s'ajouter au flux magnétique créé par l'inducteur à cause de la non-linéarité des matériaux magnétique (saturation). En vue de modéliser le problème magnétostatique contenant le courant, le champ magnétique doit s'exprimer sous la forme suivante :

Dans ce cas le champ magnétique \vec{H} est décomposé en deux composantes. [7]

$$\vec{H} = \vec{H}_s + \vec{H}_m \quad (2.12)$$

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, $\vec{J}_s = \mathbf{0}$.

On aura selon l'équation de maxwell (2.11)

$$\text{rot}(\vec{H}) = \mathbf{0} \quad (2.13)$$

Selon (2.12) :

$$\text{rot}(\vec{H}_m) = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

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

$$\vec{H} = -\mathit{grad}(\emptyset m) \quad (2.15)$$

D'après l'équation de Maxwell (2.4) et l'équation (2.5)

$$\mathit{div}(\vec{B}) = \mathit{div}(\mu(H) * \vec{H}) = -\mathit{div}(\mu(H) * \mathit{grad}(\emptyset m)) = 0 \quad (2.16)$$

Donc :

$$\mathit{div}(\mu(H) * \mathit{grad}(\emptyset m)) = 0 \quad (2.17)$$

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

- **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 :

$$\vec{J}_s = \overrightarrow{\mathit{rot}}(\vec{H}_s) \quad (2.18)$$

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

$$\overrightarrow{\mathit{rot}}(\vec{H}_m) = 0 \quad (2.19)$$

Ceci implique qu'il existe un potentiel scalaire magnétique $\emptyset m$ tel que :

$$\vec{H}_m = -\overrightarrow{\mathit{grad}}(\emptyset m) \quad (2.20)$$

Selon l'équation (2.12) l'équation (2.19) devient :

$$\overrightarrow{\mathit{rot}}(\vec{H} - \vec{H}_s) = 0 \quad (2.21)$$

Et donc, on aura, selon (2.20)

$$\vec{H} = \vec{H}_s - \overrightarrow{\mathit{grad}}(\emptyset m) \quad (2.22)$$

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

En substituant les équations (2.5) et (2.22) dans l'équation de maxwell (2.4)

On obtient :

$$\text{div}(\mu(\vec{H}_s - \overrightarrow{\text{grad}}(U_m))) = 0 \quad (2.23)$$

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

2.8. Définition de logiciel flux 3D

Flux2/3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) destiné en premier lieu à l'électrotechnique basé sur la méthode des éléments finis, spécialisé dans la simulation des dispositifs électromagnétiques. Il est le fruit de 39 années de collaboration entre l'équipe MAGE du G2ELab et la PME Grenobloise CEDRAT et est une référence mondiale dans son domaine. En 2016, la société Altair Engineering, un des leaders mondiaux des outils de simulation pour l'ingénierie, a fait l'acquisition de la société CEDRAT et de la suite logiciel Flux. Aujourd'hui, l'équipe MAGE continue à travailler activement au développement de nouvelles méthodes de modélisation électromagnétique avec ALTAIR. L'équipe bénéficie d'un rayonnement accru par la diffusion de ses recherches vers un nombre d'utilisateurs potentiels encore plus important. []

2.8.1. La modélisation par FLUX-3D

En général la modélisation d'un dispositif dans **Flux-3D** passe par 4 étapes essentielles :

- La Construction géométrique.
- La création des matériaux physiques.
- Le maillage.
- La résolution et l'exploitation des résultats.

2.8.2. Construction géométrique

La propriété de symétrie géométrique de logiciel **FLUX-3D** nous permet de ne représenter qu'un sixième de la géométrie. La conception de cette dernière consiste à créer des paramètres géométriques qui seront utilisés pour la création des points, lignes, faces et volumes.

On partage ce travail à 5 parties :

- Rotor.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

- Stator.
- L'assemblage de rotor et stator.
- La boîte infinie.
- Le cylindre de glissement.

▪ On commence par la construction du rotor, c'est la partie la plus complexe dans la conception géométrique en raison de sa forme atypique (présence des griffes), elle était faite avec beaucoup de repères et transformations, **la figure 2.1** représente les différents paramètres de sa géométrie.

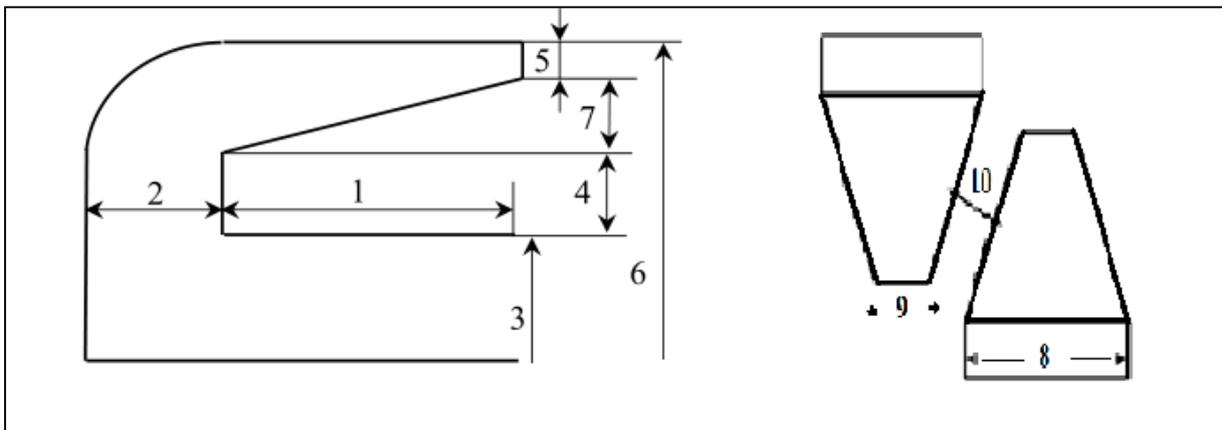


Figure 2. 1. Paramètres géométriques du rotor.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

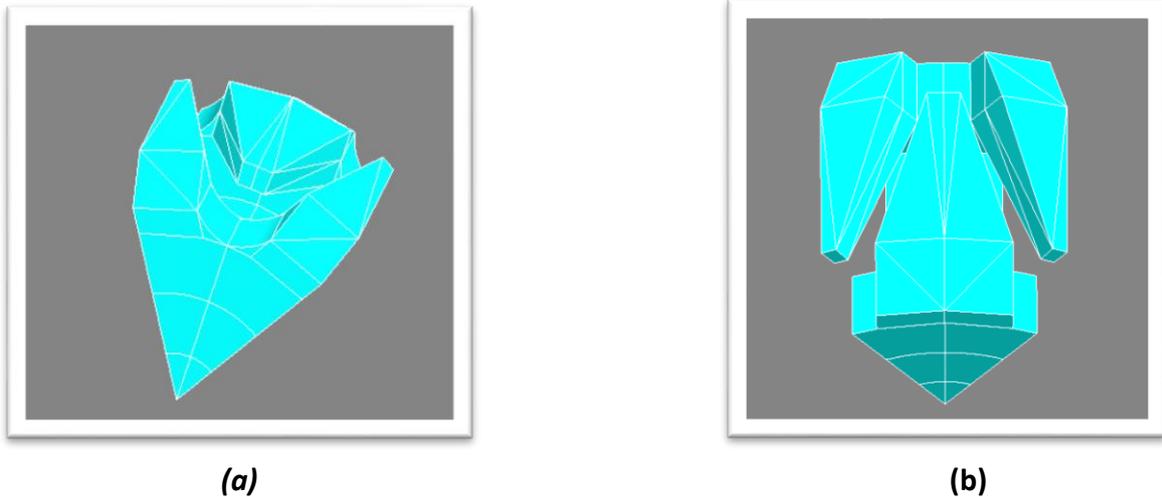


Figure 2. 2 (a) et (b) la géométrie du rotor sur FLUX-3D.

Les paramètres géométriques du rotor sont indiqués dans le **Tableau 1** suivant :

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

Tableau 2. 1. Les paramètres géométriques du rotor.

- La même procédure est suivie pour le dessin du stator, la **figure 2.3** montre les différents paramètres de sa géométrie.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

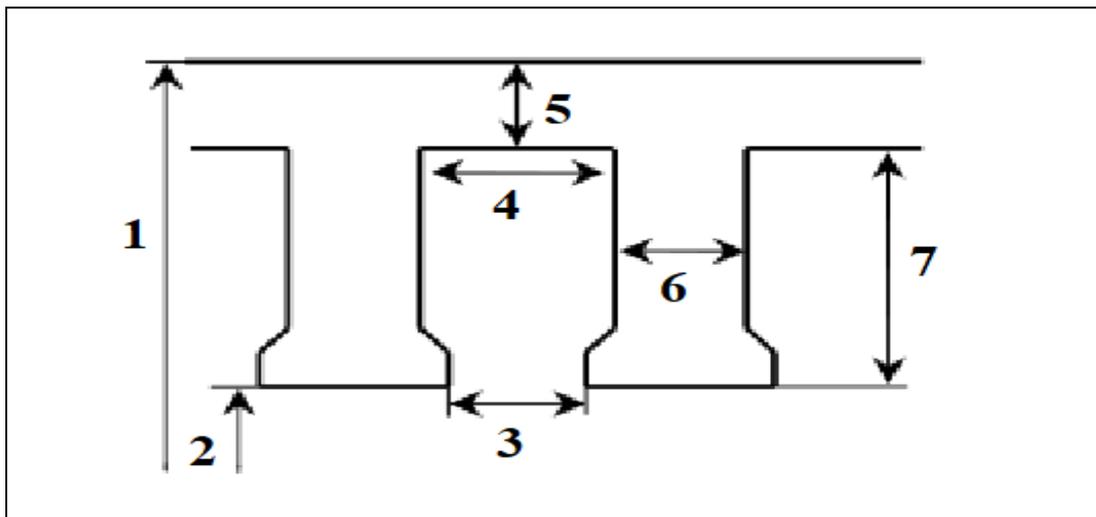


Figure 2. 3. Paramètres géométriques du stator.

