

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du projet de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de

Master

En

« Electrotechnique »

Spécialité :

« Electrotechnique Industrielle »

Thème :

**Modélisation par éléments finis d'un
moteur synchrone à aimants permanents**

Réalisé par :

- Bakdi Sara
- Gherrarba kawther nor el imane

Encadré Par :

M. Benallal Nadjib

Année Universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont endurés.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur « Mohamed Nadjib Benallal » pour avoir d'abord proposé ce thème, pour un suivi continuuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses remarques. Nous remercions les membres du jury d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant à l'appréciation de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie électrique qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

Je dédie cet humble travail à :

*Mes chers parents, qui n'ont cessé de m'encourager,
que Dieu me les garde.*

*A mon frère « Habib Bakdi » pour m'avoir soutenu
dans les moments difficiles*

A toute ma famille

*A ceux qui m'ont toujours soutenu et encouragé
« Dr .Bakdi Abdelhak »*

A Mon binôme

“ Gherrarba kawther nor el imane”

A Tous mes amis.

*A tous ceux qui me sont chers et qui ne méritent pas
d'être oubliés.*

BAKDI SARA.

Dédicace

Je dédie cet humble travail

*A ma mère bien-aimée et à mon père bien-aimé
pour m'avoir encouragé dans mes études*

Et à mon frère Abd El Raouf et ma sœur Iibtihal

Et ma tante Naima et radia

*Et pour toute ma famille, des plus grands aux plus
petits*

Et à ma meilleure amie Faiza

*Et mes collègues ou sœurs Sara, Nadia, Sarah et
Yusra*

Gherrarba kawther nor el imane

Résumé

La mémoire se concentre sur la modélisation par éléments finis d'un moteur synchrone à aimants permanents MSAP, où nous menons une étude générale dans laquelle nous découvrons MSAP par la méthode d'éléments finis, son fonctionnement, ses types et comment le couple devrait être théoriquement en fonction du type de rotor , puis nous apprenons à l'appliquer au programme FEMM en suivant les étapes nécessaires à la modélisation MSAP et à obtenir Sur les mêmes résultats que nous avons étudiés dans la théorie lors du changement de type de matériau d'aimants permanents, le type de rotor et les changements qui se produisent pour le couple réluctante et le couple résultant

ملخص

تركز المذكرة على نمذجة العناصر المحدودة لمحرك مغناطيسي دائم متزامن MSAP ، حيث تجري دراسة عامة نكتشف فيها على MSAP بطريقة العناصر المحدودة ، وكيف يعمل ، وما هي أنواعه وكيف يجب أن يكون عزم الدوران نظريًا اعتمادًا على نوع الدوار ، ثم نتعلم كيفية تطبيقه على برنامج FEMM باتباع الخطوات اللازمة لنمذجة MSAP والحصول على نفس النتائج التي درسناها في النظري عند تغيير نوع مادة المغناطيس الدائم ونوع الدوار والتغيرات التي تحدث لعزم الدوران المتردد وعزم الدوران الناتج

Summary

The dissertation focuses on finite element modeling of a permanent magnet synchronous motor MSAP, where we conduct a general study in which we discover MSAP by the finite element method, the operation, the types and how torque should be theoretically be hive as a function of rotor type , then we learn how to apply it to the FEMM program, following the necessary steps to model MSAP and obtain the same results we studied in theory when changing permanent magnet material type, rotor type and the changes that occur for reluctant torque and resultant torque.

Liste des Figures

Chapitre I

Fig. I.1 : Moteur synchrones à inducteur bobiné	5
Fig. I.2 : Moteur industriel à aimants permanents.	6
Fig. I.3 : Schéma de bobinages statoriques.	7
Fig. I.4 : Différentes structures rotoriques pour une MSAP.	9
Fig.I.5 : Caractéristiques couple-angle d'une machine synchrone à pôles saillants avec $X_{sd} > X_{sq}$: 1 - couple synchrone $T_{d_{syn}}$, 2 - couple de réluctance $T_{d_{rel}}$ 3 -couple résultant T_d .	11
Fig. I.6 : Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants	13

Chapitre II

Fig.II.1 : Élément triangulaire	27
--	----

Chapitre III

Fig.III.1 : la différente problématique traitée par logiciel FEMM.	30
Fig. III.2 : Interface de FEMM.	30
Fig. III.3 : Boutons de la barre d'outils Afficher la manipulation.	31
Fig. III.4 : Boutons de la barre d'outils de manipulation de grille.	31
Fig. III.5 : Boîte de dialogue Propriétés de la grille.	32
Fig. III.6 : Fenêtre pour le choix de l'unité (définition du Problème).	33
Fig. III.7 : Exemple de construction d'une encoche statorique.	34
Fig. III.8 : Définition des propriétés des matériaux et milieux.	34
Fig.III.9 : Paramètres magnétique et électrique du milieu.	35
Fig. III.10 : Paramètres pour les conditions aux limites.	35
Fig. III.11 : Maillage.	36
Fig. III .12 : Exemple d'une Cartographie des lignes de champ	37
Fig. .III.13 : le nombre de points	38
Fig.III.14 : une partie dans la msap	39
Fig .III.15 : Topologie des champs magnétiques générés par le stator	40

Liste des Figures

Fig.III.16 : Désignation des limites du champ dans l'entrefer	40
Fig. III .17 : Champ magnétique statorique dans l'entrefer.	41
Figure III .18 : Cartographie des lignes de champ rotorique.	42
Fig. III 19. Champ magnétique rotorique .	42
Fig. III .20 : Matériaux utilisés et cartographie des lignes de champ du MSAP	43
Fig. III 21 : Champ magnétique dans l'entrefer de MSAP.	44
Fig.III.22 : Caractéristiques couple-angle du MSAP inset « AlNiCo »	44
fig.III.23 : Courbe d'aimantation de l' AlNiC 5.	45
Fig.III.24 : Courbe d'aimantation du NdFeB 52.	45
Fig. III.25: Couples résultants T_d de l'AlNiCo et du NdFeB	46
Fig.III.26 : Différentes configurations rotoriques étudiées d'une MSAP	47
Fig. III.27 : Couples réductants (T_{drel}) des trois types de rotor à aimants permanents	47
Fig.III.28 : Couples résultants (T_d) des trois types de rotor à AP.	48

Sommaire

Sommaire :

Remerciement	
Dédicaces	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents	
I.1 Introduction	3
I.2 la machine synchrone	3
I.3. Machines Synchrones à rotors bobinés	4
I.4. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles lisses	4
I.5. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles saillants	5
I.6 la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	5
I.7 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents :	7
I.8 Principe de fonctionnement de MSAP	9
I.9 Relations fondamentales :	10
I.9.1 Vitesse :	10
I.9.2 Densité de courant de ligne d'induit et densité de courant	10
I.9.3 Puissance électromagnétique :	10
I.9.4 Couple électromagnétique (développé)	11
I.10. Les différents types d'aimants permanent	12
I.10.1 Les Alnico:	12
I.10.2 Les Ferrites:	12
I.10.3 Les alliages métaux – terres rares:	13
I.10.4 Les Néodyme -Fer –Bore	13
I.11 Couple des machines synchrones à aimants permanents	14

Sommaire

I.11.1 : Couple de détente	14
I.11.2 : Couple réluctant	14
I.11.3 : Couple mutuel	15
I.12. Le démarrage du MSAP :	15
I.12.1- Démarrage asynchrone	15
I.12.2 Démarrage au moyen d'un moteur auxiliaire	15
I.12.3 Démarrage par changement de fréquence	15
I.13:Les avantages et les inconvénients MSAP	16
I.13.1 : Les avantages	16
I.13.2 : Les inconvénients	16
I .14.conclusion	16
Chapitre II : Les équations de l'électromagnétisme et la méthode des éléments finis	
II.1.Introduction	17
II.2.1 Equations générales de MAXWELL	18
II.2.2. Forme différentielle des équations de Maxwell	18
II.2.2.1 Equation de Maxwell-Gauss :	18
II.2.2.2 Equation de conservation du flux magnétique :	18
II.2.2.3 Equation de Maxwell-Faraday :	18
II.2.2.4 Equation de Maxwell-Ampère	19
II.3. Méthodes numériques	19
II.3.1 Méthode des différences finies	20
II.3.2 Méthode des intégrales de frontières	20
II.3.3 Méthode des éléments finis (MEF)	20
II.4.les éléments finis	20
II.5. Présentation de la méthode des éléments finis	21
II.6. Principe du calcul par éléments finis	23
II.7. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	23

Sommaire

II. 7.1 Les Avantages	23
II. 7. 2 inconvénients	23
II.8. Les conditions aux limites	24
II.8.1. Les conditions aux limites de Dirichlet	24
II.8.2. Les Conditions aux limites de Neumann	24
II.8.3. Condition mixte Dirichlet – Neumann (de Robin)	25
II.8.4. Condition de périodicité et d’antipériodicité	25
II.9. Conditions de transmission	25
II.10. Discrétisation et approximation	26
II.11. Conclusion	28
CHAPITER III : Application et modélisation d’une machine Synchrone à aimant permanent par le logiciel FEMM	
III.1-Introduction	29
III.2- Généralités sur le logiciel FEMM	29
III.3-Différentes étapes de simulation	30
III.3.1-Afficher la manipulation	31
III.3.2- Manipulation de grille	31
III.4- Création du schéma de simulation	32
III.4.1-Définition du problème	32
III.4.2-Dessin	33
III.4.3- Définitions des matériaux et milieux	34
III.4.4- Conditions aux limites	35
III.4.5- Générateur de triangle (maillage)	36
III.4.6-Visualisation des résultats de simulations	36
III.5.- Application sur l'exemple de MSAP	37
III.5.1-Définition du problème	37
III.5.2- Propriétés de le maillage et les matériaux	38
III.6-Modélisation de la MSAP par FEMM	39
III .6.1-Modélisation du Stator	39
III .6.2- Modélisation du rotor (Aimants permanents 2p=4)	42

Sommaire

III .6.3- Forme du champ magnétique dans l'entrefer du MSAP	43
III.7- Etudes des couples du rotor à aimants permanents « AlNiCo »	44
III.8- Courbe d'aimantation de l' AlNiCo et du NdFeB	45
III.9. Comparaison des couples de charge T_d entre les MSAP "AlNiCo" et "NdFeB"	46
III.10- Comparaison des couples entre les MSAP de différents type de configurations rotoriques	46
III.10.1.Comparaison des couples réductants (T_{drel})	47
III.10.2.Comparaison de couple résultant T_d	53
III.11-Conclusion	53
Références bibliographiques	

Introduction Générale

Introduction générale

Ces dernières années le moteur synchrone à aimants permanents est devenu le Moteur le plus utilisé dans beaucoup de domaines industriels, Grâce aux progrès de L'électronique de puissance et l'informatique, le moteur synchrone à aimants Permanents à pu s'imposer dans les systèmes d'entraînement. Les Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans L'industrie parce qu'ils offrent beaucoup d'avantages par rapport aux autres types de Machines à courant continu ou alternatif avec un couple massique élevé, un excellent Rendement, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une grande Capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse. C'est ainsi que les (MSAP) ont apparu et sont de plus en plus utilisés De nos jours dans plusieurs applications industrielles tel que les équipements Domestiques (machine à laver le linge), les équipements de technologie de L'information (DVD drives), Les équipements de soins médicaux et de santé, la Propulsion des sous marins et des véhicules électriques ainsi que les machines-outils Et les applications de l'énergie de l'éolienne [01].

L'établissement d'un modèle électromagnétique, pour la modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents, requiert l'étude du comportement du champ magnétique et de champ électrique dans ce dispositif. A cet effet, un formalisme permettant de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques s'impose. Les équations de base de l'électromagnétisme, dont les équations de Maxwell constituent l'essentiel, auxquelles sont associées des relations constitutives des matériaux, des conditions aux limites ainsi que des conditions de continuité, donneraient le modèle complet régissant le fonctionnement de la machine [02].

Ce travail a été consacré à la modélisation par éléments finis d'un moteur synchrone à aimants permanents.

Pour ce faire, nous avons subdivisé notre mémoire en trois parties principales :

- Dans le premier chapitre portant sur les machines d'excitation et les MSAP, nous présentons les différents types de cette dernière et les principaux matériaux utilisés de nos jours pour leur fabrication et leur Couples.
- Le deuxième chapitre est un aperçu des équations générales de MAXWELL et de diverses méthodes appliquées, en particulier la méthode des éléments finis (FEM), Les avantages et les inconvénients de ces méthodes ont été énumérés.

Introduction générale

- Le troisième chapitre est un aperçu du programme FEMM (Finite Element Method Magnétisme) et les étapes nécessaires pour réaliser la partie appliquée de l'étude d'une MSAP et pour effectuer des calculs de grandeurs telles que l'induction magnétique dans l'entrefer et la comparaison des couples produits par les différents matériaux des AP et les différents types de rotor.

Le but de ce travail est la modélisation des Phénomènes électromagnétiques dans une machine synchrone à aimants permanents A l'aide du logiciel FEMM qui calcule les différentes grandeurs électromagnétiques telles que : tension vectorielle Etude du champ magnétique, de l'induction magnétique et de l'effet du champ magnétique A partir de nombreux paramètres sur la force électromotrice induite et avec le changement de type de matériau magnétique et de type de rotor.

*Chapitre I : généralité sur les moteurs
synchrones à aimant permanents*

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

I.1 Introduction :

Vu les progrès technologiques des matériaux utilisés en électrotechnique, le système d'excitation classique (bobinage) dans les machines synchrones est remplacé par des inducteurs de type aimants permanents surtout à faible et moyenne puissance. Le développement en parallèle des aimants permanents et d'électronique de puissance ont conduit à la conception d'un nouveau type de machine synchrone excitée par des aimants.

Le nom est Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP). Elle présente un rapport (couple /volume) de l'ordre deux fois plus grand que celui obtenu par les machines synchrones excitation électrique [03].

Pour commander une machine électrique est nécessaire d'utiliser son modèle mathématique en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices.

Du point de vue mathématique, la machine synchrone présente un système complexe multi variable et non linéaire.

L'approche actuelle de modélisation des machines électriques est basée sur la théorie des deux axes qui transforme un système triphasé en un système biphasé équivalent, ce qui réduit la complexité du modèle et permet l'étude des régimes transitoires.

La machine synchrone est fortement pénalisée par l'absence du couple lors du démarrage. Elle doit être lancée à la vitesse de synchronisme pour fournir un couple électromagnétique. Généralement, elle est alimentée par un réseau électrique à fréquence fixe [04].

I.2 la machine synchrone :

Les machines synchrones sont des machines électriques tournantes, convertisseurs d'énergie, réversibles qui peuvent fonctionner en moteur ou en génératrice. Lorsqu'une machine synchrone fonctionne en génératrice, c'est-à-dire transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique et fournit un courant alternatif, elle est appelée Alternateur.

Pour l'alternateur synchrone triphasé, l'énergie électrique est produite sous forme triphasée, ainsi son induit peut être câblé en étoile ou en triangle.

L'alternateur se décline en différentes puissances de quelques kilovolts ampères à 250000 kVA. À ce titre il peut être intégré dans des systèmes embarqués, ainsi que dans des

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

installations de puissance. L'alternateur à pôles saillants est principalement utilisé dans les centrales hydroélectriques, tandis que le turboalternateur (à pôles lisses) dans les centrales thermiques et nucléaires.

Ainsi, il est à la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale. Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que Moteurs dans une large gamme de puissance et dont la fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit.

En fonctionnement moteur, la machine synchrone transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, et est utilisé pour entraîner de fortes charges : le TGV Atlantique utilise le moteur synchrone pour se propulser. Le fonctionnement du moteur est de type inductif. Le moteur synchrone est souvent utilisé comme filtre passif pour le relèvement du cosinus Φ en remplacement des condensateurs qui produisent de l'énergie réactive. Il fonctionne à vide. Son fonctionnement est capacitif et est appelé Compensateur synchrone [05].

I.3. Machines Synchrones à rotors bobinés :

Dans le cas des moteurs à rotors bobinés, le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatifs. L'obtention d'une valeur de couple moyen non nulle passe alors par la vérification de la condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre vitesse du champ tournant stator et vitesse du champ tournant rotor.