La **figure 2.4** illustre la géométrie du stator sur FLUX-3D.

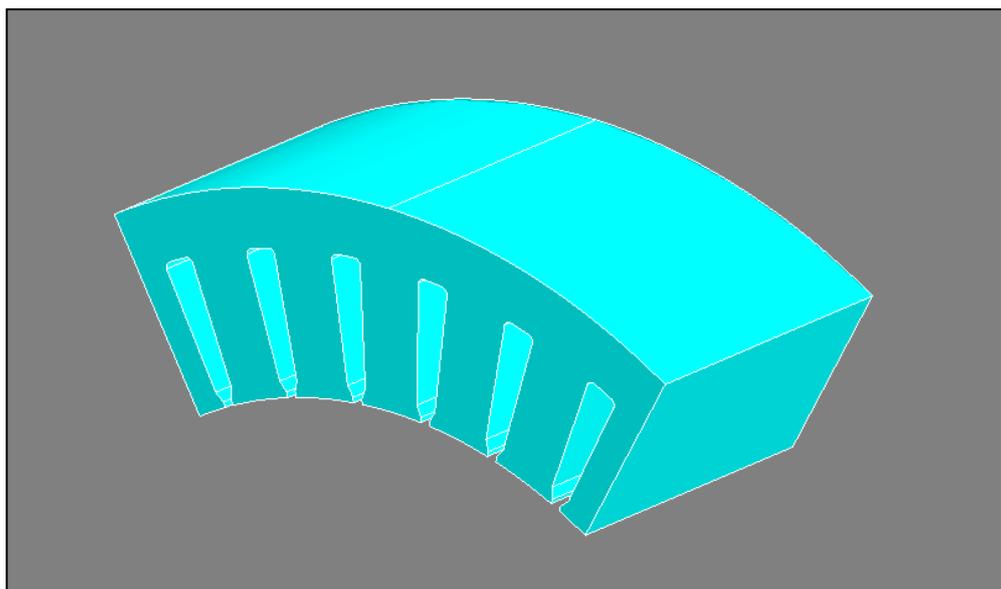


Figure 2. 4 la géométrie du stator sur FLUX-3D

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

Le **Tableau 2.2** englobe les désignations des paramètres et leurs valeurs :

Référence	Paramètre	Valeur
1	Rayon extérieur du stator	63.5 mm
2	Rayon intérieur du stator	44.3 mm
3	Ouverture d'encoche	2 mm
4	Largeur du fond d'encoche	4.8 mm
5	Hauteur de la culasse	5.5 mm
6	Largeur d'une dent	2.86mm
7	Hauteur d'une dent	13.7 mm
8	Entrefer	0.65mm

Tableau 2. 2 les désignations des paramètres et leurs valeurs.

- Ensuite, on passe à l'assemblage des 2 dessins dans un seul fichier qui va nous donner le sixième de l'alternateur à griffe illustré sur la **figure 2.5**.

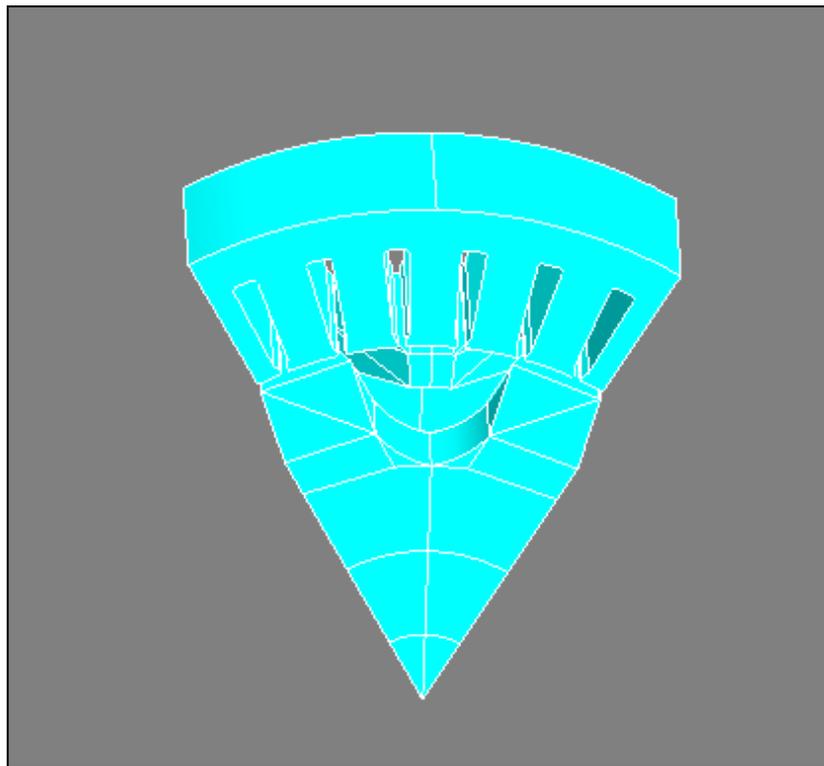


Figure 2. 5 le sixième de l'alternateur.

- L'étape suivante c'est la création de la boîte infinie qui détermine les conditions aux limites de notre modèle puis la périodicité et la symétrie

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

- A la fin, et pour prendre en compte la rotation du rotor, il faut définir un cylindre de glissement.

2.8.3. La partie physique

a) Création des régions volumiques

Cette étape nous permet de décomposer notre modèle à des régions volumiques ainsi de spécifier les caractéristiques physiques (type de région, matériau affecté) et même leur ensemble mécanique qui définit la partie mobile et la partie fixe de la machine et aussi son apparence (couleur et nom). La **figure 2.6** illustre les régions volumiques de l'alternateur à griffes.

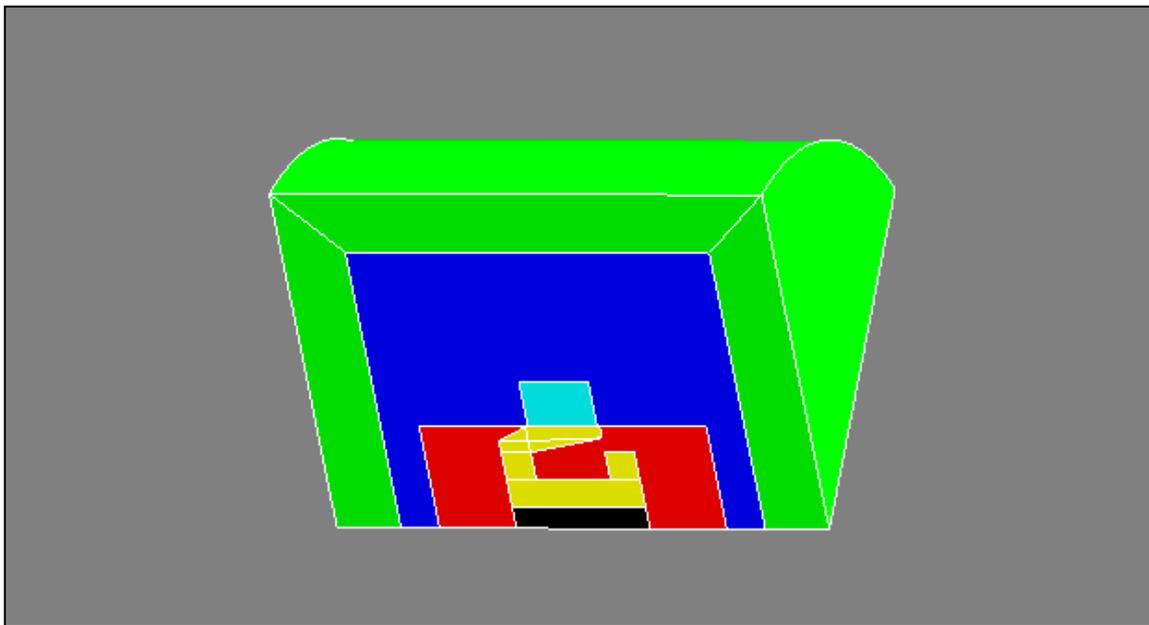


Figure 2.6 les régions volumiques de l'alternateur.

b) Création des matériaux

Nous avons attribué à la région volumique du stator le matériau (M270-35A et M800-50A) et à la région volumique de rotor, on a affecté le matériau AFK-502, 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

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

matériau dans les trois directions de circulation du flux magnétique dans les tôles statoriques.
[1]

Les **figures 2.7** et **2.8** représentent l'ensemble des caractéristiques magnétiques des matériaux utilisés.

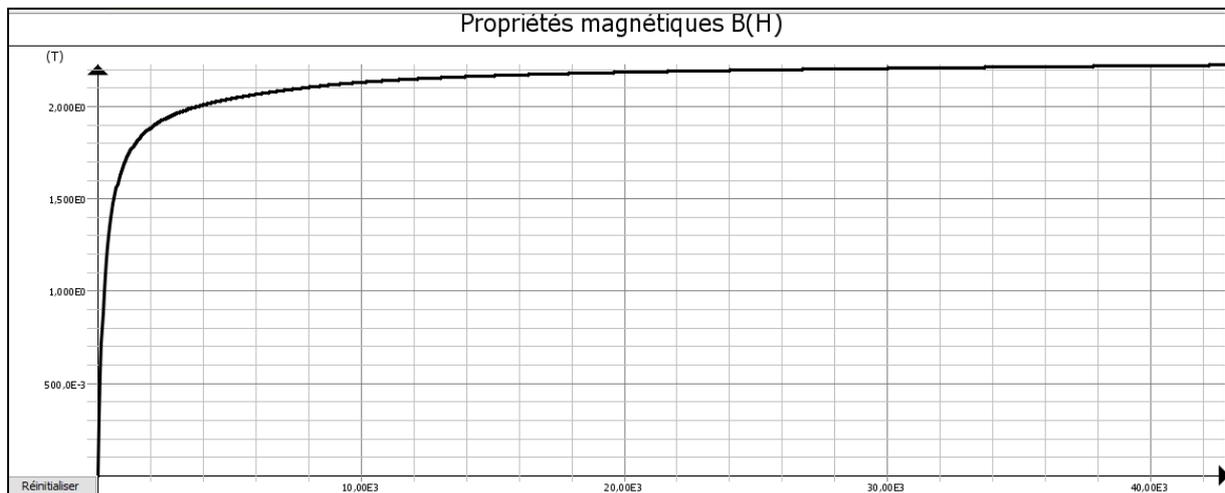


Figure 2. 6. Courbe d'aimantation de matériaux magnétique IHPHY_AFK502.

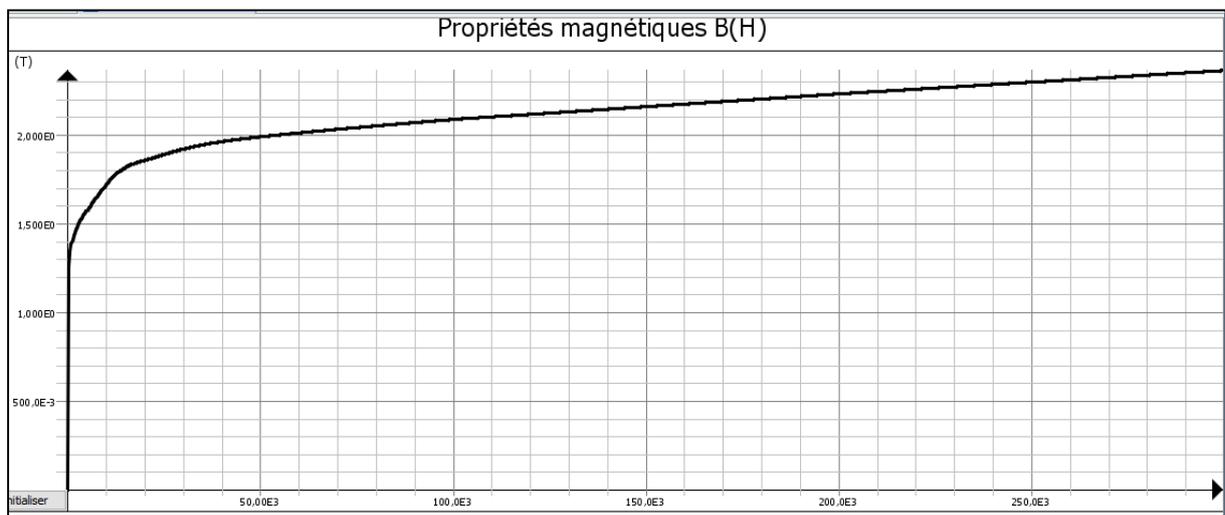


Figure 2. 7. Courbe d'aimantation de matériaux magnétique FLU_M270-35A.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

Le **Tableau 2.2** englobe les caractéristiques physiques, les couleurs et l'ensemble mécanique de chaque région volumique.

Couleur	Nom	Matériaux utilisé	Ensemble mécanique
Turquoise	Stator	Flux M270-35A	Fixe
Bleu	Air statorique	Air	Fixe
Vert	Boite infinie	Air	Fixe
Rouge	Cylindre de glissement	air	Tournant
Jaune	Rotor	IMPHY_AFK502	Tournant
Noire	arbre	inactif	tournant

Tableau 2. 3. Les caractéristiques physiques, les couleurs et l'ensemble mécanique des régions volumiques de l'alternateur à griffes.

Chapitre 2 : Modélisation de l'alternateur à griffe

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation de l'alternateur à griffes. En premier lieu, nous avons présentées les outils mathématiques de bases pour la résolution par éléments finis dont la formulation en potentiel scalaire du problème. En second lieu, la conception géométrique et physique de l'alternateur a été détaillée. Le prochain chapitre sera dédié au maillage et la résolution du modèle.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.1. Introduction

Ce chapitre consiste en la résolution du modèle numérique élaboré dans le chapitre précédent. La première étape de la résolution est le maillage de la géométrie qui doit être de bonne qualité. La qualité du maillage agit d'une manière directe sur la précision de la solution. La résolution du modèle en magnéto transitoire nécessite un couplage avec le circuit électrique pour cette raison les enroulements rotorique et statorique doivent être insérer au modèle initial.

3.2. Le maillage

3.2.1. Le maillage dans le FLUX-3D

Le maillage est la première étape de résolution d'un problème électromagnétique (l'alternateur à griffes dans notre cas), afin d'obtenir un bon compromis « précision/temps de calcul ».

Le maillage doit s'effectuer en deux étapes

1. Choisir le type du mailleur (un outil de découpage du domaine en éléments finis).
2. Amélioration de la qualité du maillage.

❖ On distingue 5 types de mailleur disponible dans le **FLUX-3D** :

- Mailleur automatique : découpage en triangle (le plus utilisé).
- Mailleur réglé : découpage en rectangle.
- Mailleur mixte : découpage en triangle et en rectangle.
- Mailleur relié : (pour les faces côtières) ce mailleur ne peut être utilisé que sur des surfaces seulement, il nous permet de copier le maillage d'une face à une autre.
- Mailleur par déplacement ou par extrusion : On impose à une ligne maillée de se « déplacer » le long d'un chemin maillé en suivant un mouvement simple (translation ou rotation). On génère ainsi un maillage de quadrangles. La même méthode est employée pour mailler des volumes : on « déplace » une surface maillée

3.2.2. Le maillage de l'alternateur a griffes

Nous avons utilisé pour le découpage de notre alternateur à griffes en éléments finis, deux types de mailleur :

1. Mailleur automatique pour le découpage en triangle.
2. Mailleur relié qui doit être affecté à toutes les faces côtières.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

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.

Après plusieurs tentatives on a réussi à obtenir les résultats représentés dans **Tableau 3.1**.

Ordre	Nombre de Nœuds	Nombre d'éléments linéiques	Nombre d'éléments surfaciques	Nombre d'éléments volumiques
1er	270693	5666	160238	1525385

Tableau 3. 1. Les résultats de maillage.

La **figure 3.1** montre le maillage sur le FLUX-3D.

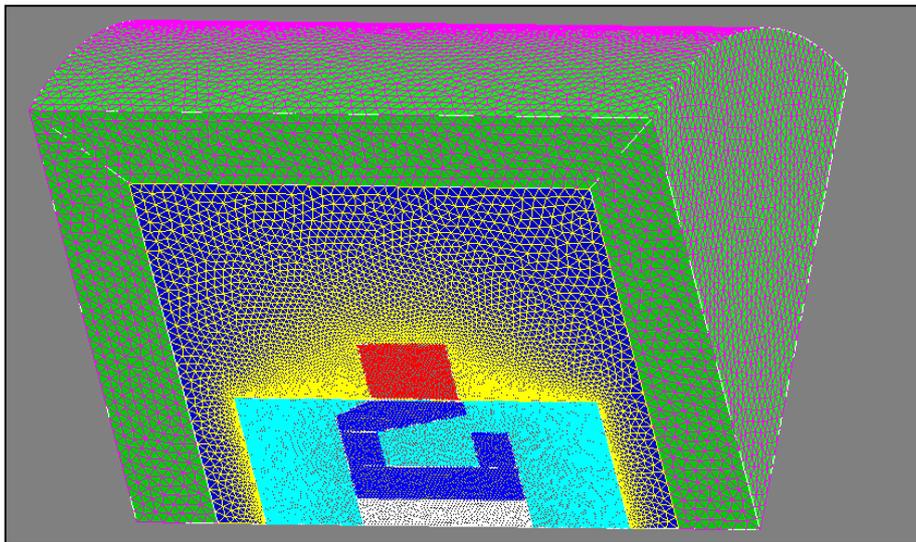


Figure 3. 1. Le maillage obtenu sur le FLUX-3D.

La qualité de maillage est illustrée dans **la figure 3.2**.

```
Elements volumiques :  
Nombre d'elements non evalues      : 0 %  
Nombre d'elements d'excellente qualite : 61.81 %  
Nombre d'elements de bonne qualite   : 28.88 %  
Nombre d'elements de qualite moyenne  : 7.91 %  
Nombre d'elements de qualite mediocre : 1.41 %
```

Figure 3. 2. La qualité de maillage.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.3. Le bobinage de l'alternateur a griffes

3.3.1. Le bobinage rotorique

La bobine d'excitation du rotor dans **FLUX-3D** fait partie des éléments non maillés. De ce fait, elle doit être entièrement dessinée (**figure 3.3**).

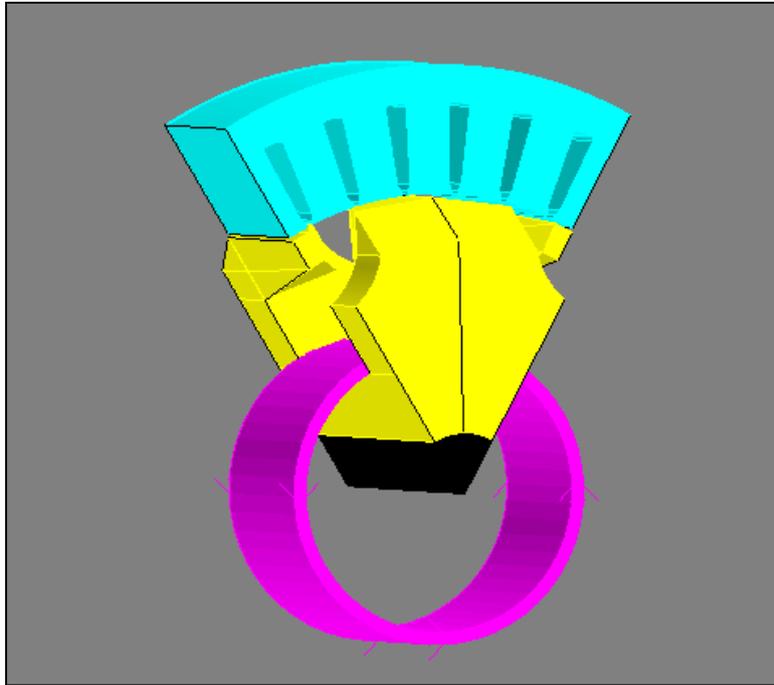


Figure 3. 3. La bobine d'excitation du rotor.