Afin de s'en parer des contacts glissants (bague balais) comme pour les machines à courant continu, les machines synchrones à rotor bobiné font appel, le plus souvent, à une excitatrice (ou alternateur d'excitation) associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Cet alternateur auxiliaire dont l'induit est accouplé à l'arbre de la machine débite dans l'inducteur, par l'intermédiaire du pont redresseur à diodes tournant aussi avec l'arbre de la machine [06].

I.4. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles lisses

Plutôt adaptées pour des applications à forte puissance et grande vitesse, le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor et fermées par des clavettes en acier amagnétique (Figure I.1.b). Les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique. L'entrefer étant d'épaisseur constante, seule la

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

répartition des encoches et /ou leur remplissage constitue un paramètre structurel jouant sur la forme d'onde des F.E.M attendues. Une disposition appropriée permet d'obtenir des F.E.M sinusoïdales à très faible taux d'harmoniques.

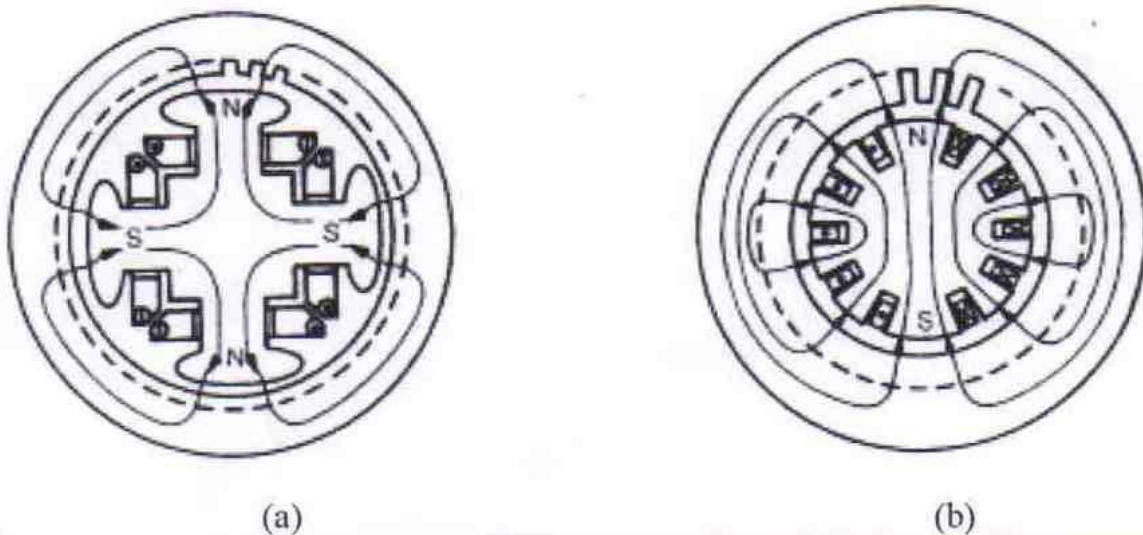


Fig. I.1 : Moteur synchrones à inducteur bobiné [06].

a) rotor à pole saillants, b) rotor à pole lisses

I.5. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles saillants

Pour les machines à rotors à pôles saillants (Figure I.1.a), les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés. Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine. Elles sont utilisées pour des applications qui nécessitent une simplicité de constitution. Ce type de machine possède un facteur de puissance relativement faible qui impose un surdimensionnement des convertisseurs statiques, ceci est un inconvénient pour la l'alimentation à fréquence variable. Pour des application de faible puissance aux environ de quelques kilowatts on peut s'affranchir de cette faiblesse de ce genre des machines [06].

I.6. la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) :

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation. [07]

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

Historiquement, les premiers aimants permanents sont été utilisés au début du XIXeme siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants.

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliage métalliques ou de terres rares (par exemple du type samarium cobalt, néodyme fer bore,...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages à savoir:

- Induction de saturation élevée,
- Faible désaimantation,
- Densité de puissance massique élevée,
- Energie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types des machines.

Pour la machine synchrone à aimants permanents, l'inducteur est remplacé par des aimants permanents, ceci présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes Joule rotoriques. La machine synchrone à aimants permanents est largement utilisée dans plusieurs applications comme les machines-outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique,...etc [08].

Le domaine d'emploi de La machine synchrone à aimants permanents à l'heure actuelle est de quelques dizaines de Kilowatts à cause des caractéristiques magnétiques des aimants qui peuvent se perdre en dépassant les limites de fonctionnement. L'ensemble de ces propriétés leur donne un avantage incontestable dans la motorisation d'actionneurs de forte puissance massique et de hautes performances, notamment dans les systèmes embarqués [9].



Fig. I.2 Moteur industriel à aimants permanents

I.7 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents :

a): stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses.

On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers ou les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase.

La figure. I.3 présente un exemple de bobinage statorique régulier à une seule voie par phase et deux paires de pôles. Les machines à basse tension sont habituellement bobinées en utilisant du fil cylindrique émaillé non rangé. Chaque conducteur, servant à constituer les spires, est le plus souvent formé de plusieurs fils, ou brins, en parallèle. Les conducteurs ainsi réalisés ne sont pas isolés entre eux. Comme on ne peut pas se fier suffisamment à l'isolation apportée par l'émail, qui peut avoir été altérée par les opérations d'enroulement des spires et d'insertion des bobines dans les encoches, ou présenter intrinsèquement des faiblesses localisées, on doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même que l'on doit isoler entre elles les bobines appartenant à des phases différentes. L'isolation des bobines par rapport à la masse est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de U qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche [10].

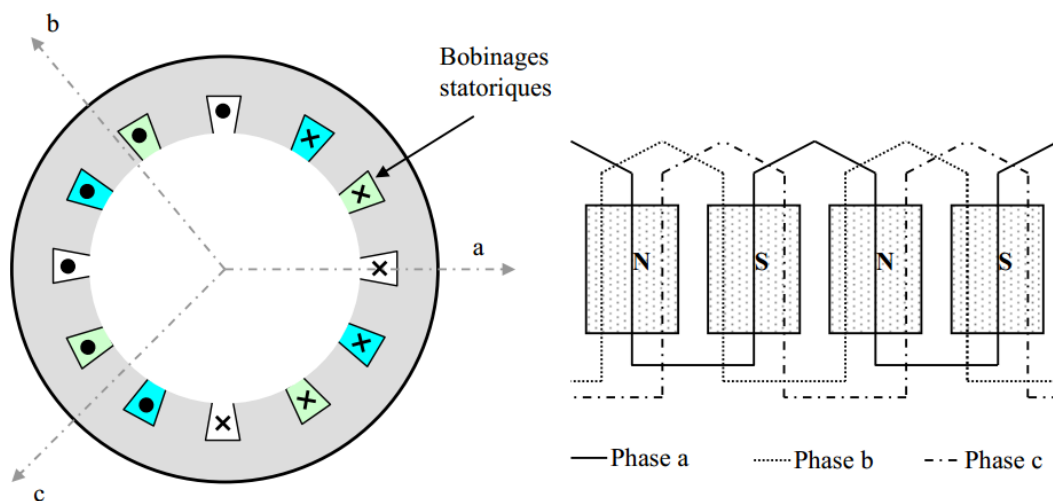


Fig.I.3 Schéma de bobinages statoriques

b) rotor

Représente la partie mobile de la MSAP, formée d'un assemblage de tôles et d'aimants créant le flux d'inducteur, il est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement, soit perpendiculairement à l'entrefer ou de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

Les principales structures des rotors utilisées dans les MSAP sont les suivantes : [11]

- **Aimants montés en surface (machine à pôles lisses)** Dans ce type de machine, les aimants sont collés directement à la surface du rotor. La perméabilité des aimants étant proche de celle de l'air, l'entrefer de la machine peut être considérée comme constante. Ainsi, la machine est à pôles lisses (absence de saillance $Lsd = Lsq$). Cette structure est souvent utilisée pour sa simplicité de fabrication et de commande mais aussi en raison de son rapport poids-puissance avantageux, ce qui rend cette solution très adaptée aux applications embarquées. Cependant, les aimants placés en surface sont susceptibles de se décoller à haute vitesse car ils sont soumis directement aux forces centrifuges. Une solution pour remédier à ce problème est de consolider le collage des aimants avec un tube de matériau amagnétique (Fig.4a).
- **Aimants insérés (machine à pôles saillants)** Cette structure est analogue à celle des aimants montés en surface. Cependant, les ouvertures entre les aimants sont remplies de fer pour créer une saillance ($Lsq > L$). Cette machine à pôles saillants présente également un bon rapport poids puissance et le collage des aimants ne nécessite plus d'être consolidé (Fig.4b).
- **Aimants enterrés (machine à pôles saillants)** Dans ce type de machine, les aimants permanents sont directement enterrés dans le rotor. Cette structure présente un rapport de saillance plus élevée que celle à aimants insérés ($Lsq > Lsd$). Le risque de décollement des aimants est nul cependant, le rapport poids puissance est réduit. Ainsi, cette topologie est adaptée pour des fonctionnements à haute vitesse où l'encombrement n'est pas une contrainte (Fig.4c).

- **Aimants à concentration de flux (machine à pôles saillants)** Cette structure utilise une distribution tangentielle de l'aimantation (au lieu d'une distribution radiale dans les structures précédentes), ce qui implique une forte concentration du flux magnétique dans le rotor. Cela permet d'augmenter sensiblement l'induction dans l'entrefer [11].

Cette topologie utilise principalement des aimants de type « ferrite » pour éviter la saturation magnétique de l'acier et s'applique donc pour des applications où le volume n'est pas une contrainte (Fig.4d).

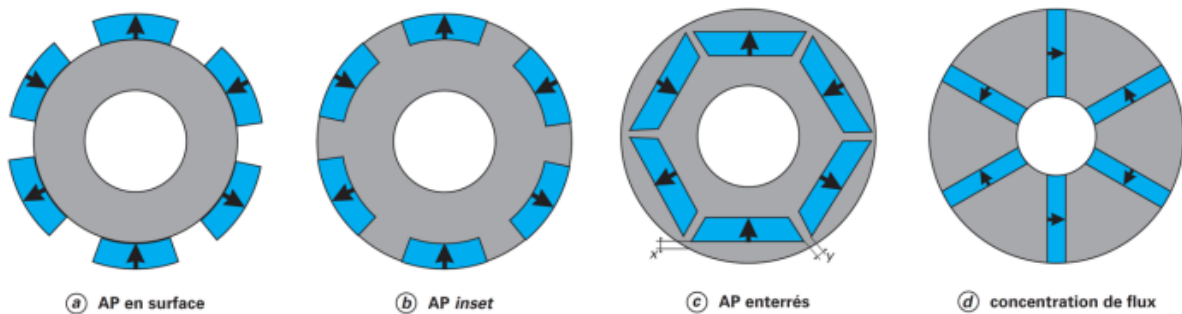


Fig. I.4 Différentes structures rotoriques pour une MSAP [11].

Il existe beaucoup d'autres types de MSAP, notamment des machines à saillance inversée avec

$Lsd > Lsq$ utilisées pour des applications particulières. Dans la suite de ce mémoire, les machines synchrones à Aimants Permanents utilisées seront toujours des machines à pôles lisses avec des aimants montés en surface car elles présentent les meilleures caractéristiques pour des applications embarquées à faible encombrement [12].

I.8.Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents :

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de $\frac{f}{p}$ tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles.

Le rotor composé de p aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.1})$$

I.9. Relations fondamentales :

I.9.1 Vitesse :

Dans la plage de régime permanent, la vitesse du rotor est donnée par la fréquence d'entrée par rapport du nombre de paires de pôles, c'est-à-dire

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{I.2})$$

Et est égale à la vitesse synchrone du champ magnétique tournant produit par le stator [13].

I.9.2 Densité de courant de ligne d'induit et densité de courant :

La valeur de crête de la densité de courant de ligne du stator (induit) (A/m) ou la charge électrique spécifique est définie comme le nombre de conducteurs dans toutes les phases ($2m_1N_1$). est définie comme le nombre de conducteurs dans toutes les phases $2m_1N_1$ multiplié par le courant de crête de l'induit $\sqrt{2}I_a$ divisé par la circonférence de l'induit πD_{1in} , c'est-à-dire...

$$A_m = \frac{2m_1\sqrt{2}N_1I_a}{\pi D_{1in}} = \frac{m_1\sqrt{2}N_1I_a}{p\tau} = \frac{m_1\sqrt{2}N_1J_a s_a}{p\tau} \quad (\text{I.3})$$

Où J_a est la densité de courant (A/mm²) dans les conducteurs du stator (de l'induit) s_a est la section transversale des conducteurs de l'induit, y compris les fils parallèles.

Pour les systèmes de refroidissement par air, $J_a \leq 7,5$ A/mm² (parfois jusqu'à 10 A/mm²) et pour les systèmes de refroidissement par liquide $10 \leq J_a \leq 28$ A/mm². La valeur maximale s'applique aux systèmes de refroidissement par pulvérisation d'huile très intensifs. pour les systèmes de refroidissement par pulvérisation d'huile très intensifs [13].

I.9.3 Puissance électromagnétique :

Pour un moteur synchrone à pôles saillants m_1 -phase avec une résistance d'enroulement du stator négligeable $R_1=0$, la puissance électromagnétique s'exprime comme suit :

$$P_{elm} = m_1 \left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin\delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \quad (\text{I.4})$$

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

Où V_1 est la tension de phase d'entrée (terminale), E_f est la FEM induite par le flux d'excitation du rotor (sans réaction de l'induit), δ est l'angle de puissance par le flux d'excitation du rotor (sans réaction de l'induit), δ est l'angle de puissance, c.-à-d. l'angle entre V_1 et E_f l'angle entre V_1 et E_f , X_{sd} est la réactance synchrone dans l'axe direct (axe d).

Directe (réactance synchrone de l'axe d), et X_{sq} la réactance synchrone dans l'axe en quadrature (réactance synchrone de l'axe q). l'axe en quadrature (réactance synchrone de l'axe q) [13].

I.9.4 Couple électromagnétique (développé) :

Le couple électromagnétique développé par le moteur synchrone est déterminé par la puissance électromagnétique p_{elm} et la vitesse synchrone angulaire $\Omega_x = 2\pi n_s$ qui est égale à la vitesse angulaire mécanique du rotor, c'est-à-dire,

$$T_d = \frac{P_{elm}}{2\pi n_s} = \frac{m_1}{2\pi n_s} \left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin\delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \quad (I.5)$$

L'équation ci-dessus néglige la résistance R_1 de l'enroulement du stator.

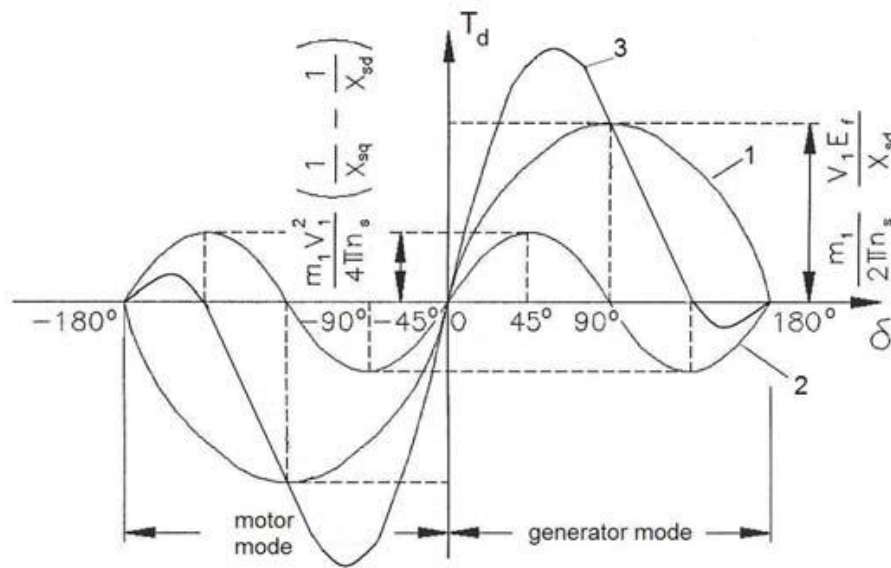


Fig. I.5. Caractéristiques couple-angle d'une machine synchrone à pôles saillants avec

$X_{sd} > X_{sq}$: 1 - couple synchrone T_{dsyn} , 2 - couple de réluctance T_{drel} ,

3 - couple résultant t_d [14].