Les paramètres géométriques et électriques sont représentés respectivement sur le **Tableau 3.3** et **Tableau 4.3**.

Les paramètres	Les valeurs
Le type	Bobine circulaire
La longueur	29mm
La largeur	2mm
Le rayon	Le rayon de noyau

Tableau 3. 2. Les paramètres géométriques.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

Les paramètres	Les valeurs
le nombre de spires	800 spires
Courant d'excitation	2A (variable)
La résistivité	$17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$

Tableau 3. 3. Les paramètres électriques.

3.3.1. Le bobinage statorique

Le stator de notre alternateur comporte 36 encoches :

- Calcul du nombre d'encoche par pôle et par phase (n_e).

Équation 3.1 permet le calcul du nombre d'encoches par pôle et par phase.

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

Avec :

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

P : le nombre de pair de pôle ($p=6$).

M : le nombre de phase ($m=3$).

- Calcul du pas diamétral

Le pas diamétral T d'une bobine est calculé par l'**Équation 3.2**.

$$T = N_e / (p \cdot 2) \quad (3.2)$$

$$T = 3.$$

Le stator de l'alternateur à griffe comporte trois enroulements déphasés de 120° qui doivent créer un système triphasé alternatif couplé en étoile.

Sur **FLUX-3D**, les 3 enroulements sont créés point par point, on choisit pour chaque phase un bobinage composé avec un chemin ouvert de la circulation de la bobine entre les encoches. Afin de réaliser une phase on doit créer un repère pour imposer où va commencer le premier point de cette phase. Ensuite, on détermine le chemin de l'enroulement en précisant les coordonnées de chaque point du trajet jusqu'à avoir une bobine complète, avec un nombre de tours égal à 11 spires. Cette opération doit être répétée avec les deux autres enroulements avec un décalage de trois encoches.

La **figure 3.4** ci-dessous illustre un sixième de chemin des 3 enroulements statoriques.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

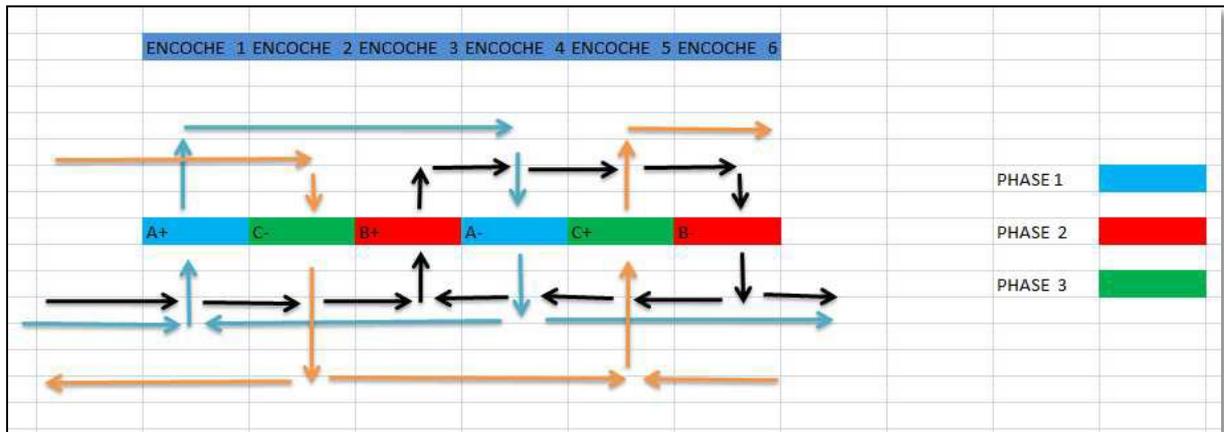


Figure 3. 4. Un sixième de chemin des enroulements statoriques.

La figure 3.5 montre les enroulements dans FLUX-3D.

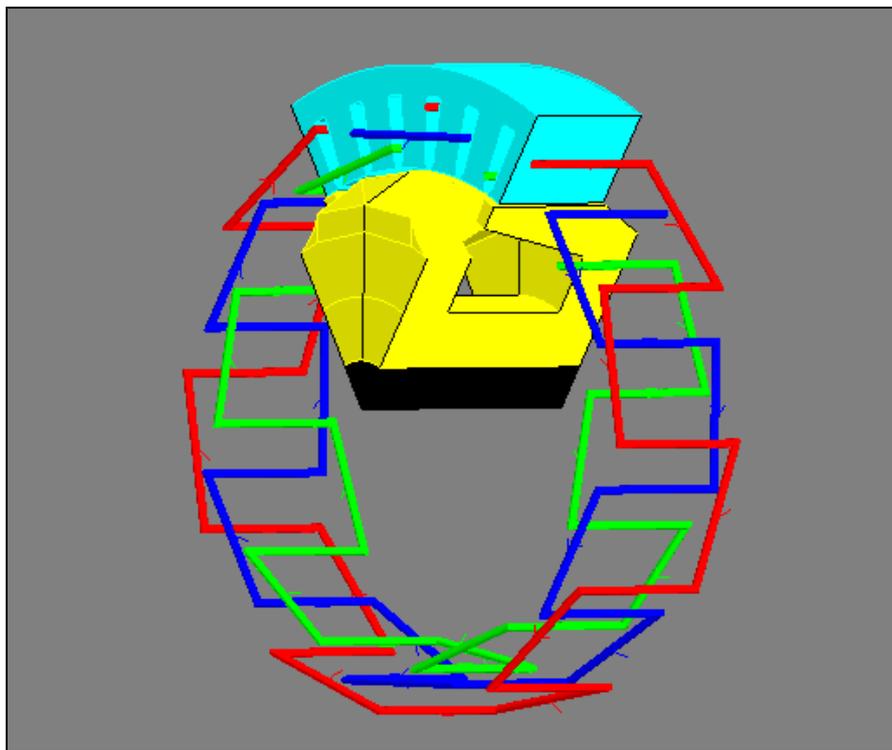


Figure 3. 5. Les enroulements dans FLUX-3D.

3.4. Couplage Circuit électrique

Les bobines du stator sont reliées au circuit électrique en étoile (figure 3.6). Pour un couplage magnéto-électrique, on relie les phases représentées par les bobines B1, B2 et B3 à des charges résistives. Dans le but d'avoir un système triphasé alternatif à la sortie de la l'alternateur à griffes et résoudre le modèle en magnéto-transitoire.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

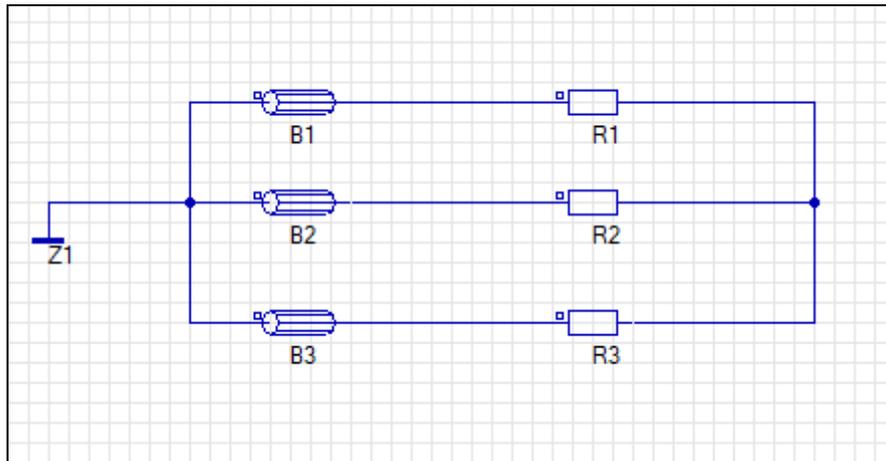


Figure 3. 6. Le couplage de circuit électrique (sortie alternative sans redresseur).

3.5. Résolution en magnéto-transitoire

3.5.1 Scénario de résolution

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

3.5.2 Caractéristique à vide de l'alternateur (courbe de saturation)

Rappelons que l'enroulement inducteur de l'alternateur est alimenté en source de courant continu.

A vide, et à vitesse de rotation constante de 1800 tr/min, on augmente progressivement le courant d'excitation (de 0 à 7A). Pour chaque valeur du courant d'excitation le modèle est résolu, on note à la fin de chaque simulation la valeur de la tension entre une phase et le neutre qui vaut la f.e.m à vide.

La **figure 3.7** présente la caractéristique à vide de l'alternateur qui est dite aussi la courbe de saturation.

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

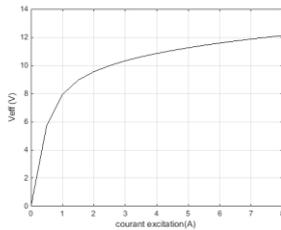


Figure 3. 7. Caractéristique à vide de l'alternateur.

On constate que la f.e.m augmente d'abord proportionnellement à l'excitation (Zone linéaire). Cependant au fur et à mesure que le flux augmente, le circuit magnétique commence à se saturer, et la tension croît de moins en moins pour une même augmentation de l'excitation (zone de saturation).

Cette caractéristique ($E_v=f(I_{exc})$) n'est en fait que la traduction de la caractéristique du circuit magnétique de la machine elle reste utilisable quelque soit le fonctionnement de la machine (moteur ou alternateur et à vide ou en charge).