Dans un moteur synchrone à pôles saillants, le couple électromagnétique a deux composantes (Fig. I.5) :

$$T_d = T_{dsyn} + T_{drel} \quad (I.6)$$

Où le couple fondamental,

$$T_{dsyn} = \frac{m_1}{2\pi n_s} \frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta \quad (I.7)$$

est fonction de la tension d'entrée V_1 et de la force électromotrice d'excitation E_f . Le couple supplémentaire

$$T_{drel} = \frac{m_1 V_1^2}{4\pi n_s} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \quad (I.8)$$

Ne dépend que de la tension V_1 et existe également dans une machine non excitée ($E_f = 0$) à condition que $X_{sd} = X_{sq}$.

Le couple T_{dsyn} est appelé couple synchrone et le couple T_{drel} est appelé couple de réluctance. Pour les moteurs synchrones à pôles saillants avec excitation électromagnétique à courant continu, $X_{sd} > X_{sq}$ [13].

I.10. Les différents types d'aimants permanents :

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue quatre types :

I.10.1 Les Alnico:

Aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel- Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils possèdent alors des caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique, ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

I.10.2 Les Ferrites:

Formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques, ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé.

Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie –prix.

I.10.3 Les alliages métaux – terres rares:

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium–cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

I.10.4 Les Néodyme -Fer -Bore

Le Néodyme-Fer-Bore est le type d'aimants le plus récent. Sa première utilisation remonte à 1985. Dans un court intervalle de temps, il a pris plus d'ampleur au niveau de sa production. Le NdFeB est presque le matériau idéal pour les excitations des machines électriques. L'induction qu'il permet de produire dans l'entrefer est importante, son champ coercitif est élevé [14].

Ils présentent des performances supérieures au Samarium Cobalt et moins coûteux mais leur sensibilité à la température affecte leur performance. De plus ont tendance à s'oxyder à cause du fer qu'ils contiennent.

La figure. I.6 donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

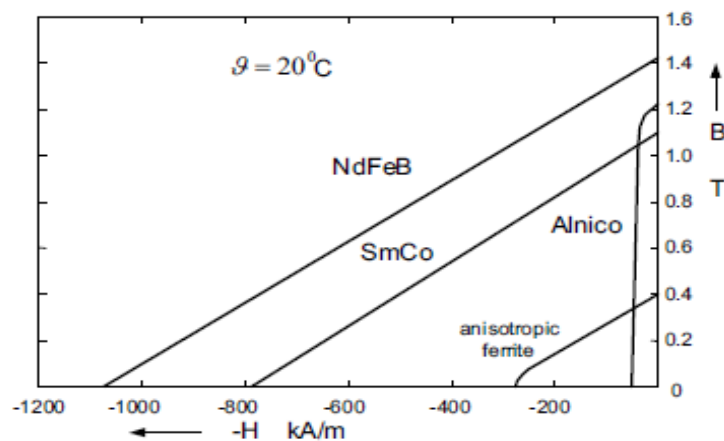


Fig. I.6: Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants

Le choix des aimants est effectué en fonction des caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau I.1 ci-dessous.[15].

Type d'aimants	Densité d'énergie (BH) max (kJ /	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif $-H_c$ (kA/m)	Température T_{max} (°C)	Prix (€ / Kg)
NdFeB	200-380	1,2-1,5	900-2000	140 -220	80-150
Sm Co5	140-200	1	2000	280	220
Sm2 Co17	180-240	1,05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1,1-1,3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0,3-0,4	250	250	6
Ferrites barium	8-30	0,2-0,4	170	100-240	4,5

Tableau.I.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants.

I.11: Couple des machines synchrones à aimants permanents

Les performances d'une machine à aimants permanent se jugent sur certains critères qui sont :

- Maximum de puissance.
- Minimum de volume total.
- Minimum de volume d'aimant.
- Minimum de pertes.
- Minimum d'ondulation du couple.

Pour obtenir un couple volumique important avec un minimum de pulsations, il faut faire un bon choix de la structure et une bonne alimentation.

I.11.1 Couple de détente :

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une réluctance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente ; pour le minimiser, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est donc préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches.

I.11.2 Couple réluctant

Aussi appelé couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements statoriques en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés

Chapitre I : généralité sur les moteurs synchrones à aimant permanents

en surface, le flux d'induit rencontre la même réluctance quelle que soit la position du rotor, il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réluctance à prendre en compte.

I.11.3 Couple mutuel

Il est dû à l'interaction des champs statorique et rotorique.

I.12. Le démarrage du MSAP :

I.12.1 Démarrage asynchrone :

Un moteur synchrone ne démarre pas automatiquement. Pour produire un couple de démarrage asynchrone, son rotor doit être équipé d'un enroulement à cage ou de pôles en acier doux. Le couple de démarrage résulte de l'interaction entre le champ magnétique rotatif du stator et les courants du rotor induits dans l'enroulement à cage ou les dans l'enroulement en cage ou dans les patins en acier doux [16].

I.12.2 Démarrage au moyen d'un moteur auxiliaire

Les moteurs asynchrones auxiliaires sont souvent utilisés pour le démarrage de grands moteurs synchrones à excitation électromagnétique. Le moteur synchrone est équipé sur son arbre d'un démarrage auxiliaire sur son arbre, capable de l'amener à la vitesse de synchronisée, ce qui permet de le synchroniser avec le circuit de puissance. Le moteur synchrone non excité est accéléré à une vitesse presque synchrone à l'aide d'un un moteur à induction plus petit. Lorsque la vitesse est proche de la vitesse synchrone, la tension d'induit, puis la tension d'excitation sont activées et le moteur synchrone est synchronisé.

L'inconvénient de cette méthode est qu'il est impossible de démarrer le moteur en charge. Il serait peu pratique d'utiliser un moteur auxiliaire de même puissance que le moteur synchrone et coûteux. que le moteur synchrone et une installation coûteuse.

I.12.3 Démarrage par changement de fréquence

Le démarrage par changement de fréquence est une méthode courante de démarrage des moteurs synchrones avec excitation électromagnétique. La fréquence de la tension appliquée au moteur passe en douceur de la valeur proche de zéro à la valeur nominale. Le moteur tourne de manière synchrone pendant toute la période de démarrage alimenté par un onduleur à semi-conducteurs à tension variable et fréquence variable (VVVF) [16].

I.13. Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents :

I.13.1 Les avantages :

La machine synchrone à Aimants Permanents présente plusieurs avantages par rapport à l'autre type de machine : à courant continu synchrone a excitation électriques et asynchrone. Parmi ces avantages on peut citer: [17] [18]

- Meilleures caractéristiques thermiques la localisation de pertes joules et pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine.
- Puissance massique et volumique important.
- Un rendement et facteur de puissance élevé.
- Aucun courant d'excitation (30% de perte ou moins)
- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.

I.13.2 Les inconvénients

- Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et couteux que celui d'un moteur à courant continu.
- La présence d'aimants permanents majore le prix de moteur synchrone, notamment dans le cas de l'utilisation d'Aimants du type terre rare, ces aimants présentent de très grand qualité (champ coercitif, tenue en chaleur, etc.) par rapport aux Aimants<<ferrite>> mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé.
- Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et de variateur. A cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant.
- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale, défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants [19].

I .14.Conclusion :

Ce chapitre portant sur les machines d'excitation et les MSAP, nous présentons les différents types de cette dernière et les principaux matériaux utilisés de nos jours pour leur fabrication et leur Couples.

**Chapitre II : Les équations de
l'électromagnétisme et la méthode
des éléments finis**

II.1. Introduction

Deux problèmes majeurs se sont posés aux ingénieurs et chercheurs : celui de l'analyse et celui de la conception de systèmes électromagnétiques. Le premier consiste à déterminer les performances d'une structure donnée, alors que le second a pour mission de trouver la structure répondant à un besoin donné.

De nombreuses méthodes empiriques et analytiques ont été développées. Ces dernières basées sur des modèles simplifiés deviennent insuffisantes, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des caractéristiques non linéaires.

La résolution de tels problèmes nécessite de recourir à des méthodes numériques.

L'approche numérique, offre une modélisation fine des phénomènes physiques en accédant aux variables locales et aux variations spatio-temporelles des différentes grandeurs. Depuis les années 70, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la modélisation numérique. De nombreuses méthodes vivent le jour (éléments finis, méthode des moments, intégrales de frontières, ...) et ont été améliorées depuis. La méthode des éléments finis est une méthode de référence qui s'est imposée par la précision des résultats qu'elle fournit. Elle est très utilisée pour la résolution des divers problèmes rencontrés en pratique : stationnaire ou non, linéaires ou non, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [20].

Pour des configurations complexes comme celle des machines électriques, la méthode des éléments finis est une méthode numérique puissante pour la résolution des problèmes de champ électromagnétique [21].

De plus, cette méthode permet d'intégrer divers méthodes de prise en compte de phénomènes inhérents au fonctionnement de ces machines, tels les phénomènes de saturation magnétique, le couple pulsatoire dû à un entrefer variable, le mouvement relatif des parties statoriques et rotoriques [22].

Dans ce qui suit nous présentons la méthode des éléments finis ainsi que son application à la modélisation des dispositifs électromagnétiques ce qui est le cas des machines électriques. Un aperçu sur les méthodes de prise en compte du mouvement est également donné.

II.2.1. Equations générales de MAXWELL

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés. Ainsi qu'elles sont valables dans les différents milieux (air, milieu non homogènes, non linéaires et anisotropes...).[23]

II.2.2. Forme différentielle des équations de Maxwell

II. 2.2.1 Equation de Maxwell-Gauss :

le flux de champ électrique à travers une surface fermée est relié à la charge électrique contenue à l'intérieur de la surface. Le flux du champ électrique traversant une surface close est égal, à un facteur dimensionnel près, à la charge totale enfermée dans cette surface [23].

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

II. 2.2.2 Equation de conservation du flux magnétique

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Avec : $B^{\rightarrow} (T)$ Induction magnétique,

Cette relation traduit mathématiquement, qu'il n'existe pas de charges magnétiques car les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques. C'est pourquoi les lignes du champ sont toujours fermées sur elles –mêmes, elles forment des boucles .ces boucles n'ont; ni points de départs, ni points d'arrivées, ni points de convergences, D'où, la nomination d'induction conservative (champ conservatif) [24].

II.2.2.3 Equation de Maxwell-Faraday :

Un champ électrique peut induire un champ magnétique. Ce champ induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité [23]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

II.2.2.4 Equation de Maxwell-Ampère :

Il y a incompatibilité entre l'équation de conservation de la charge et le théorème d'Ampère

$$\overline{\text{rot}}\vec{H} = J \text{ qui conduit à } \text{div}J = \vec{0}. \quad (\text{II.4})$$

Renoncer à la conservation de la charge c'est renoncer à la conservation des particules ou renoncer à la notion de charge élémentaire indépendante de tout référentiel. Maxwell a proposé de modifier le théorème d'Ampère sous la forme : [25]

$$\overline{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J}_{total} \quad (\text{II.5})$$

$$\overline{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{J}_{total} = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (\text{II.7})$$

Où :

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A/m],

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V/m],

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T],

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²],

\vec{J}_C : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²],

$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité des courants de déplacement négligeable à basse fréquence [A/m²]

II.3. Méthodes numériques

Les méthodes numériques ont pris un essor considérable avec l'avènement des moyens informatiques, dans les années 50. Celles ci sont d'autant plus utilisées que les configurations à traiter sont complexes. Parmi ces méthodes on trouve la méthode des différences finies, la méthode des éléments finies et la méthode des intégrales de frontières.

II.3.1. Méthode des différences finies

La méthode des différences finies est la plus simple et historiquement la première, elle permet d'obtenir une approximation d'une dérivée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution. Si $f(p)$ est une fonction du paramètre scalaire p , une approximation de sa dérivée première s'obtient par :

$$\frac{df}{dp} \approx \frac{\Delta f}{\Delta p} = \frac{f(p+\Delta p) - f(p)}{\Delta p} \quad (\text{II.8})$$

Cette approximation est simple et générale, cela revient à considérer une combinaison linéaire des valeurs de l'inconnue au point considéré et au point environnant. Ceci mène à un système linéaire ou non linéaire d'équations qui peut être résolu. Cette méthode est rarement utilisée à cause de son maillage qui s'adapte mal aux géométries à frontières complexes et à cause de l'importance de la taille des systèmes algébriques, ce qui induit un temps de résolution important et une précision des calculs coûteuse.

II.3.2. Méthode des intégrales de frontières

La méthode des intégrales de frontières a été utilisée dans le domaine numérique pour la résolution des équations de Maxwell par C.W Trowbridge et son groupe. Elle permet la détermination des grandeurs inconnues sur la frontière du domaine et ne s'applique que dans le cas où le milieu considéré est linéaire [26].

II.3.3. Méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis (finit élément méthode) fut développée et appliquée en premier lieu en génie civile et en mécanique, elle n'a trouvé sa place qu'aux années 1970 en électricité. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaire ou non linéaire, stationnaire ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [26].

II.4. Les éléments finis :

Cette partie présente brièvement l'utilité et les concepts généraux des éléments finis dans la résolution de problèmes électromagnétiques. En analyse numérique, on utilise les éléments finis pour résoudre des problèmes complexes à condition qu'ils soient continus et décrits par

Chapitre II : Les équations de l'électromagnétisme et la méthode des éléments finis

des équations aux dérivées partielles (EDP) linéaires : comportement dynamique des systèmes, propagation d'ondes électromagnétiques, déformation des matériaux etc...

On peut associer la résolution par éléments finis à un algorithme discret mathématique qui permet d'obtenir une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles dans un domaine qui tient compte des conditions aux frontières et/ou à l'intérieur de ce domaine. On utilise les conditions de type Neumann (gradients aux bords), de Dirichlet (valeurs aux bords), ou de Cauchy (relation gradient/valeurs sur le bord) (La Borderie, 2004). Pour résoudre un problème à l'aide des éléments finis, il faut dans un premier temps se poser les questions sur les conditions d'existence de la solution :

- existence de solutions;
- unicité de la solution;
- stabilité;
- conditions et contraintes;
- convergence;
- précision du maillage;
- pourcentage d'erreur toléré.

Dans notre cas, l'ensemble des pièces formant le moteur électrique est discrétisé. C'est-à-dire que les pièces sont décomposées en morceaux appelés éléments, on parle de maillage. Durant la discrétisation ou le maillage, des points appelés aussi nœuds vont apparaître aux intersections des éléments.

L'utilisation des éléments finis est complètement transparente pour l'utilisateur et ne nécessite pas la connaissance de la méthode de Galerkin ou de la théorie mathématique des éléments finis. Ainsi, le logiciel Maxwell permet de résoudre des problèmes de type électromagnétique sans que l'utilisateur ait des acquis avancés en éléments finis [27].

II.5. Présentation de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis tient son origine dans l'analyse des structures [28].

Chapitre II : Les équations de l'électromagnétisme et la méthode des éléments finis

Bien que les premiers calculs effectués avec cette méthode soient fournis par Courant en 1943, la méthode des éléments finis n'a vu son application pour les problèmes d'électromagnétisme que depuis la fin des années 60. Les premières applications dans ce domaine reviennent à P. Silvestre et M.V.K Chari [29].

L'évolution de la méthode est intimement liée au développement de l'ingénierie et de l'informatique. Son application dans des domaines variés comme l'aéronautique est un témoignage du haut degré de précision de la méthode [30].

D'une manière générale, cette méthode peut être définie comme une technique numérique d'approximation des solutions des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

L'objectif de cette méthode est de remplacer un modèle décrit dans un espace continu par un modèle discret équivalent en utilisant une approximation simple des variables inconnues sur des sous domaines, pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques dont la résolution fournit une solution approchée du problème [31].

La méthode des éléments finis est la méthode la plus adaptée aux problèmes d'électromagnétisme rencontrés en génie électrique, elle consiste à trouver numériquement une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles. Cette méthode de discrétisation la plus utilisée car : [32]

- Elle peut traiter des problèmes de géométrie complexe
- Elle couvre de nombreux domaines de la physique
- Les moyens informatique actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation) la rende facile à mise en œuvre.

La méthode des éléments finis consiste à chercher une fonction globale présentant les phénomènes étudiés, sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finies adjacentes appelées éléments finis.

Cette solution globale sera construite sur chacun des éléments du maillage et doit vérifier globalement les équations aux dérivées partielles qui modélisent le phénomène et les conditions aux limites requises. Sur chaque élément fini, la solution est décrite par une interpolation, en fonction des valeurs nodales de l'inconnue.