Chapitre 3 : Résolution du modèle numérique

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé, en premier lieu, au maillage du modèle numérique élaboré dans le chapitre précédent. Cette étape nous a pris beaucoup de temps car il fallait trouver la bonne discrétisation ponctuelle qui assure un bon compromis entre la précision de la solution et le temps de calcul. En second lieu, nous avons vu la résolution du modèle en magnéto-transitoire, dans le but de tracer la caractéristique à vide de notre alternateur. La résolution du modèle en charge fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

4.1. Introduction

Le chapitre précédent a été consacré au maillage (qui correspond à la première étape de la résolution) et son importance dans la précision de la solution, où on a également abordé les caractéristiques à vide de notre alternateur en magnéto-transitoire.

Dans ce chapitre nous procédons en premier lieu, à la mesure de la f.e.m à vide pour trois vitesses différentes puis à la résolution en magnéto-transitoire avec deux types de simulation à vide et en charge pour visualiser l'évolution de l'induction magnétique en fonction du temps par la suite, afin de suivre la saturation dans le stator.

Des résolutions ont été effectuées aussi en fonction des points de fonctionnement dans le but d'évaluer le comportement de notre machine, ainsi que d'exploiter les résultats obtenus.

4.2. Résolution à vide et points de fonctionnement

L'alternateur automobile fonctionne sur une large plage de vitesse. La première exigence lorsque les équipementiers décident d'installer un alternateur dans un véhicule est que celui-ci fournisse une puissance suffisante en deux points de fonctionnement importants à savoir.

- Le premier point de fonctionnement correspond à la vitesse au ralenti :
Cette vitesse correspond au ralenti du moteur thermique. Pour l'alternateur, ce ralenti est équivalent à une vitesse de 1800tr/min.
- Le deuxième point de fonctionnement correspond à la vitesse de croisière :
Ce point de fonctionnement correspond aux hautes vitesses du moteur thermique (autour de 18000tr/min). Pour l'alternateur une vitesse de 6000tr/min est choisie comme vitesse de croisière.

Le comportement de l'alternateur est certainement différent entre ces deux points de fonctionnement. Pour cette raison, un autre point a été choisi. Il correspond à une vitesse de 3000tr/min.

La f.e.m à vide dépend essentiellement de la vitesse de rotation de l'alternateur. Cependant, il est important de suivre son évolution en fonction de la vitesse.

La simulation est faite en magnétique évolutif avec la prise en compte du mouvement du rotor, nous avons utilisé le circuit indiqué dans la **figure 4.1**. Pour simuler le fonctionnement

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

à vide nous avons choisi, comme charge, des résistances pures de $10^{11} \Omega$. Le courant d'excitation a été fixé à 5A.

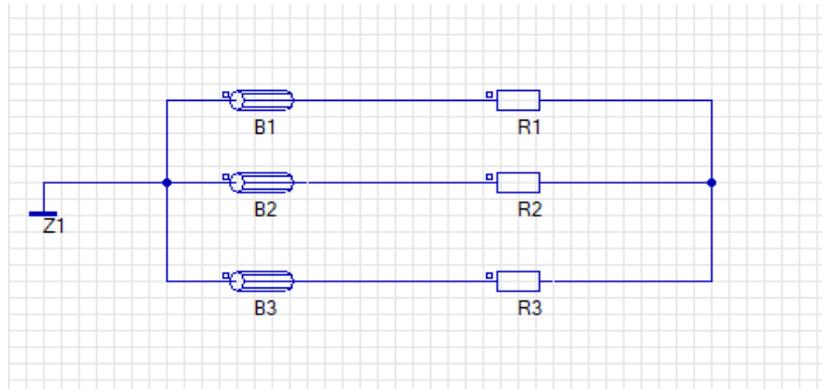


Figure 4. 1. Circuit électrique.

Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 représentent la f.e.m à la sortie de l'alternateur pour différentes vitesses (1800 tr/min, 3000 tr/min et 6000 tr/min respectivement).

- A 1800 tr/min

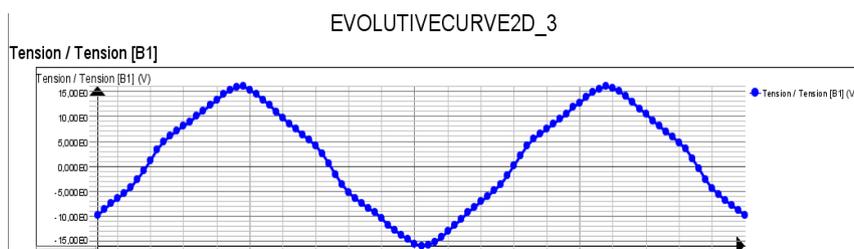


Figure 4. 2. La f.e.m à vide à 1800 tr/min.

- A 3000 tr/min

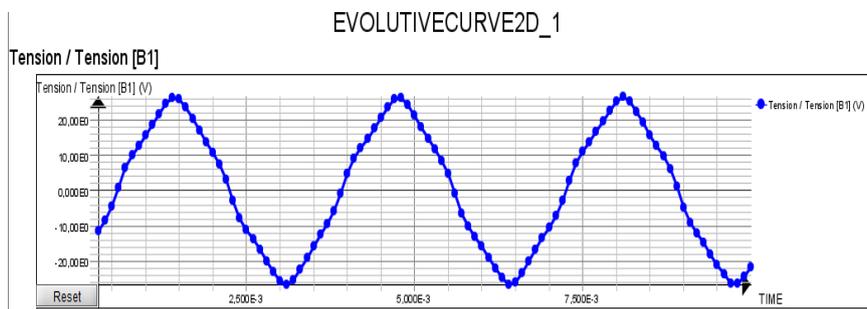


Figure 4. 3. La f.e.m à vide à 3000 tr/min.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

- A 6000 tr/min

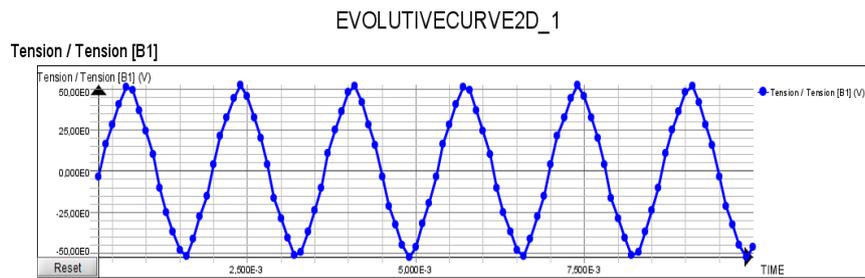


Figure 4. 4. La f.e.m à vide à 6000 tr/min.

On peut voir qu'à la vitesse 6000tr/min la force électromotrice à vide atteint 50v.

4.3. Résolution du modèle en charge

Les simulations ont été effectuées pour les 2 points de fonctionnement 1800 tr/min et 6000 tr/min, avec une charge de 5Ω . Le courant d'excitation est fixé à 5A. Nous allons voir dans ce qui va suivre, le dégradé des inductions magnétiques qui sera, par la suite, comparé au dégradé des inductions à vide. Les figures suivantes représentent les inductions magnétiques.

- A 1800 tr/min

Les figures 4.5 et 4.6 représentent le dégradé des inductions magnétique en charge et à vide, respectivement.

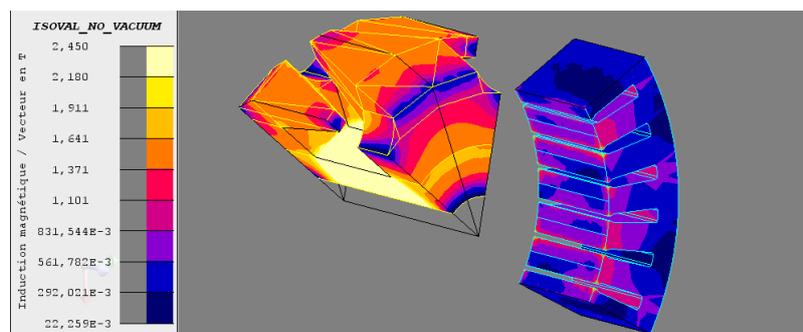


Figure 4. 5. Le dégradé de l'induction magnétique en charge ($R=5\Omega$) à 1800 tr/mn.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

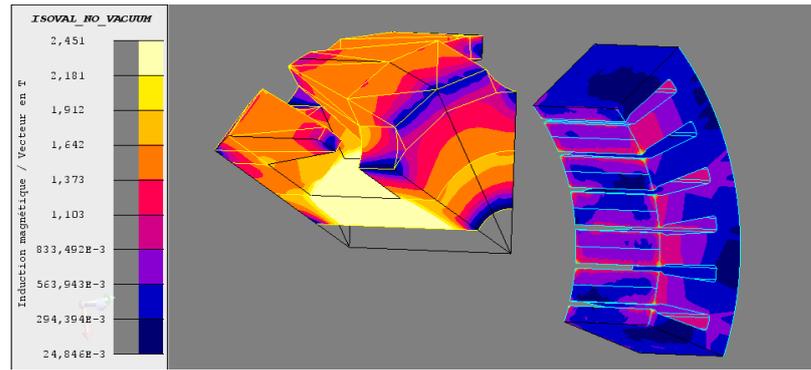


Figure 4. 6. Le dégradé de l'induction magnétique à vide à 1800 tr/mn.

Au stator, et plus exactement au niveau des dents statoriques, l'induction magnétique à vide atteint 0.9T. En charge, et dans les mêmes régions, l'induction est autour de 0.8T.

On constate que, pour les mêmes régions, l'induction magnétique à vide est plus importante qu'en en charge.

- **A 6000 tr/min**

Les figures 4.7 et 4.8 représentent le dégradé des inductions magnétique en charge et à vide, respectivement.