II.6. Principe du calcul par éléments finis :

Elle est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur. Celle-ci est très puissante pour la résolution des EDP de MAXWELL. Surtout dans les domaines complexes.

Le principe est de décomposer le domaine d'étude en un nombre fini d'éléments polygonaux qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les sommets des polygones (les sommets sont appelés les nœuds de maillage). En employant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution en tout point de domaine sera déterminée en fonction des valeurs aux sommets de l'élément. Elle ne s'applique pas directement sur les équations aux dérivées partielles mais sur une forme intégrale de celles-ci, cette formulation intégrale peut être variationnelle ou à résidus pondérés.

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis repose sur trois étapes essentielles :

- Formulation des équations aux dérivées partielles à partir des lois physiques.
- Transformation des équations en un système algébrique qu'il convient de résoudre pour obtenir la solution du problème posé.
- Exécution des problèmes sur ordinateur à partir du logiciel approprié [33].

II.7. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

II.7.1 Les Avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues [34].

II.7.2 Les Inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude [34].

II.8. Les conditions aux limites

Dans la plupart des types d'applications, le champ électromagnétique s'étend à l'espace infini. Dans ces applications, les limites sont utilisées pour simplifier l'élément fini modéliser et approximer le potentiel vectoriel magnétique aux points nodaux. Les machines électriques Rotatif à des pas polaires identiques ou parfois des pas demi-polaires.

Les frontières dues à la symétrie réduisent considérablement la taille de l'élément fini modèle. Les conditions aux limites peuvent être classées en trois types [35], qui seront regardé de plus près

II.8.1. Les conditions aux limites de Dirichlet

Exigent que le potentiel vectoriel magnétique, en un point particulier, prenne une valeur prescrite, c'est-à-dire

$$A = m \quad (\text{II.9})$$

Où m est la valeur spécifiée. Les frontières de Dirichlet forcent les lignes de flux à être parallèle au bord de la frontière.

Dans les problèmes 2D, une ligne de flux est une ligne de $A = \text{constat}$. En utilisant la condition aux limites $A = 0$, les lignes de flux sont contraintes de suivre la frontière. Le bord extérieur de la culasse du stator, par exemple, pourrait avoir une limite de Dirichlet de $A = 0$. Il s'agit d'une simplification puisque tout flux de fuite qui s'étendrait au-delà de la culasse du stator est désormais négligé. La perméabilité relative élevée de la culasse ferromagnétique garantirait que la majeure partie du flux reste à l'intérieur

La culasse et dans la plupart des conceptions de moteur, cette condition aux limites est une condition raisonnable simplification à faire [36].

II.8.2. Les Conditions aux limites de Neumann

Les conditions aux limites de Neumann nécessitent la dérivée normale du champ magnétique le potentiel vectoriel soit nul, c'est-à-dire

$$\frac{\partial A}{\partial \mathbf{n}} = 0 = g_0 \quad (\text{II.10})$$

Ce type de frontière n'est pas satisfait exactement par la solution aux éléments finis mais seulement la valeur moyenne de la frontière [36].

II.8.3. Condition mixte Dirichlet – Neumann (de Robin)

C'est la combinaison des deux types de conditions aux limites. Elle s'exprime par :

$$a A + b \frac{\partial A}{\partial n} = g \quad (\text{II. 11})$$

Où :

a Et b : constantes définies sur le domaine d'étude et g : la valeur de l'inconnue sur la frontière.

II.8.4. Condition de périodicité et d'anti périodicité :

Elles sont dites aussi cycliques et anticycliques.

$$A|\Gamma = K.A| \quad (\text{II. 12})$$

Avec A : Fonction inconnue.

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

$K=1$: Cyclique.

$K=-1$: Anti-cyclique.

Ces deux conditions sont utilisées pour exploiter la symétrie inhérente dans quelques problèmes, afin de réduire les dimensions du domaine d'étude, ainsi que dans ceux à frontière ouvertes.

II.9. Conditions de transmission

Un champ électromagnétique traversant deux milieux continus différents subit une discontinuité et n'est plus différentiable. Afin de résoudre les équations de Maxwell dans un domaine entier contenant des sous-domaines avec différentes propriétés de matériaux, il est donc nécessaire de considérer les conditions de transmission (ou d'interface) [37], qui s'énoncent comme suit

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique E

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{II. 13})$$

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique B

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II.14})$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique H, si les courants surfaciques K_S existent

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = K_S \quad (\text{II.15})$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique D, si les charges surfaciques ρ_s existent

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{II.16})$$

Avec :

\vec{n} : La normale à l'interface.

K_S Et ρ_s sont respectivement, la densité de courant et la densité de charges, portées par la surface de séparation.

II.10. Discrétisation et approximation :

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul [38].

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres [39].

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines [40].

Chapitre II : Les équations de l'électromagnétisme et la méthode des éléments finis

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

L'inconnue A est décrite dans chaque élément e par une combinaison linéaire des valeurs A_i^e aux nœuds [41]:

$$A^e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i^e A_i^e \quad (\text{II. 17})$$

Les α_i sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$\alpha_i^e(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés [42]. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

Dans le cas de l'élément triangulaire représenté sur la figure (II.1), les fonctions de pondération sont :

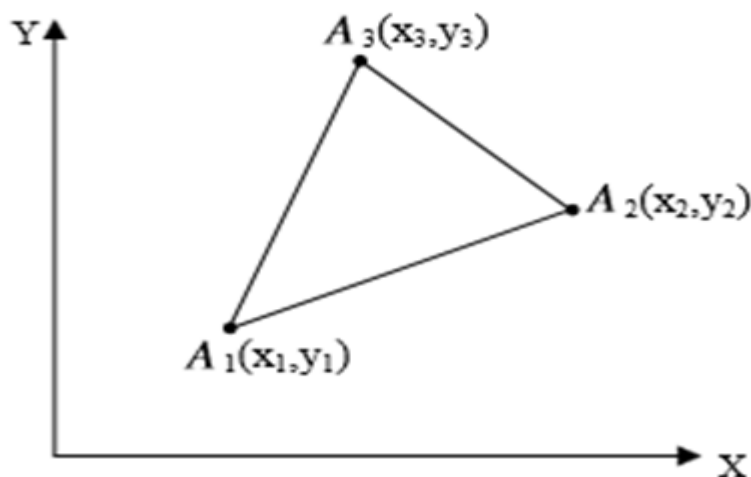


Fig. II.1.Élément triangulaire

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) + (y_2 - y_3) \cdot x + (x_3 - x_2) \cdot y] \quad (\text{II.19})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (y_3 - y_1) \cdot x + (x_1 - x_3) \cdot y] \quad (\text{II. 20})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (y_1 - y_2) \cdot x + (x_2 - x_1) \cdot y] \quad (\text{II. 21})$$

$$2 \cdot \Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) \quad (\text{II. 22})$$

$$\begin{aligned} \Delta &= [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)] / 2 \\ &= \frac{1}{2} [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2)] \end{aligned} \quad (\text{II. 23})$$

II.11. Conclusion :

Une revue générale des principales étapes permettant la résolution d'un problème électromagnétique par la méthode des éléments finis est faite dans ce chapitre ainsi que les différentes équations de Maxwell et les différentes de méthode numérique et les conditions aux limites de transmission.

**Chapitre III : Application et modélisation
d'une machine Synchrone à aimants
permanents par le logiciel FEMM 4.2**

III.1-Introduction

La modélisation est un outil utilisé dans les différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, elle permet d'analyser le comportement d'un système avant l'implémenter et d'optimiser son fonctionnement en testant les différentes solutions et les différentes conditions.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis pour étudier un dispositif électromécanique à électroaimants. Il s'agit d'une MSAP et de sa simulation en utilisant le logiciel d'éléments finis Femm 4.2.

III.2- Généralités sur le logiciel FEMM

F.E.M.M (Finite Element Method Magnetics) est un logiciel qui utilise la méthode de résolution par éléments finis 2D cartésiens et 2D axisymétriques. Il est dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques (magnétostatique) dans le domaine des basses fréquences (fréquence industrielle). La version utilisée fonctionne sous Windows.

Il est constitué de trois modules principaux :

Le premier module permet au travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de traitement : visualisation et différents calculs au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc...)

- Un module de maillage (éléments triangulaires) qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis, ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de thermique en stationnaire.

Il peut être utilisé sans interface graphique au travers du langage script « LUA ».

Ce logiciel est dédié aux problématiques du génie électrique, ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe B(H) pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques, ...etc). Il est possible de mettre en

Chapitre III : Application et modélisation d'une machine Synchrone à aimants permanents par le logiciel FEMM 4.2

place un couplage magnétique-thermique via le langage script LUA. Par contre il ne possède pas de techniques permettant la prise en compte du mouvement dans les actionneurs électromécaniques (par exemple mouvement du rotor par rapport au stator). Il existe une bibliothèque de matériaux magnétiques [43].

III.3-Différentes étapes de simulation

Pour faire la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis, on choisit par exemple un problème magnétique.

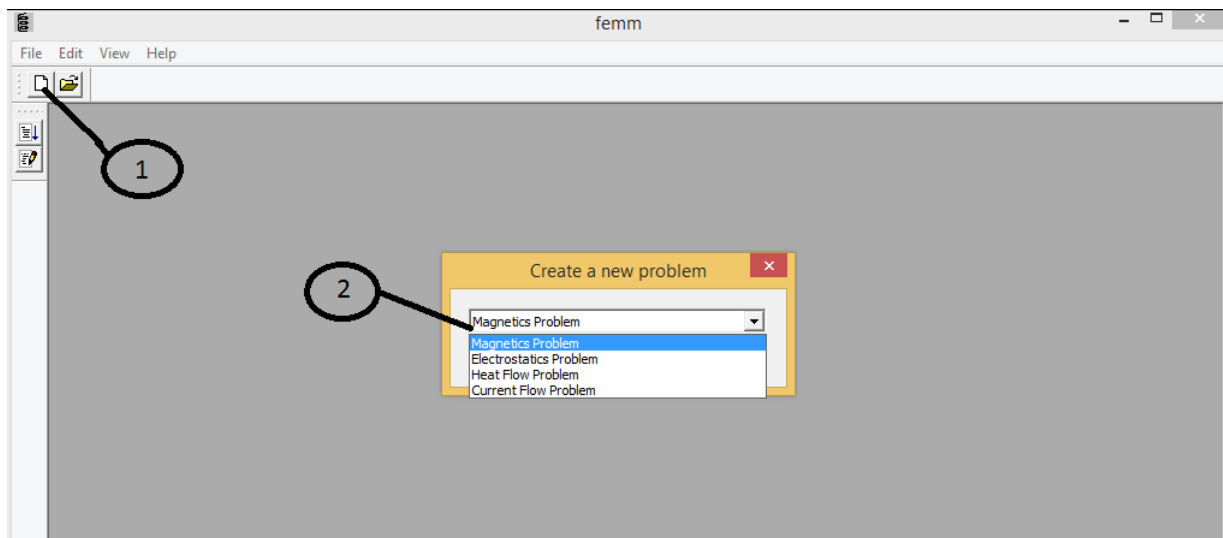


Fig III-1 : la différente problématique traitée par logiciel FEMM [43].

Dans cette partie on va montrer les différentes options du logiciel FEMM en utilisant l'exemple d'un circuit magnétique simple.

On considère ainsi un problème relevant de type électromagnétique.

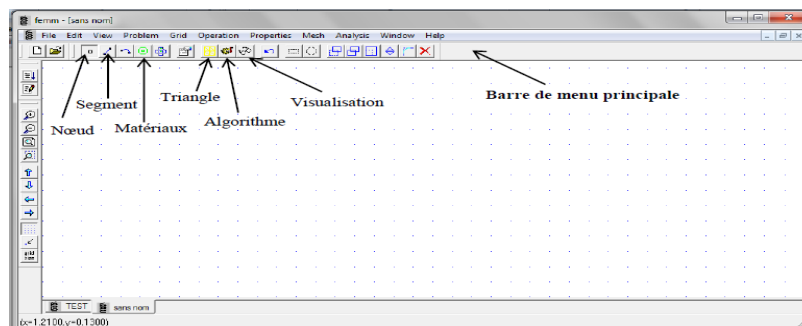


Fig III-2 : Interface de FEMM [43].

III.3.1-Afficher la manipulation :

Généralement, l'utilisateur doit dimensionner ou déplacer la vue de la géométrie du problème affichée à l'écran. La plupart des commandes de manipulation de vue sont disponibles via les boutons de la barre d'outils du préprocesseur. Les boutons de la barre d'outils Afficher la manipulation sont illustrés à la Figure III.3 Le sens de la



Fig III.3 : Boutons de la barre d'outils Afficher la manipulation [43].

Les boutons de la barre d'outils Afficher la manipulation sont :

- Les flèches de la barre d'outils correspondent au déplacement de la vue dans le sens de la flèche d'environ 1/2 de la largeur actuelle de l'écran.
- Le bouton "page vierge" redimensionne l'écran à la vue la plus petite possible qui affiche le toute la géométrie du problème.
- Les boutons « + » et « - » font respectivement un zoom avant et arrière sur la vue actuelle.
- Le bouton « page avec loupe » permet de zoomer la vue sur un point défini par l'utilisateur. une partie de l'écran. Pour utiliser cet outil, appuyez d'abord sur le bouton de la barre d'outils.

Ensuite, déplacez la souris pointeur vers l'un des coins souhaités de la "nouvelle" vue. Appuyez et maintenez le bouton gauche de la souris bouton. Faites glisser le pointeur de la souris vers le coin diagonal opposé de la « nouvelle » vue souhaitée. Enfin, relâchez le bouton gauche de la souris. La vue zoomera sur une fenêtre qui correspond le mieux à la la fenêtre souhaitée par l'utilisateur [43].

III.3.2- Manipulation de grille

Pour vous aider à dessiner votre géométrie, un outil utile est la Grille. Lorsque la grille est allumée, une grille bleu clair pixels sera affichée à l'écran. L'espacement entre les points de la grille peut être spécifié par le l'utilisateur, et le pointeur de la souris peut être amené à "s'accrocher" au point de grille le plus proche. La façon la plus simple de manipuler la grille est d'utiliser la barre d'outils de manipulation de la grille boutons. Ces boutons sont illustrés à la Figure III.4.



Fig III.4 : Boutons de la barre d'outils de manipulation de grille [43].

Chapitre III : Application et modélisation d'une machine Synchrone à aimants permanents par le logiciel FEMM 4.2

Le bouton le plus à gauche de la Figure III.4 montre et masque la grille. Par défaut, le bouton est enfoncé, affichant la grille actuelle. La deuxième

Le bouton, avec une icône représentant une flèche pointant vers un point de la grille, est le bouton « aligner sur la grille ». Quand cela est enfoncé, l'emplacement du pointeur de la souris est arrondi à l'emplacement du point de grille le plus proche. Par défaut, le bouton "aligner sur la grille" n'est pas enfoncé. Le bouton le plus à droite fait apparaître la Grille Boîte de dialogue Propriétés. Cette boîte de dialogue est illustrée à la Figure III.5

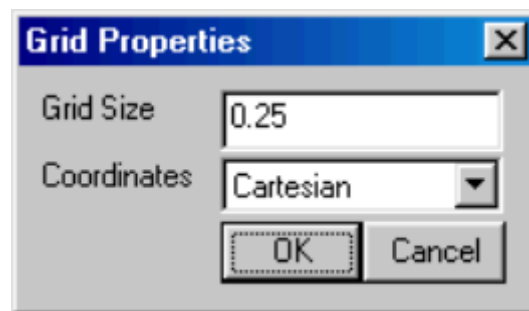


Fig III.5: Boîte de dialogue Propriétés de la grille [43].

La boîte de dialogue Propriétés de la grille comporte une zone d'édition permettant à l'utilisateur d'entrer la taille de grille souhaitée. Quand la boîte apparaît, le nombre dans cette boîte d'édition est la taille actuelle de la grille. La zone d'édition contient également une liste déroulante qui permet à l'utilisateur de choisir entre les coordonnées cartésiennes et polaires. Si cartésien est sélectionné, les points sont spécifiés par leurs coordonnées (x,y) pour un problème plan, ou par leurs coordonnées (r,z) coordonnées pour un problème axisymétrique. Si Polaire est sélectionné, les points sont spécifiés par un angle et une distance radiale de l'origine. La valeur par défaut est les coordonnées cartésiennes [43].