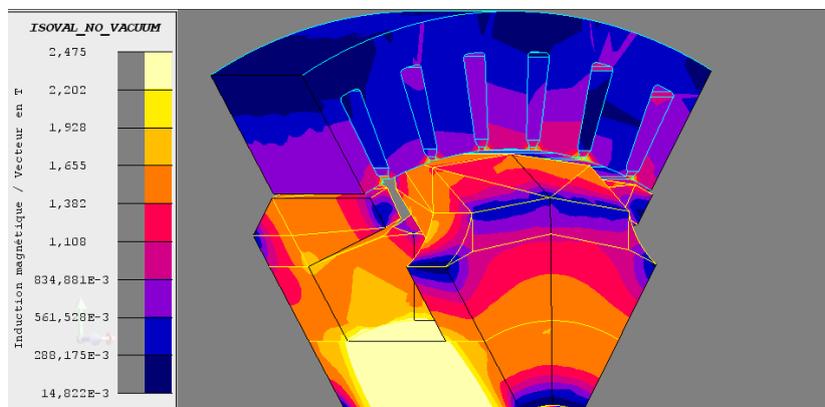


Figure 4. 7. Le dégradé de l'induction magnétique en charge (R=5 Ω) à 6000 tr/mn.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

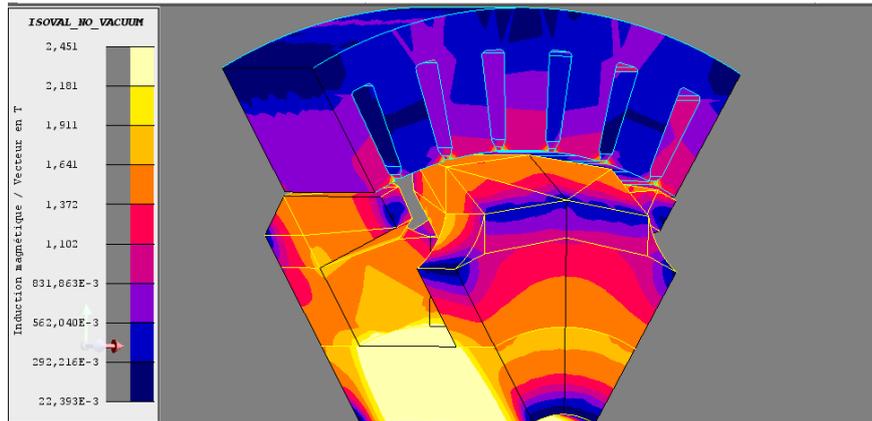


Figure 4. 8. Le dégradé de l'induction magnétique à vide à 6000 tr/mn.

A cette vitesse de rotation, l'induction magnétique au niveau du stator est plus importante.

A vide, l'induction atteint 1.1T au niveau des dents statoriques. Elle est à 0.83T au niveau de la culasse.

En charge, l'induction atteint 1.1T au niveau de la dent mais sur une zone moins réduite qu'à vide. Certaines parties de la dent, qui étaient à 1.1T à vide, ont passé à 0.8T. On constate, également que, pour les mêmes régions, l'induction magnétique à vide est plus importante qu'en en charge.

- **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus illustrés par les figures précédentes montrent que pour les 4 simulations, le noyau du rotor atteint la valeur maximale de l'induction environ 2,45T représentée par la couleur jaune, cette dernière exprime que la machine est en état de saturation. En outre, l'induction des griffes du rotor varie entre 0.5T (au bout de bec et au coude) et 1.6T.

Cependant, l'induction magnétique du stator est faible notamment au niveau de la culasse lors des 4 simulations. En revanche, dans les pieds des dents statoriques, on observe que l'induction magnétique est plus importante avec une valeur de (1.1T) lors des 4 simulations avec un espace plus large dans les 2 simulations à vide.

Le fait que l'induction magnétique à vide est plus importante à vide qu'en charge est justifié par la présence des courants induits. En effet, en charge, le courant au niveau des phases statoriques engendre un flux qui, à son tour, donnent naissance à un courant appelé courant induit. Ce phénomène est appelé la réaction magnétique de l'induit.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

Ces résultats nous ont incité à visualiser l'évolution de l'induction radiale au niveau du pied de la dent statorique à vide et en charge.

4.4. L'évolution de l'induction magnétique radiale

Selon la courbe de la tension à vide obtenue précédemment, nous constatons que l'induction magnétique dans une dent est supposée nulle lorsque la dent est placée dans l'espace inter-polaire, et est maximale lorsqu'elle est totalement en face du pôle (griffe).

Nous avons placé 3 supports ponctuels (PT1, PT2 et PT3) sur le long latéral de la dent du milieu qui se trouve totalement au regard d'une griffe du rotor. Le point PT1 est face à la base de la griffe alors que PT2 est face au bout de la griffe.

Le but de cette partie de travail est de visualiser, à vide et en charge, l'évolution de l'induction magnétique radiale en fonction du temps (choisi sur 2 périodes). Les simulations ont été effectuées, seulement, à une vitesse de 1800tr/min. Le courant d'excitation est toujours fixé à 5A.

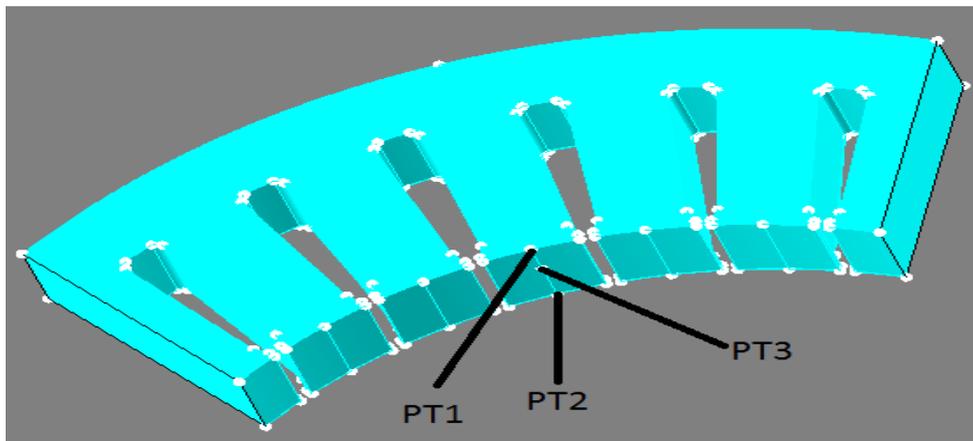


Figure 4. 9. Supports ponctuels.

4.4.1. L'induction magnétique radiale à vide

Les figures suivantes représentent, respectivement, les inductions magnétiques radiales à vide au PT1, PT2 et PT3.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

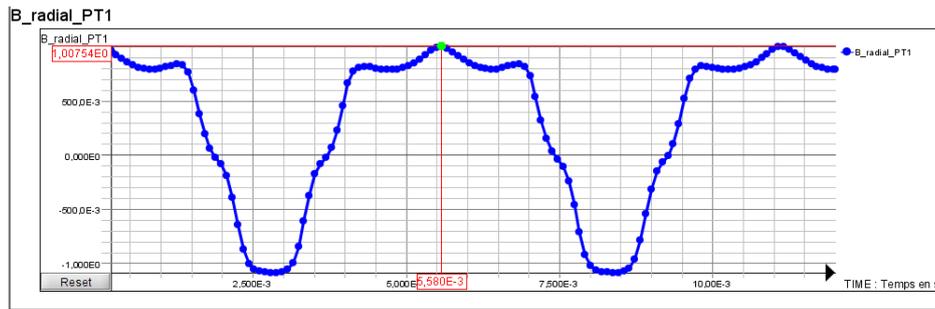


Figure 4. 10. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT1.

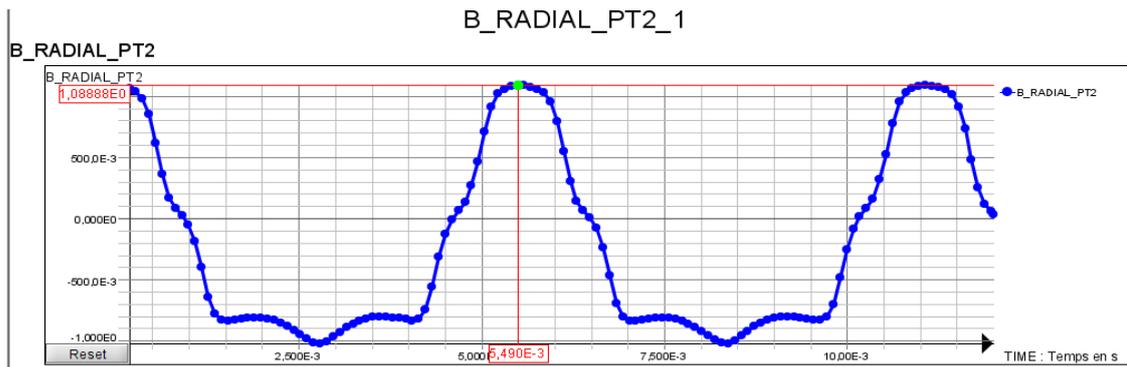


Figure 4. 11. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT2.

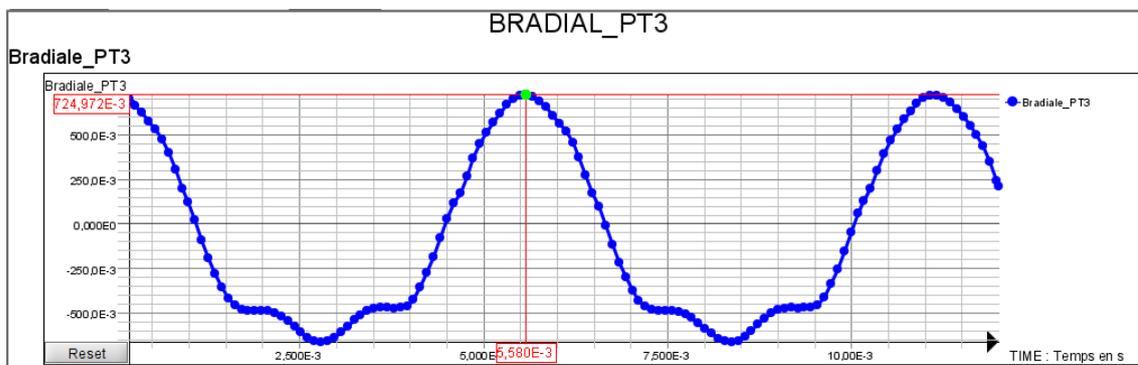


Figure 4. 12. L'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn au PT3.