III.4- Création du schéma de simulation :

III.4.1-Définition du problème

La toute première étape est la définition de problème qui comprend les quatre éléments importants:

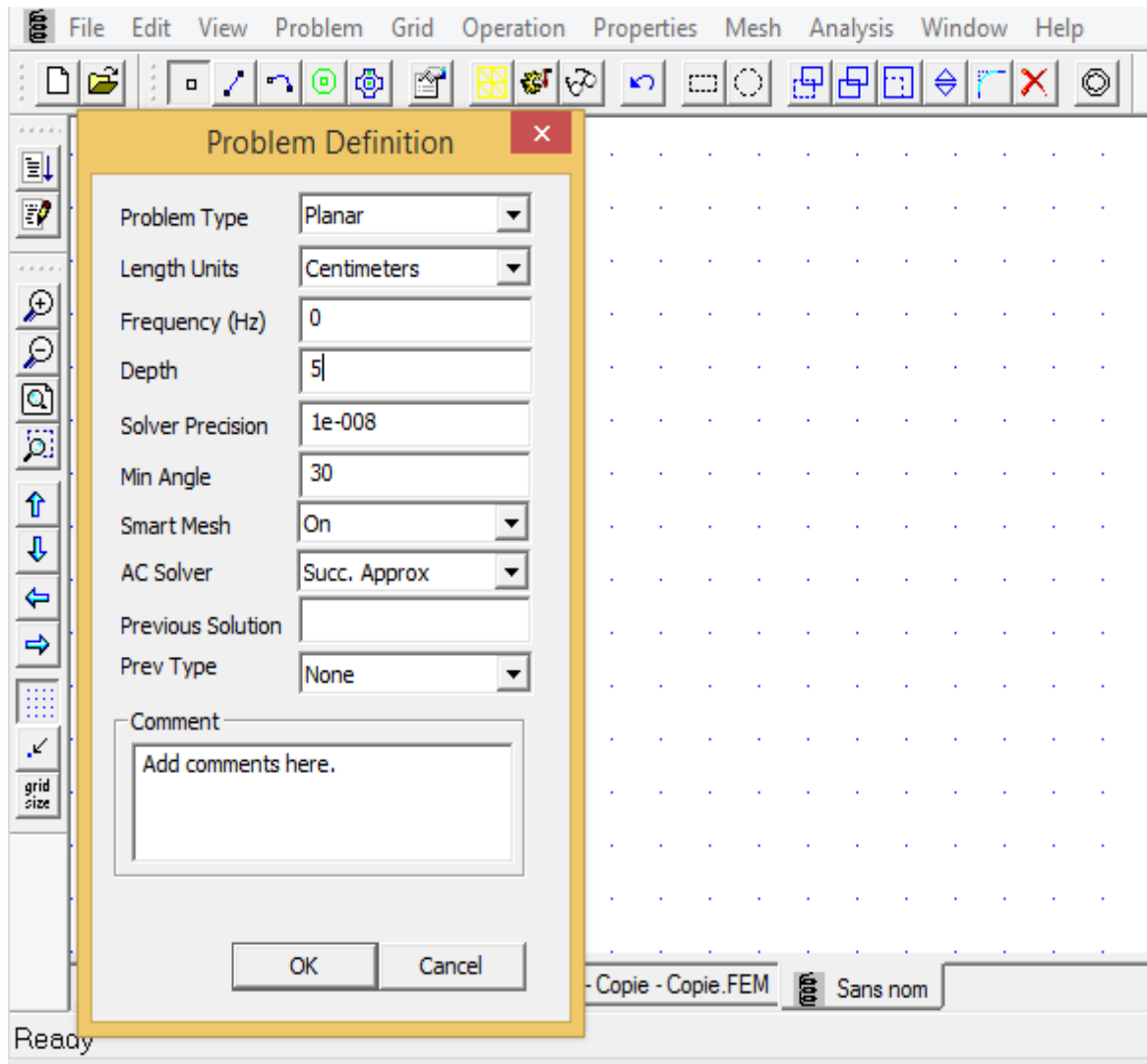


Fig. III.6 : Fenêtre pour le choix de l'unité (définition du Problème) [44].

- **Type :** Le type de problème à traiter (plan, axisymétrique)
- **Unité :** Définir l'unité utilisée dans l'étude (millimètre ; mètre...etc.)
- **Fréquence :** elle vaut 0 si le problème est magnétostatique.
- **Profondeur :** La longueur de la machine à étudier.

III.4.2-Dessin :

La géométrie de la machine doit être toute réalisée en déclarant tous les paramètres géométriques qui la constituent (points, segments, arcs)

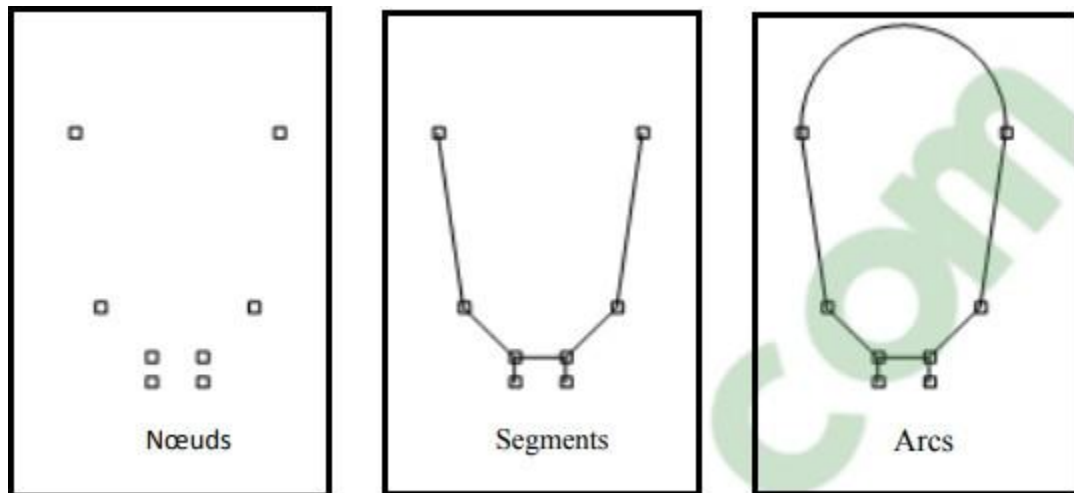


Fig. III.7 : Exemple de construction d'une encoche statorique.

III.4.3- Définitions des matériaux et milieux

Après avoir saisi la géométrie, on doit définir les différents matériaux à utiliser. On Sélectionne le menu « **Propriétés** » puis « **Materials Library** », on repère le matériau dans l'arborescence de gauche (bibliothèque des matériaux) le milieu nommé par exemple « Air », puis on fait un glisser déposer dans l'arborescence de droite comme indiqué en Figure III.8.

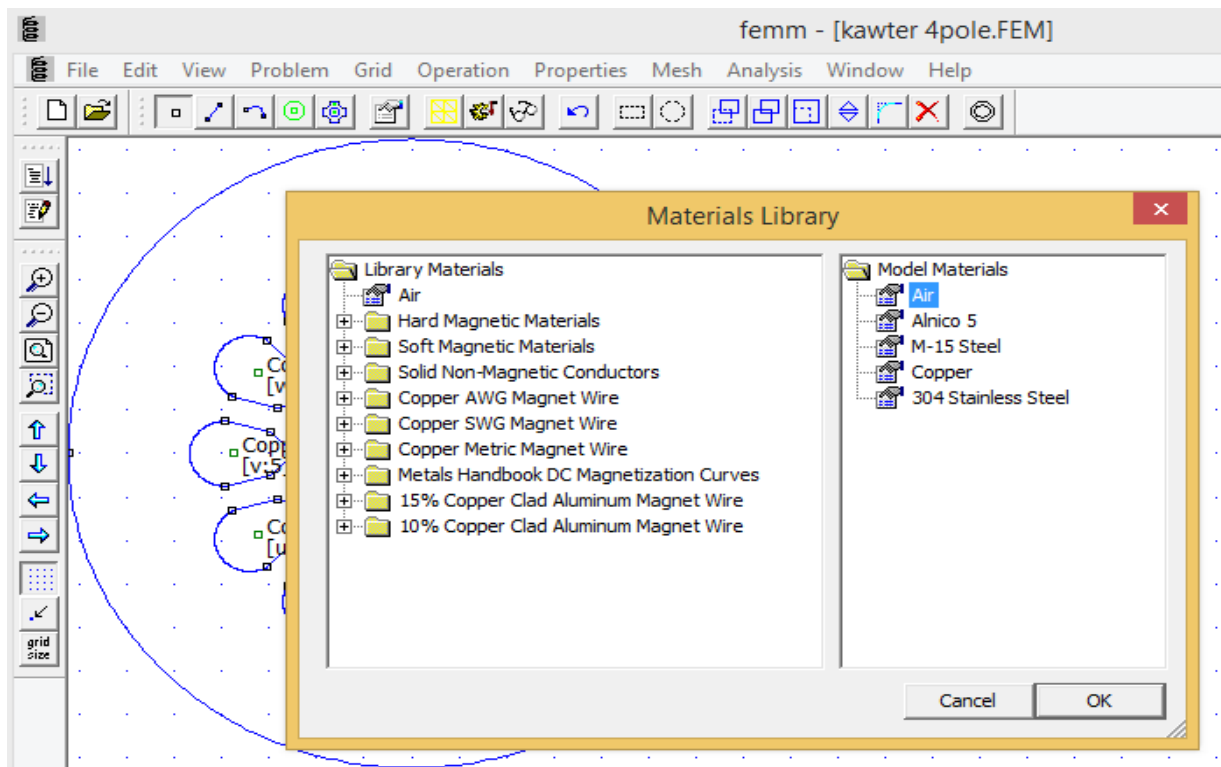


Fig. III.8 : Définition des propriétés des matériaux et milieux [43].

Chapitre III : Application et modélisation d'une machine Synchrone à aimants permanents par le logiciel FEMM 4.2

Effectuer un double clic sur l'icône du milieu afin d'éditer ses paramètres magnétiques. Les grandeurs sont celles de la figure III.9.

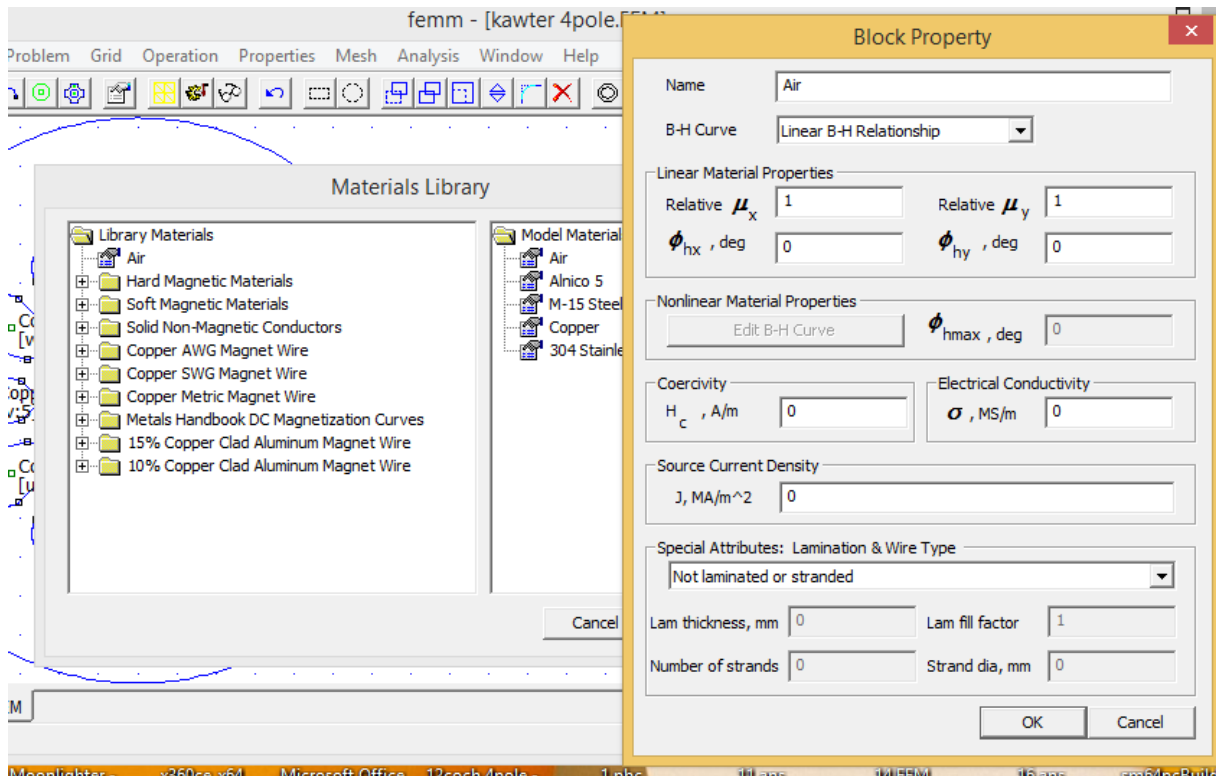


Fig. III-9 : Paramètres magnétique et électrique du milieu [43]

III.4.4- Conditions aux limites

Une étape importante pour le calcul, consiste à définir pour le contour une condition aux limites par exemple un champ nul. On sélectionne le menu « **Properties** » puis « **Boundary** » et « **Add Properties** », les paramètres à rentrer sont ceux de la Figure III.10.

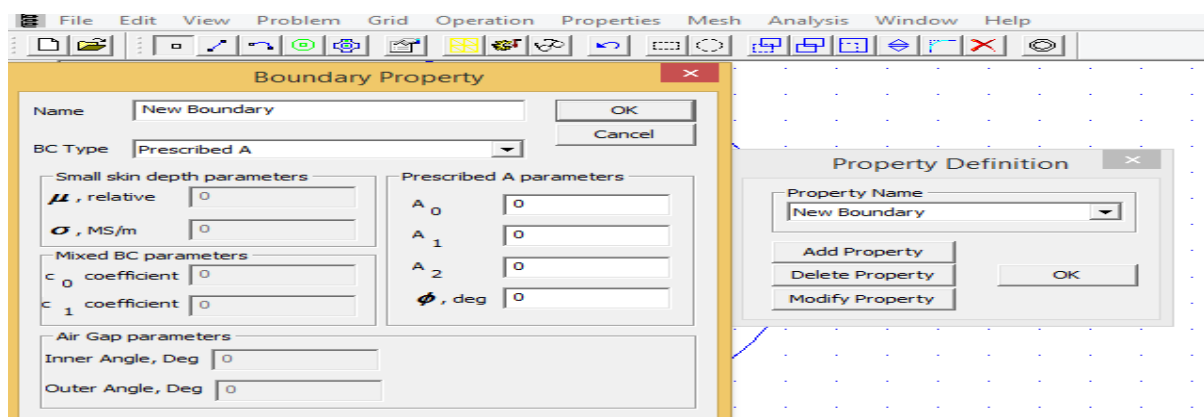


Fig. III.10 : Paramètres pour les conditions aux limites[43].

Chapitre III : Application et modélisation d'une machine Synchrone à aimants permanents par le logiciel FEMM 4.2

Il est important de signaler que les conditions aux limites ont pour but de délimiter la région du flux à analyser et de réduire le domaine d'étude au minimum possible.

Dans notre étude il est à signaler qu'aucune ligne de flux ne pourra traverser les conditions aux limites qu'on va définir préalablement. La condition limite $A_z = 0$ est définie dans le problème. Cette condition limite est assignée à la carcasse de la machine.

III.4.5- Générateur de triangle (maillage)

Actionner l'icône générateur de triangle « **run mesh generator** ». Le programme résout les équations magnétiques en un certain nombre de points (éléments finis). Or plus le nombre de triangles est important plus les résultats sont précis, mais le temps de calcul est alors plus élevé surtout en régime saturé.