A $t=5.5$ ms, Au point PT1 l'induction radiale atteint 1T. Au point PT2 est à peu près au même niveau, elle égale à 1.08T. Rappelons que ces deux points correspondent aux deux extrémités latérales du pied de la dent. Au niveau du point 3 (PT3) l'induction est à 0.724T.

On a rassemblé les courbes des trois inductions magnétiques à vide précédentes dans le même graphe, comme montré sur la **figure 4.13**.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

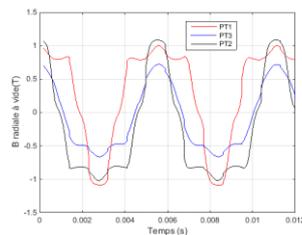


Figure 4. 13. Evolution de l'induction magnétique radiale à vide a 1800 tours/mn.

4.4.2. L'induction magnétique radiale en charge

La simulation a été effectuée pour une charge purement résistive égale à 5Ω . Les figures suivantes représentent respectivement les inductions magnétiques radiales en charge au PT1, PT2 et PT3.

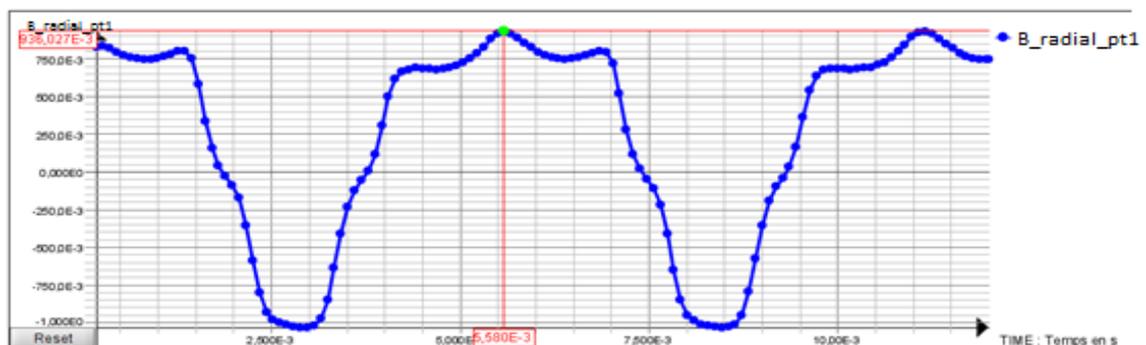


Figure 4. 14. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5\Omega$) a 1800 tours/mn au PT1.

En ce point (PT1) la valeur de l'induction atteint 0.936T alors qu'elle était égale à 1T à vide.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

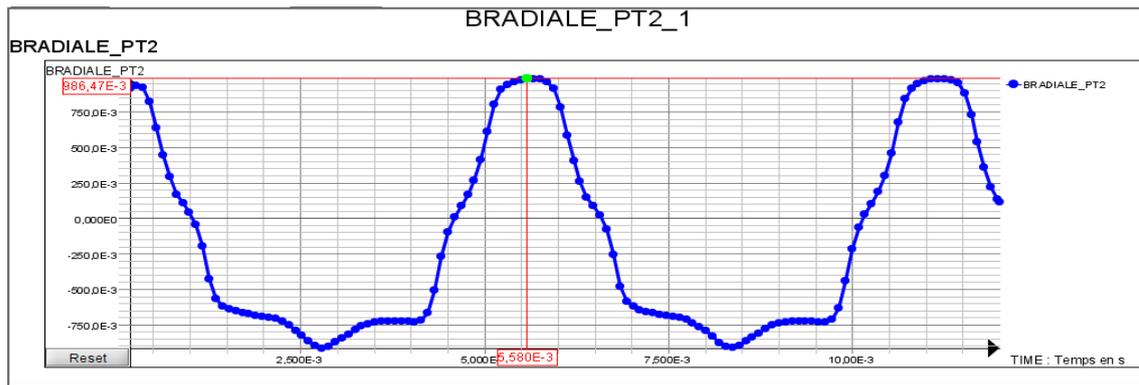


Figure 4. 15. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5\Omega$) a 1800 tours/mn au PT2.

En ce point ponctuel (PT2) la valeur de l'induction atteint 0.986T alors qu'elle était égale à 1.08T à vide.

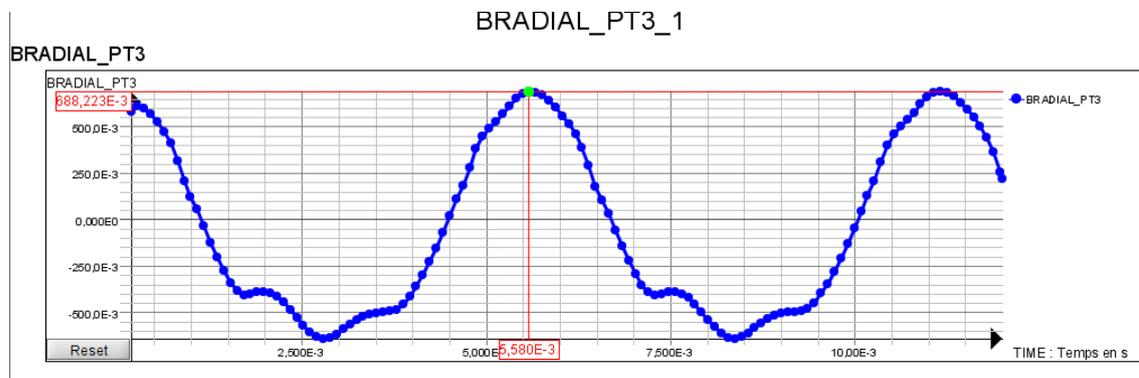


Figure 4. 16. L'induction magnétique radiale en charge ($R=5\Omega$) a 1800 tours/mn au PT3.

En ce point ponctuel (PT3) la valeur de l'induction atteint 0.688T alors qu'elle était égale à 0.724T à vide.

Les courbes des trois inductions magnétiques en charge précédentes ont été rassemblées dans le même graphe (**figure 4.17**).

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

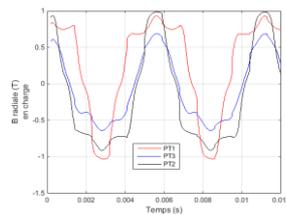


Figure 4. 17. Evolution de l'induction magnétique radiale en charge à 1800 tours/mn.

- **Interprétation et comparaison de l'induction radiale à vide et en charge**

D'après les résultats obtenus, on remarque que la dent n'est pas traversée, par le flux radial, de la même manière sur toute sa longueur. Ceci est justifié par la forme trapézoïdale de la griffe.

La forme d'onde de l'induction magnétique radiale en fonction de temps montre qu'elle n'est pas sinusoïdale à cause de la présence d'harmoniques.

Cependant, les résultats obtenus, à vide et en charge, montrent que les 2 points latéraux atteignent une valeur moyenne de 1T à vide (0.94T en charge) par contre au point de milieu de dent PT3 la valeur à vide est égale à 0.724T (0.68T en charge). L'induction radiale est plus importante aux points extrêmes qu'au milieu de la dent.

4.5. Résolution du modèle à différentes charges

L'objectif de la résolution du modèle de l'alternateur, à différentes charges, aux 3 points de fonctionnement, cités au paravent, est d'évaluer sa puissance de sortie fournie en charge. Cependant, un calcul de courant et de la tension de sortie en charge doivent être effectués. La puissance est par la suite calculée par l'équation (4.1) :

$$P = 3 \times U \times I \dots(4.1)$$

La résolution est faite en magnétique évolutif, un courant d'excitation de 5A est imposé au rotor. Les simulations effectuées nécessitent beaucoup de temps de calculs, environ une

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

journée pour une seule simulation (résultat d'une seule colonne du tableau), par conséquent, le nombre de charge résistives choisies à été limité entre 5 et 7 valeurs.

- **Premier point de fonctionnement (1800 tr/min)**

Le tableau suivant représente les résultats de simulation à différentes charges à une vitesse de 1800 tr/min.

Résistance (Ω)	En CC	5	7	10	15	30	A vide
Courant (A)	11.02	3.16	3.09	2.08	1.4	0.77	0
Tension de sortie (V)	0	11.44	12.46	13.35	14.12	15	16
Puissance (W)	0	108.45	115.5	83.3	59.3	34.65	0

Tableau 4. 1. Les résultats de simulation à différentes charges à 1800 tr/min.

- **Deuxième point de fonctionnement (3000 tr/min)**

Le tableau suivant représente les résultats de simulation à différentes charges avec une vitesse de 3000 tr/mn.

Résistance (Ω)	En CC	5	15	30	50	A vide
Courant (A)	16.74	5.37	2.33	1.28	0.8	0
Tension de sortie (V)	0	18.37	23.34	24.87	25.5	26.48
Puissance (W)	0	295.94	163.14	95.5	61.2	0

Tableau 4. 2. Les résultats de simulation à différentes charges à 3000 tr/mn.

- **Troisième point de fonctionnement (6000 tr/min Iexc 5A)**

Le tableau suivant illustre les résultats de simulation à différentes charges avec une vitesse de 6000 tr/min.

Résistance (Ω)	En CC	5	15	30	A vide
Courant (A)	24.16	10.44	4.54	2.55	0
Tension de sortie (V)	0	33.88	45.3	49	52.15
Puissance (W)	0	1061.12	616.98	374.85	0

Tableau 4. 3. Les résultats de simulation à différentes charges à 6000 tr/min.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

La figure 4.18, ci-dessous, illustre la courbe des puissances en fonction de la tension de sortie en charge.