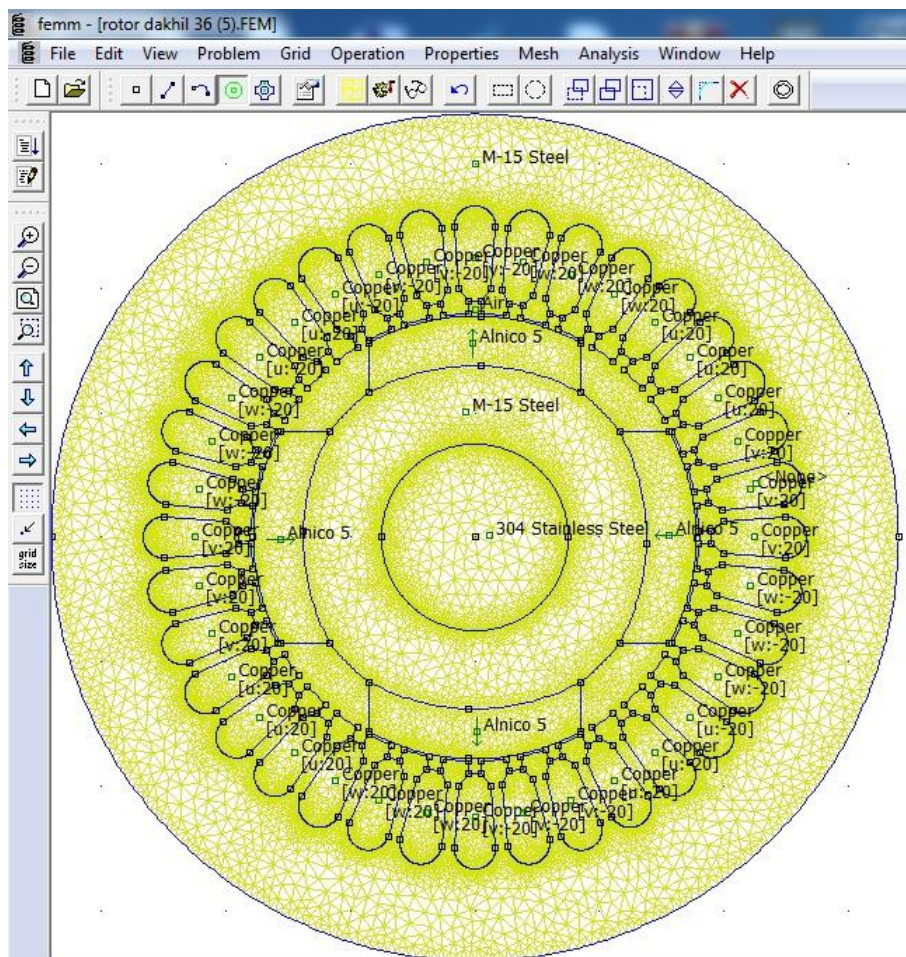


Fig. III-11 : Maillage.

III.4.6- Visualisation des résultats de simulations :

Pour visualiser les lignes de champ, par exemple, on active l'icône « **run analysis** » puis l'icône « **view result** ».

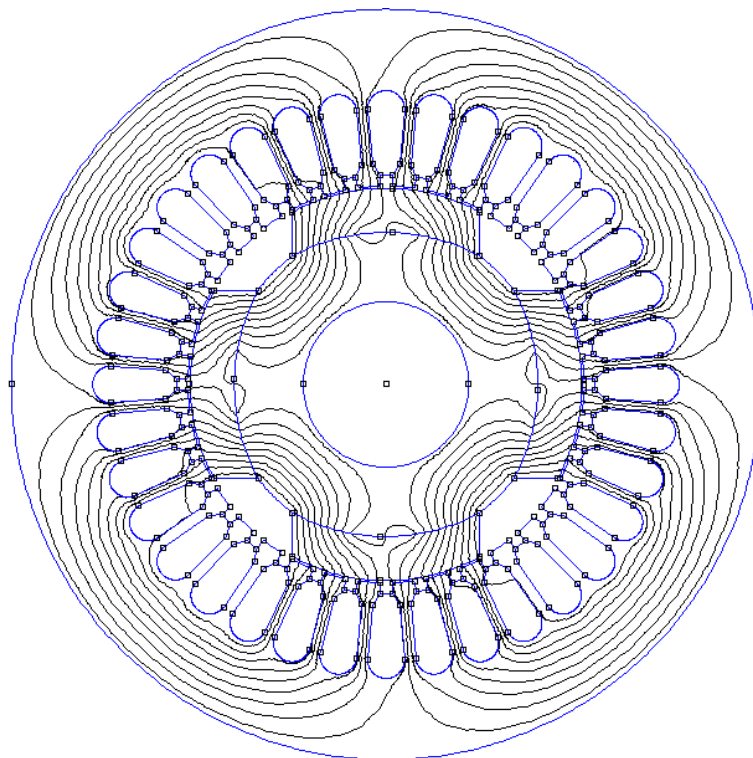
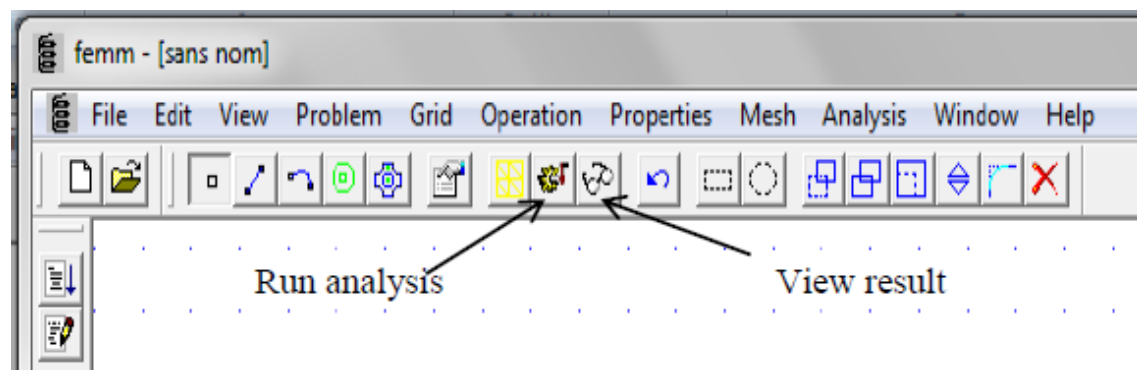


Fig. III .12 : exemple d'une Cartographie des lignes de champ

III.5.- Application sur l'exemple de MSAP

III.5.1-Définition du problème

- Type du problème plan
- Unité de longueur centimètres
- Fréquence 0 Hz

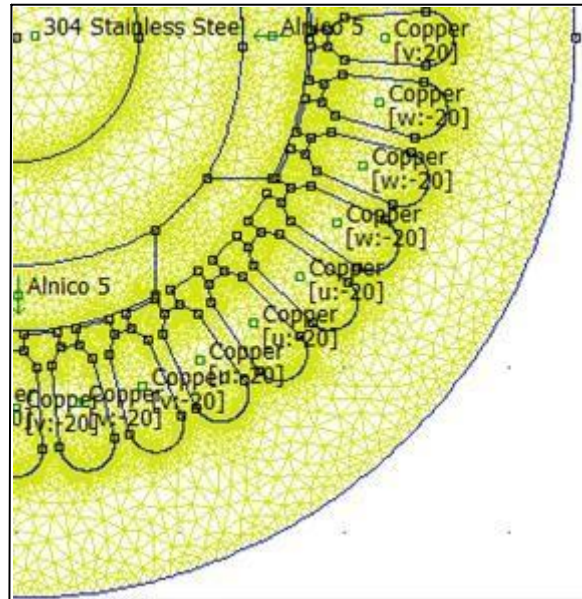


Fig. III .14 : une partie dans la msap

III.6.-Modélisation de la MSAP par FEMM :

III .6.1-Modélisation du Stator :

On modélise un stator à 36 encoches de forme ovale pour 2 polarités « 2p=2 et 2p=4 ». Pour un moteur à deux pôles ou à 4 pôles, on utilise la loi suivante :

$$Z=2p.m.q$$

Où :

Z=nombre total d'encoches du stator (Par exemple=36).

2p= nombre de pôles (Par exemple =2 et 4).

m = nombre de phase (3).

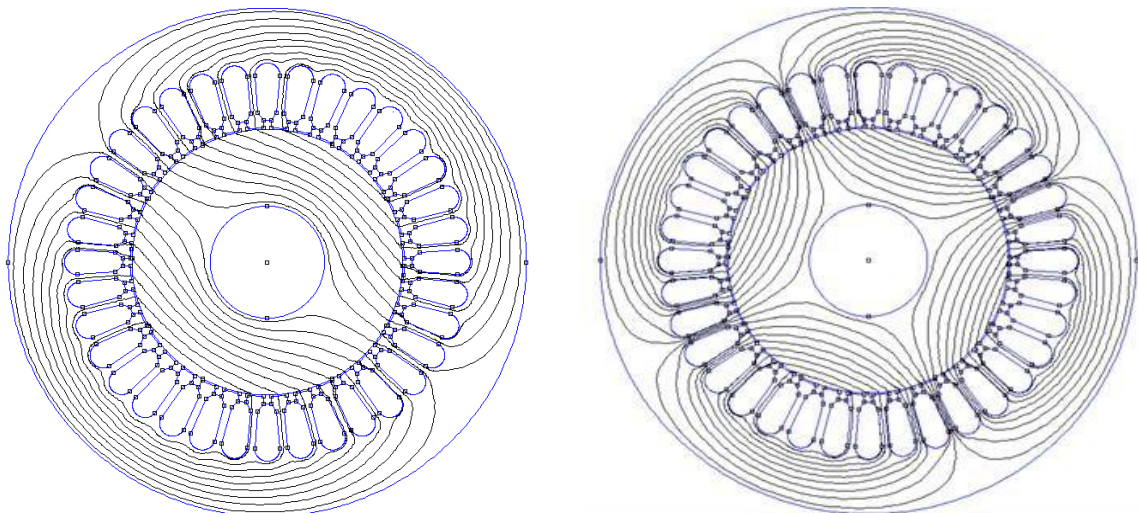
q = nombre d'encoches par pôle et par phases.

Pour voir le résultant idéalisé dans figure de champs créés par le stator (sans perturbation), nous modélisation sur FEMM avec un rotor plein (n'existe pas eu réalité).

A.N:

$$\mathbf{a-q} = \frac{Z}{2p.m} = \frac{36}{2.3} = 6 .$$

$$\mathbf{b-q} = \frac{Z}{2p.m} = \frac{36}{4.3} = 3 .$$



a. ($2p=2$)

b. ($2p=4$)

Fig. .III.15 Topologie du champs magnétique généré par le stator (a- $2p=2$, b- $2p=4$).

Pour tracer l'allure du champ magnétique dans l'entrefer, ou doit désigner un cercle à l'intérieur de celui ci pour de délimiter (figure III.16).

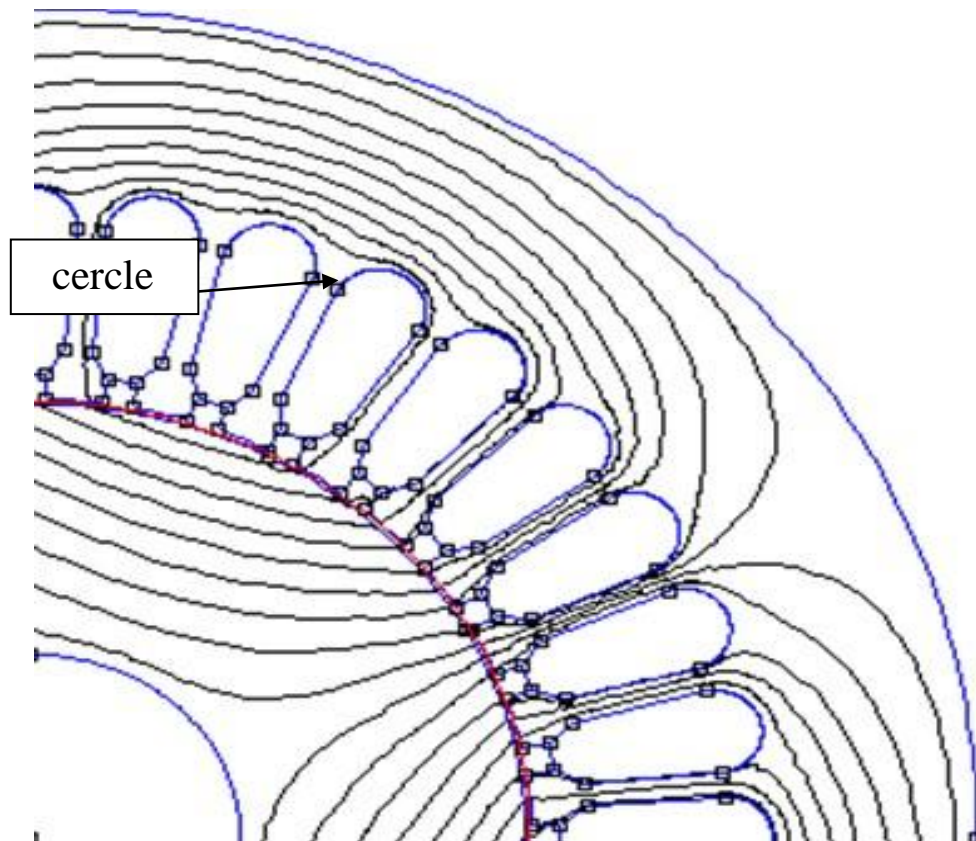
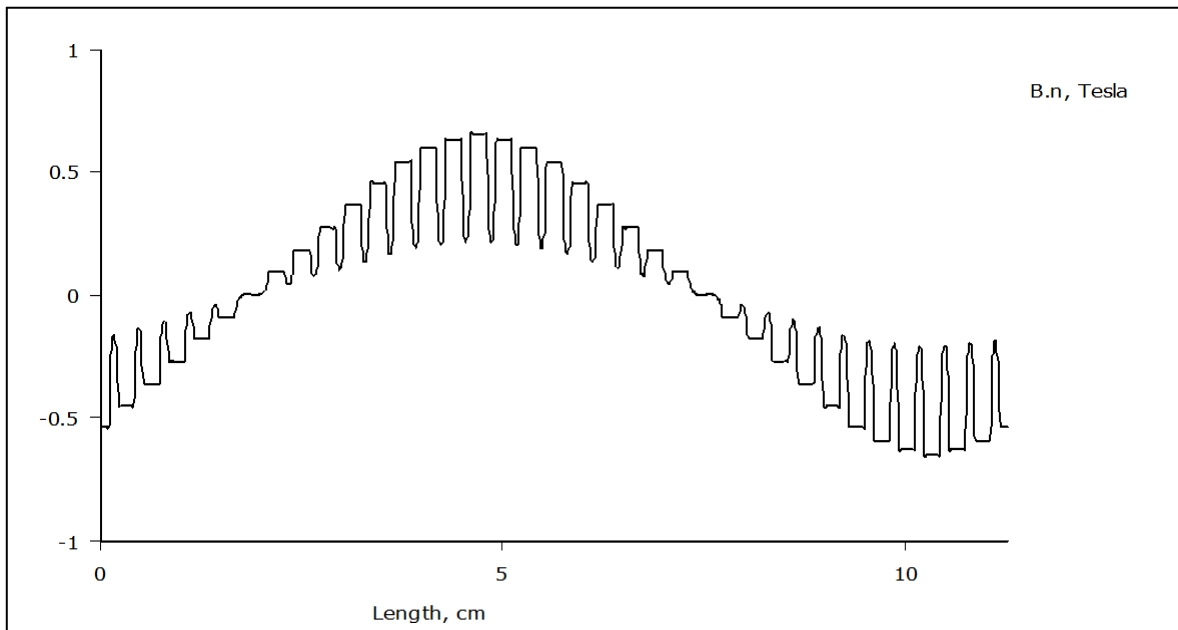
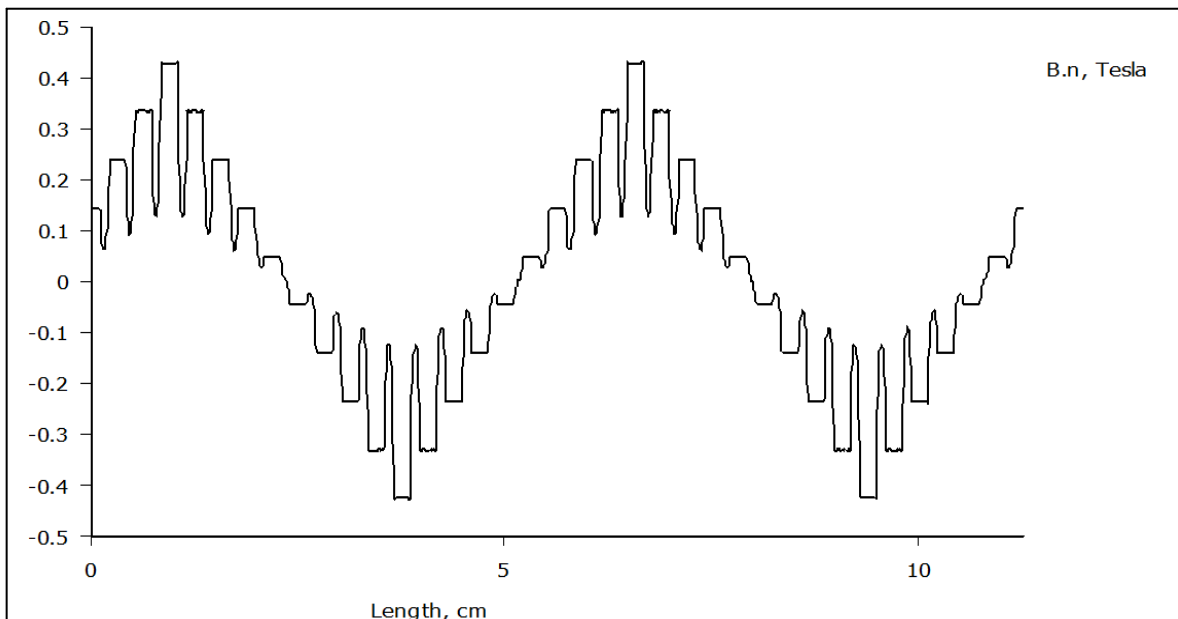


Fig.III.16 Désignation des limites du champ dans l'entrefer



a. (2p=2)



b. (2p=4)

Fig. III 17. Champ magnétique statorique dans l'entrefer

La figure III 17 montre clairement que plus on augmente le nombre d'encoche par pôle et par phase q , le nombre de pôle diminue, mais la courbe du champ s'améliore en se confondant plus à une sinusoïde parfaite. On remarque aussi les écroulements dans la forme du champ qui sont dus aux ouvertures d'encoche.

III .6.2- Modélisation du rotor (Aimants permanents en surface 2p=4):

Dans cette partie, nous modélisons un moteur avec un rotor de type Aimants permanents en surface 2p=4. Pour obtenir une meilleur forme du champ magnétique généré par les aimants permanents du rotor , nous choisissons un stator sans encoche et sans bobines avec juste du fer (M15). Nous limitons aussi notre étude juste avec des configurations de rotors (surface lisse du stator) à aimants permanents en surface à 2p=4. On remarque que la valeur maximale du champ magnétique se situe au niveau du centre des aimants et que sa valeur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'aimant jusqu'à ce qu'il devienne nul.

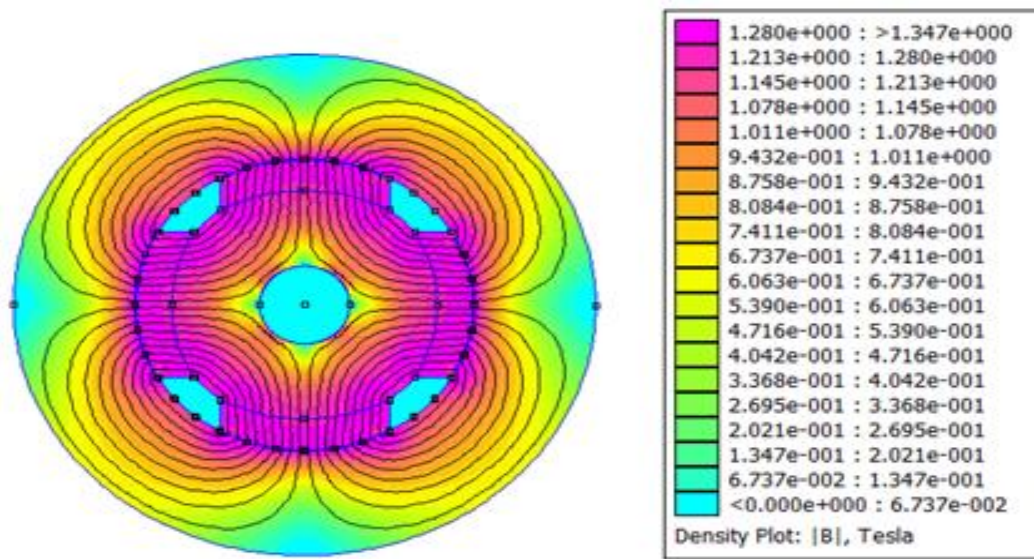


Figure III .18 : Cartographie des lignes de champ rotorique.

Sa valeur dans l'entrefer varie entre 0 et 1.28T dans un rotor à 4 pôles.

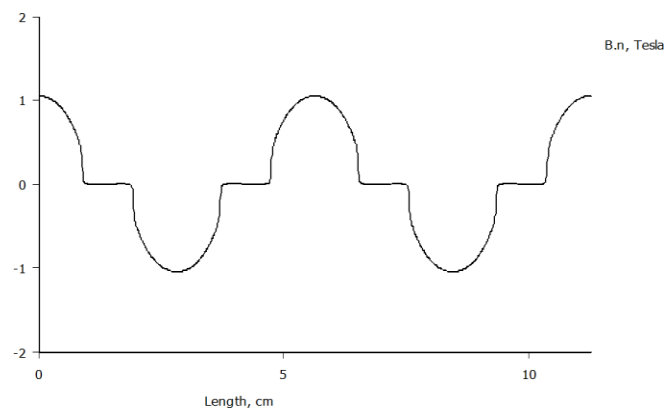


Fig. III 19. Champ magnétique rotorique .

Chapitre III : Application et modélisation d'une machine Synchrone à aimants permanents par le logiciel FEMM 4.2

On Remarque que la courbe ressemble à la forme sinusoïdale.

III .6.3- Forme du champ magnétique dans l'entrefer du MSAP:

On modélise ici le champ magnétique résultant de l'interaction dans champs statorique et rotorique pour une MSAP à 36 encoches et à rotor à aimants permanents inset ($2p=4$). Pour 2 cas de figure : marché à vide et à couple maximal (angle de charge 0° et 90° électrique)

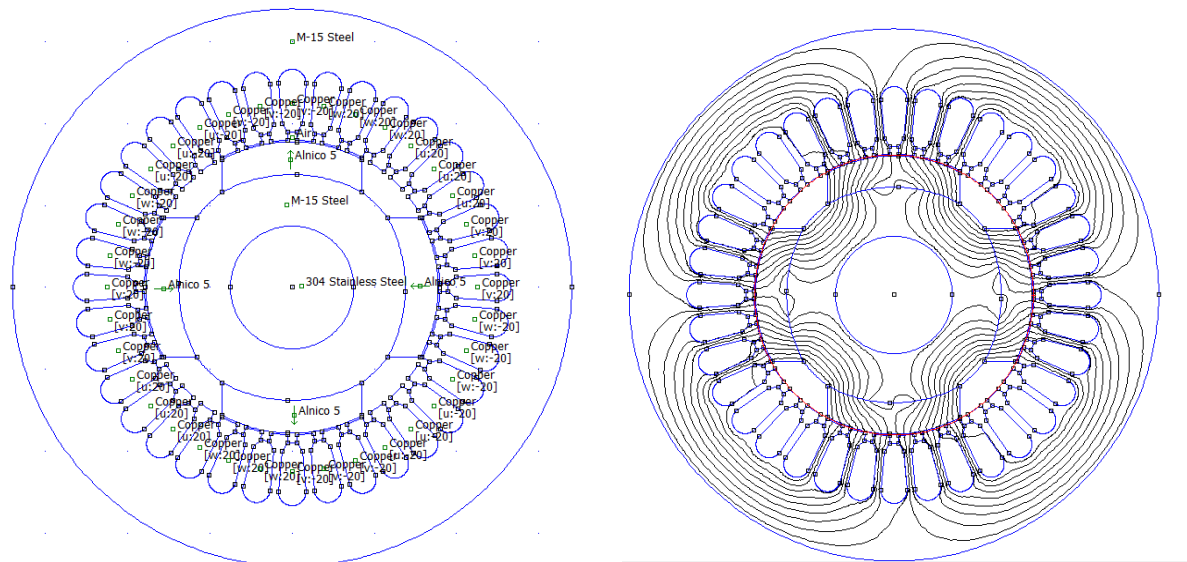
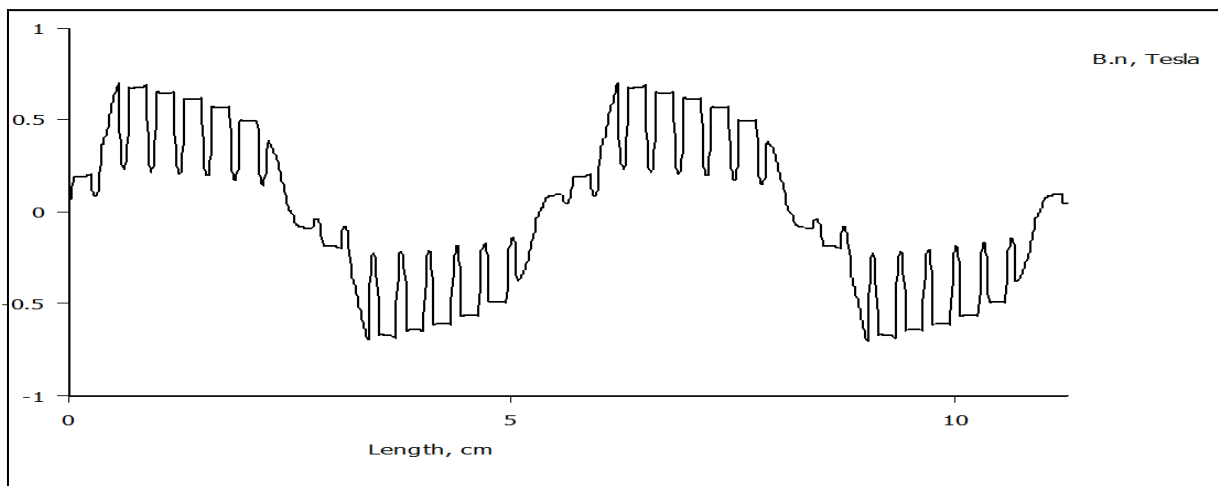
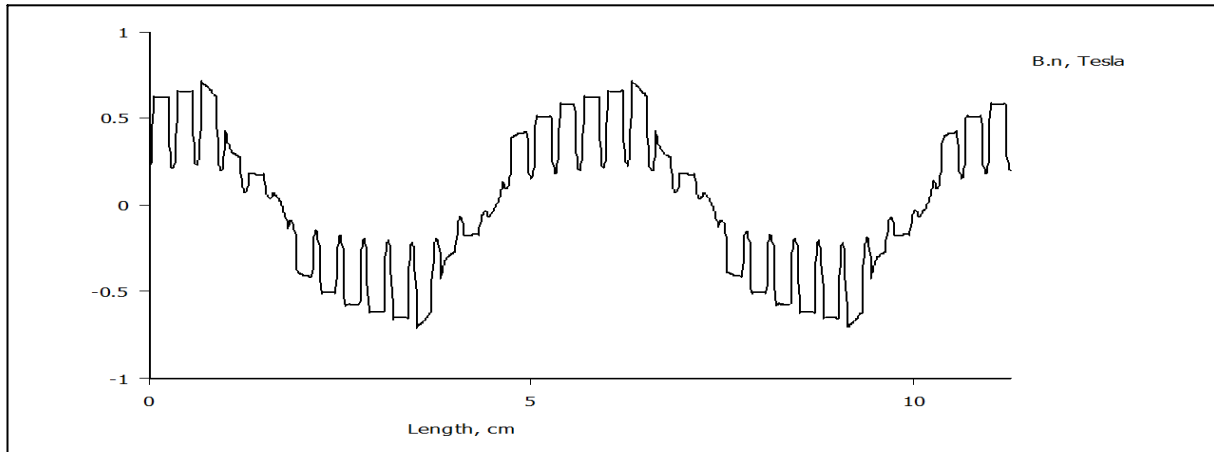


Figure III .20 : Matériaux utilisés et cartographie des lignes de champ du MSAP

Les figures suivantes montrent la forme d'ondes de la composante normale de l'induction magnétique B_n engendrée, dans l'entrefer du MSAP.



a. Angle de charge 0° (A vide)



b. Angle de charge 45°(mécanique soit 90° électrique)

Fig. III 21. Champ magnétique dans l'entrefer de MSAP.

On remarque que l'interaction du stator avec le rotor pour des angles de charge différents change la forme du champ magnétique.

III.7- Etudes des couples du rotor à aimants permanents inset « AlNiCo » :

Après modélisation du MSAP (AlNiCo 5) c-à-d. après aussi le paramétrage des courants statoriques, on simule son fonctionnement avec des différents angles de charge (pas des angles 5° allant de -90° électriques à +90°) pour mesurer la valeur du couple résultant T_d . On note nos résultats dans un tableau Excel pour ensuite tracer facilement la courbe du couple (Fig.III.20). Pour trouver les valeurs du couple réductant T_{drel} , on modélise cette fois le rotor en lui enlevant les aimants permanents et en mettant de l'air à la place. On refait par la suite la même procédure pour relever les valeurs du couple réductant (Fig.III.22). Enfin, selon la relation 1.6 on peut déduire le couple synchrone $T_{dsyn}=T_d-T_{drel}$ (Fig.III.22).

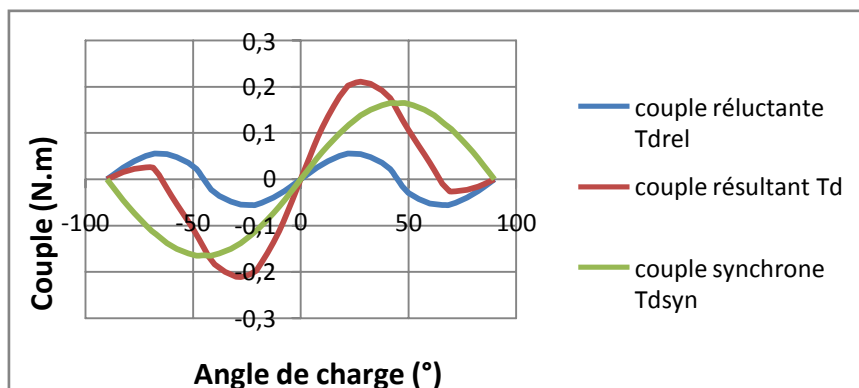


Fig.III.22 Caractéristiques couple-angle du MSAP inset « AlNiCo »

III.8- Courbe d'aimantation de l'AlNiCo et du NdFeB 52 MGOe

On trouve la courbe d'aimantation dans le logiciel FEMM, pour ça, il faut aller sur « **Propriétés / Matériaux** ». On choisit, par exemple, « **AlNiCo5** » la valeur du champ coercitif $H_c=50988A/m$ apparaît et on appuie sur « **plot B-H Curve** », on obtient des données sous forme de courbes (fig.III.23). Il suffit de refaire les mêmes étapes pour la courbe d'aimantation du NdFeB 52 MGOe (Fig.III.24), on trouve $H_c=891300A/m$.