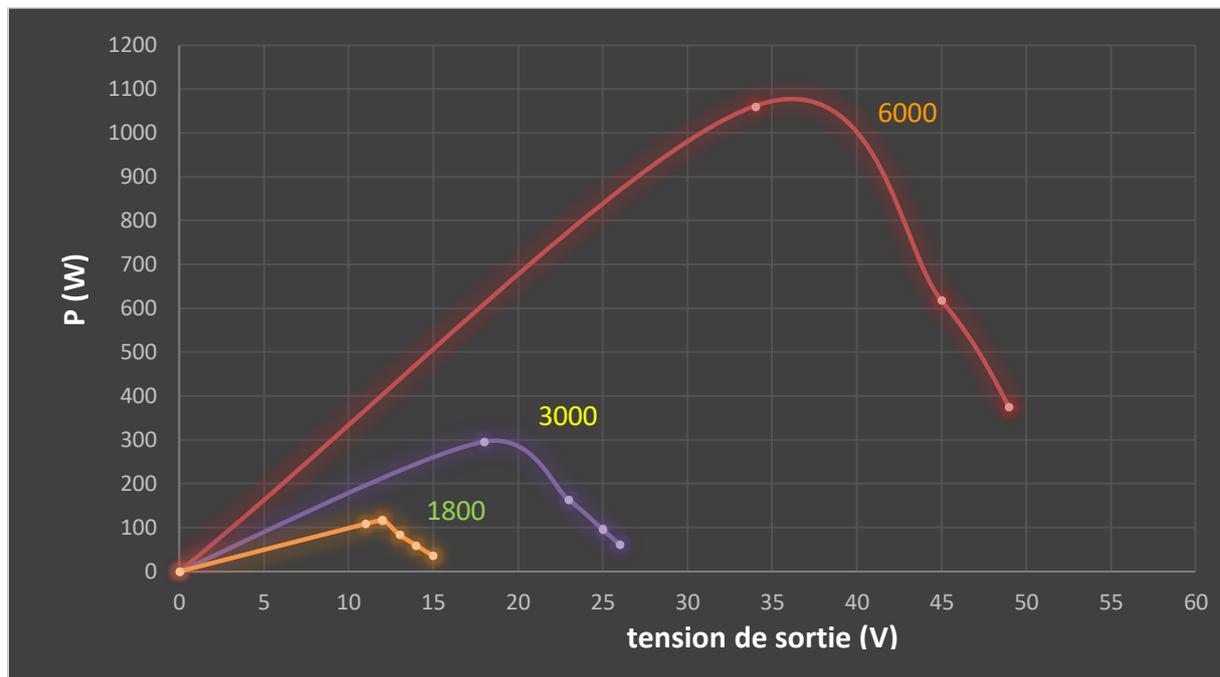


Figure 4. 18. La courbe des puissances en fonction de la tension de sortie.

- **Discussion des résultats**

Les résultats obtenus ont montré qu'au ralenti (1800 tr/min) le maximum de puissance fournie par l'alternateur est atteint autour de la charge de 7Ω . Cette puissance correspond à une tension de sortie de 12V.

A 3000tr/min, l'alternateur tourne dans son état normal, à ce point de fonctionnement, c'est l'alternateur qui charge la batterie et assure l'alimentation de charge du véhicule. Pour une charge de 5Ω l'alternateur atteint sa puissance maximale à cette vitesse.

En revanche, à vitesse élevée (6000tr/min), l'alternateur se comporte comme une machine en court-circuit où la tension de sortie augmente très peu en fonction de la charge et le courant diminue rapidement. On peut constater qu'à 30Ω l'alternateur ne peut pas assumer l'alimentation. L'alternateur fournit une puissance maximale de 1061W.

Chapitre 4 : Simulation et exploitation des résultats

4.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la résolution du modèle en charge et l'exploitation des résultats. En premier lieu, une résolution en magnéto-transitoire a été réalisée avec deux types de simulation à vide et en charge afin de visualiser les niveaux de saturation dans le stator où les résultats ont été comparés. Par la suite, L'évolution de l'induction magnétique radiale a été visualisée en fonction du temps, à vide et en charge. Des résolutions ont également été effectuées en fonction des trois points de fonctionnement, ce qui nous a permis d'évaluer le comportement de notre machine à différentes conditions.

Conclusion générale

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 est actuellement confiée à une machine synchrone triphasée à pôles saillants dite « **alternateur à griffes** ».

Dans cette optique, notre contribution opte pour analyser le comportement de l'alternateur à griffes par modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel de calcul en 3D « **FLUX-3D** ».

Le présent travail s'est intéressé dans un premier temps à la présentation de l'alternateur à griffe : Ces éléments constitutifs, son principe de fonctionnement et son trajet du flux. Quelques avantages et inconvénients ont été également cités.

Par la suite, les différents types de modélisations de l'alternateur à griffes ont été décrits. La modélisation numérique et tridimensionnelle basée sur la méthode des éléments finis a été détaillée. Pour cela, le logiciel de calcul de champ 3D « **FLUX3D** » a été utilisé.

Dans la même optique, le chapitre trois a fait trait au maillage de la géométrie, le bobinage et la résolution du modèle numérique dans le but d'observer les caractéristiques à vide de notre alternateur.

En fin, le dernier chapitre a été consacré à la résolution du modèle et l'exploitation des résultats. D'abord, une résolution en magnéto-transitoire a été réalisée avec deux types de simulation à vide et en charge afin de suivre la saturation dans le stator où les résultats ont été comparés. L'évolution de l'induction magnétique radiale a été également visualisée en fonction du temps (à vide et en charge). Puis, des résolutions ont été effectuées en fonction des points de fonctionnement, ce qui nous a permis d'évaluer le comportement de notre machine à différentes conditions.

Flux2/3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) destiné en premier lieu à l'électrotechnique basé sur la méthode des éléments finis, spécialisé dans la simulation des dispositifs électromagnétiques. Il est le fruit de 39 années de collaboration entre l'équipe MAGE du G2ELab et la PME Grenobloise CEDRAT et est une référence mondiale dans son domaine. En 2016, la société Altair Engineering, un des leaders mondiaux des outils de simulation pour l'ingénierie, a fait l'acquisition de la société CEDRAT et de la suite logiciel Flux. Aujourd'hui, l'équipe MAGE continue à travailler activement au développement de nouvelles méthodes de modélisation électromagnétique avec ALTAIR. L'équipe bénéficie d'un rayonnement accru par la diffusion de ses recherches vers un nombre d'utilisateurs potentiels encore plus important.

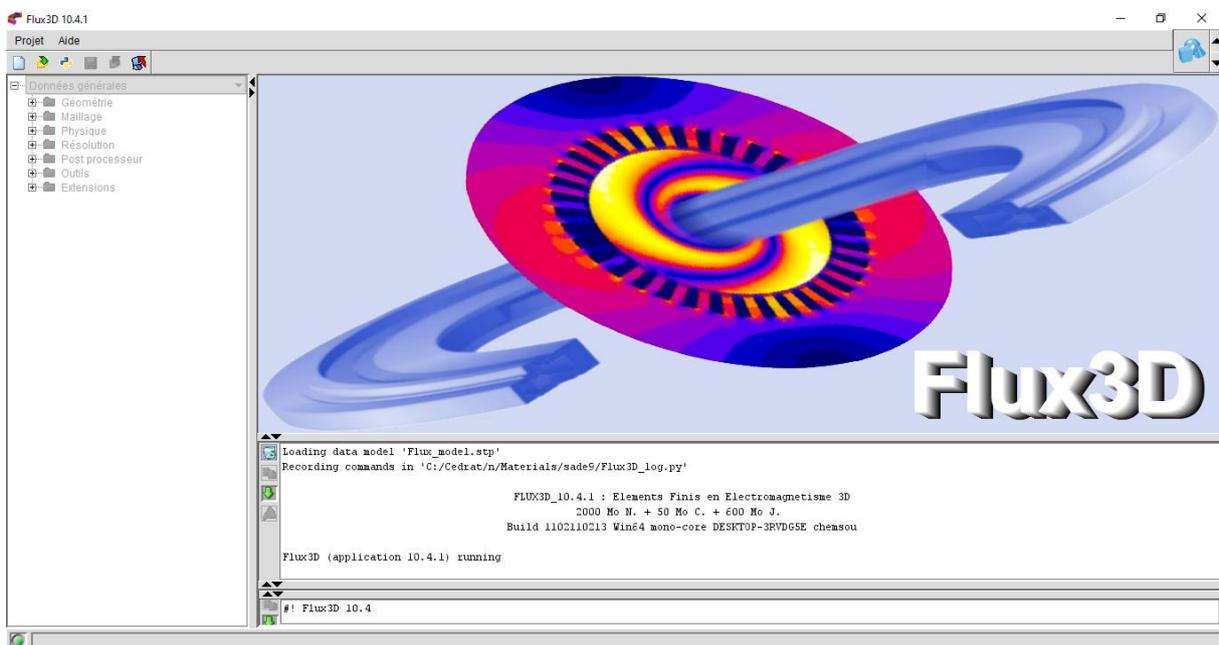


Figure 1 Logiciel de simulation Flux 3D

[1] « Lilya Bouarroudj ». Contribution à l'étude de l'alternateur à griffes. Application au domaine automobile. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005.

[2] « Laurent Albert ». Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. »

[3] 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

[4] « Yahya Choua ». Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault. Modélisation et simulation. Université Paris Sud -Paris XI, 2009. Français. tel-00455379

[5] DAF.YOUCHEF « 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.

[6] T. bouchala “Modélisation semi analytique d'un capteur a noyau de ferrite “ thèse de magister en électronique, université H. Lakhdar de Batna, 2007.

[7] Huu Tuan Liong , Amélioration de la formulation en potentiel scalaire magnétique et généralisation au couplage entre équation de champs et circuit électrique.

[8] Altair Flux™ Electromagnetic, Electric, and Thermal Analysis Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble Bâtiment GreEn-ER, 21 avenue des martyrs, CS 90624 38031 Grenoble CEDEX 1.