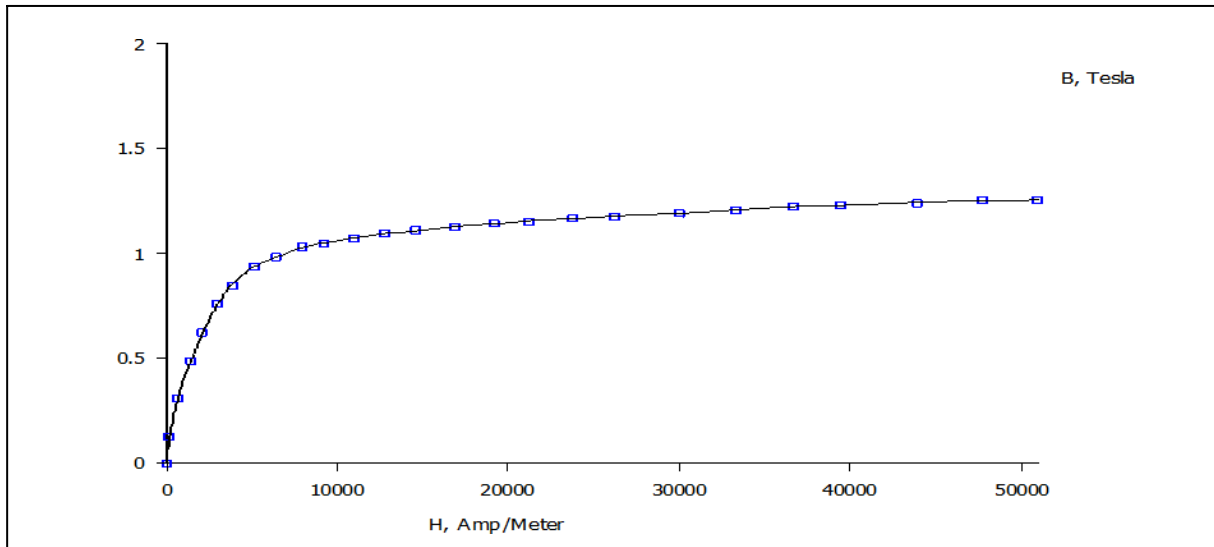


Fig.III.23. Courbe d'aimantation de l' AlNiCo5

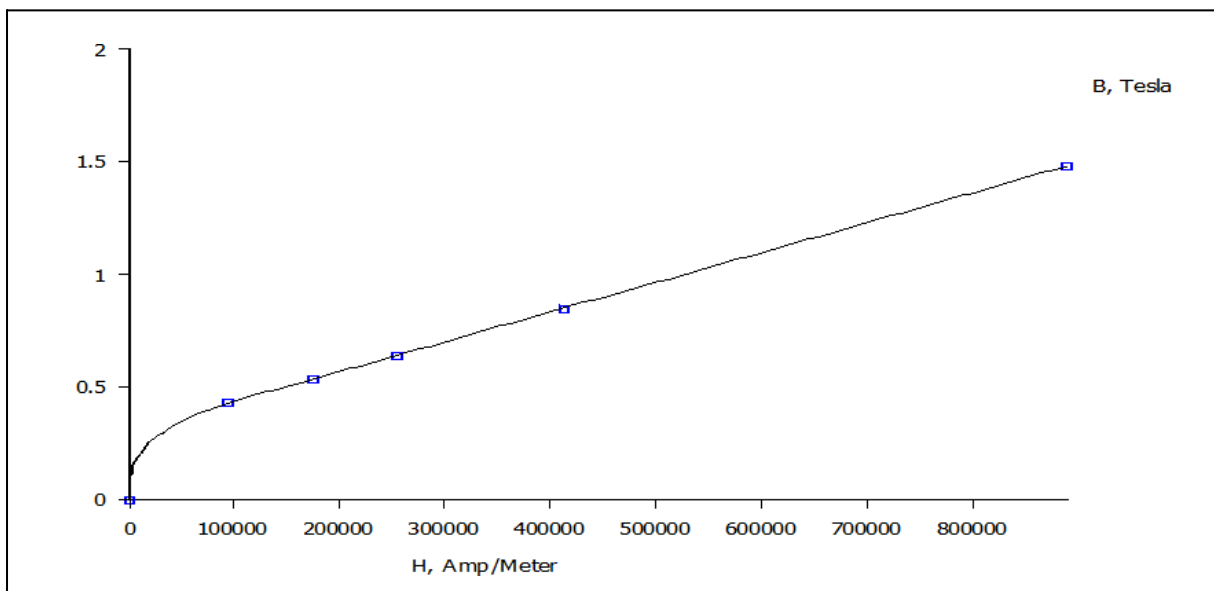


Fig.III.24. Courbe d'aimantation du NdFeB 52 MGOe

III.9- Comparaison des couples de charge T_d entre les MSAP "AlNiCo" et "NdFeB"

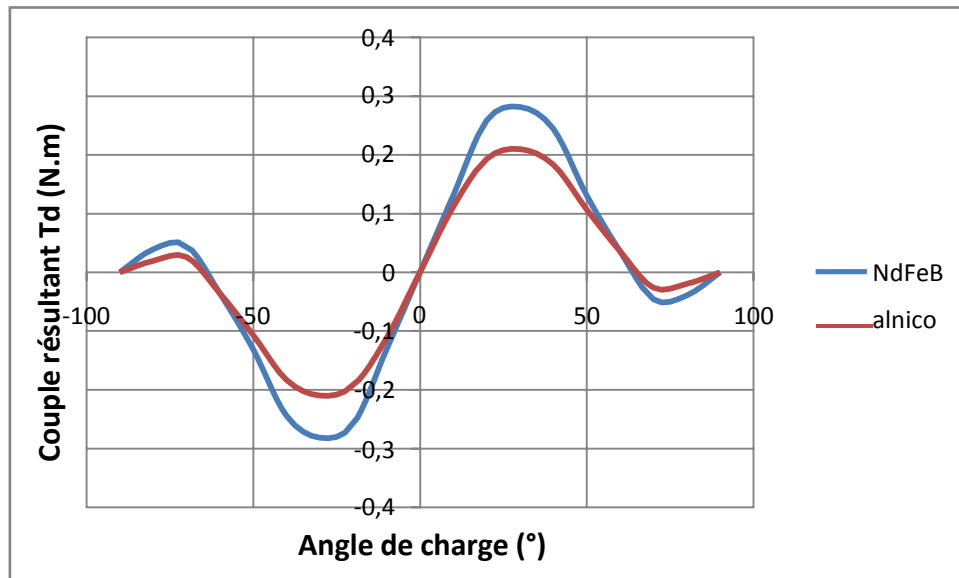
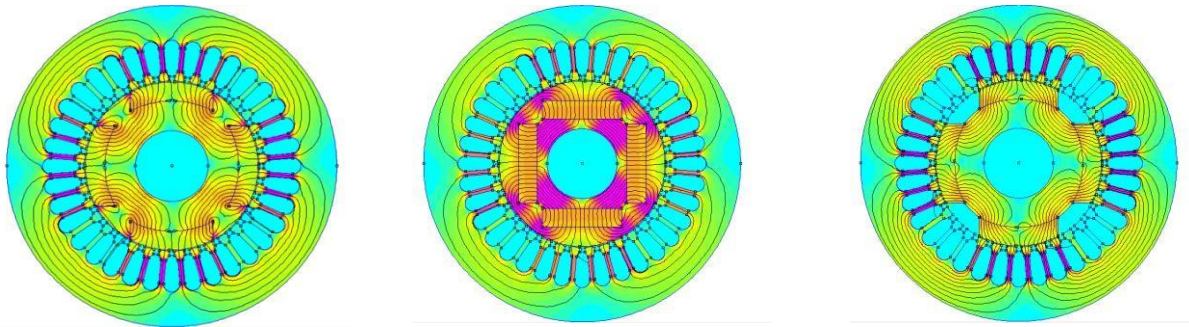


Fig. III.25 Couples résultants T_d de l'AlNiCo et du NdFeB

La figure III.25 montre les caractéristiques angle de charge/ couple pour 2 types de matériaux des aimants permanents (AlNiCo et NdFeB). On a remarqué que le couple maximal (T_d max) du NdFeB est supérieure au couple maximal de l'AlNiCo pour le même angle de charge. Cela est dû au champ produit par NdFeB 52 MGOe qui est supérieur au champ produit par l'AlNiCo.

III.10- Comparaison des couples entre les MSAP de différents type de configurations rotoriques:

On se propose d'étudier 3 différentes configurations rotoriques en fonctions de la position des aimants permanents (de mêmes volumes) pour comparer leurs couples. Les rotors sont à aimants inset, enterrés et en surface (Fig.III.26 a, b et c respectivement). La configuration statorique n'est pas changée.



a. à rotor à aimants inset

b. à rotor à aimants enterré

c. à rotor en surface

Fig.III.26. Différentes configurations rotoriques étudiées d'une MSAP

III.10.1--Comparaison des couples réductants (T_{drel}):

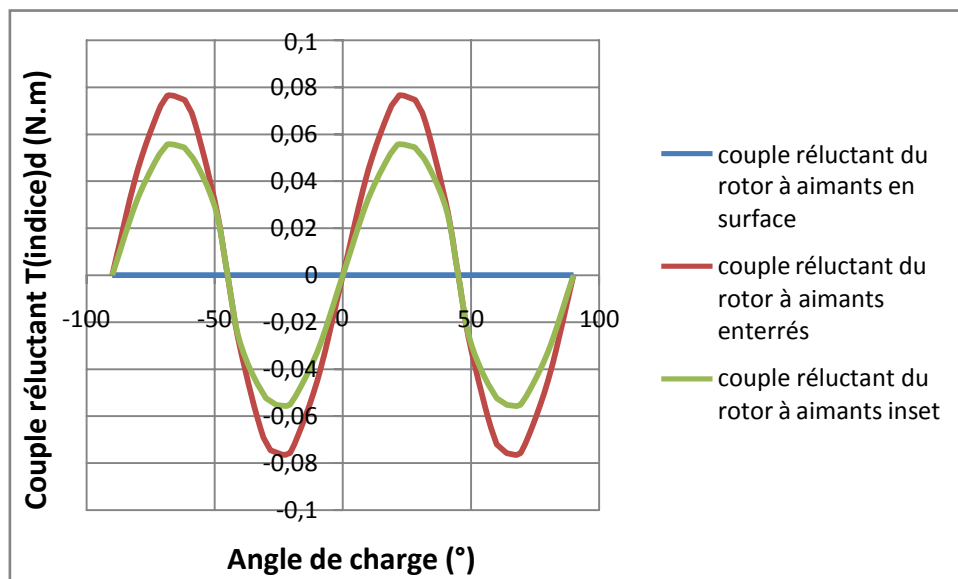


Fig. III.27. Couples réductants (T_{drel}) des trois types de rotor à aimants permanents

La Figure. III.27 montre le caractéristique angle de charge/ couples réductants pour les trois types de rotors à aimants inset, enterrés et en surface. On remarque que le couple réductant maximal ($T_{drelmax}$) du rotor à aimants enterrés est supérieur au couple réductant maximal ($T_{drelmax}$) du rotor à aimants inset et à aimants en surface pour le même angle de charge (pas des angles 5° allant de -90° électriques à $+90^\circ$). Pour relever ces caractéristiques, il suffit de mettre à la place des aimants permanents de l'air afin d'annuler les couples produits par les aimants et ne mesurer que les couples réductants produits par la saillance du fer rotorique. Les rotors à aimants inset et à aimants enterrés présentent une saillance du fer, donc produisent des couples réductants. D'après les résultats de notre simulation, on remarque que

le rotor à aimants enterrés génère un couple réductant supérieur au couple développé par le rotor à aimants inset. Le couple réductant développé par le rotor à aimants en surface est nul vu l'absence de saillance du fer

III.10.2-Comparaison de couple résultant T_d :

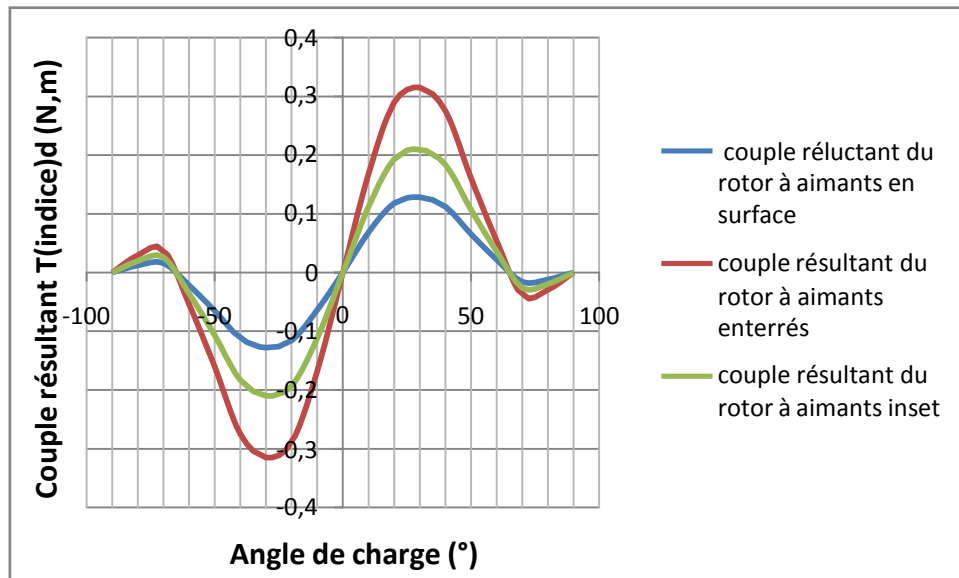


Fig. III.28. Couples résultants (T_d) des trois types de rotor à aimants permanents

La Figure. III.28 Montre les caractéristiques angles de charge/ couples résultants pour les trois types de rotors : à aimants inset, enterrés et en surface. On remarque que le couple résultant maximal (T_{dmax}) développé par le rotor à aimants enterrés est supérieure aux couples résultants maximaux des rotors à aimants inset et à aimants en surface pour le même angle de charge (pas des angles 5° allant de -90° électriques à $+90^\circ$). Les couples ont le même ordre de croissance que celui présenté dans le point précédent vu la présence des couples réductants des formes rotoriques à aimants enterrés et inset.

III.11-Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons maîtrisé l'utilisation du logiciel FEMM dans la modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents. Des études comparatives de différentes structures statoriques et rotoriques ont été exécutées. Dans le stator, une modélisation au niveau des encoches dans le choix important des sens et amplitudes des courants a été réalisée pour pouvoir évaluer la qualité du champ magnétique dans l'entrefer de notre machine. Dans le rotor, des simulations sur 3 trois différents types de configurations de notre moteur ont été menées pour l'évaluation des différents couples développés par le moteur, notamment sur les différents types d'aimants permanents (AlNiCo, NdFeB..) et sur les différentes formes rotoriques (différentes positions des aimants permanents dans le rotor).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion général :

Ce travail a été consacré à la modélisation par éléments finis d'un moteur synchrone à aimants permanents.

Un logiciel de calcul par éléments finis (FEMM) est utilisé pour simplifier l'étude sur la structure de la machine définie en deux dimensions sous forme graphique.

Dans le premier chapitre, nous découvrons le moteur synchrone à aimants permanents, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et l'importance de ces machines dans leur utilisation dans la traction des véhicules électriques pour leur densité de couple élevée et leur efficacité. Les résultats principaux de l'analyse proposée est de mettre en évidence le comportement des différents moteurs par leurs configurations rotoriques dans le changement du type de matériau des aimants permanents et de leurs différentes positions utilisé dans la partie rotorique.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons dans notre travail, la méthode des éléments finis pour modéliser un moteur synchrone à aimants permanents.

Dans le troisième chapitre à l'aide du logiciel FEEM, nous obtenons les résultats des études contribuant dans l'évaluation des couples développés par les différentes structures et des différents matériaux des aimants permanents dans le rotor. Nous modélisons aussi le bobinage statorique et montrons comment change la courbe du champ magnétique dans le cas de différentes polarités de l'enroulement. Nous proposons aussi 2 méthodes d'évaluation des champs statorique et rotorique en adoptant des structures lisses du fer pour pouvoir les évaluer séparément. Une modélisation de la machine pour l'évaluation du champ magnétique totale est réalisée.

Pour cela, une modélisation des phénomènes électromagnétiques dans la machine a été nécessaire. La méthode de résolution par éléments finis est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles.

**Références
bibliographies**

Références bibliographiques

Références bibliographies:

- [01] **A. BOUMEDIENE,** 'Commande de MSAP par backstepping', Mémoire de Master, UABBT, 2015.
- [02] **Mr. AOUICHA El Mahdi Mr. MAZOUZ Ahmed Mr. CHERIFI Abdessalem,** 'Modélisation Electromagnétique par Eléments Finis 2D d'une Machine synchrone à Aimant Permanent' Mémoire de Master, UMMTO, 2011.
- [03] **Guy Grellet, Guy Clere,** 'Actionneurs électriques'. Paris. Hermès Science Publications, 2000,
- [04] **Guy Sturtzer, Eddie Smigiel,** 'Modélisation et commande des moteurs triphasés'. Elipses Edition Marketing, S.A. 2000
- [05] **LAKHAL AMEUR** 'Etude et modélisation de la machine synchrone', Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de licence.
- [06] **Mr S. Bouras** 'Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable' Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister.
- [07] **B. Multon** 'les machines synchrones autopilotées' notes de cours : Ecole normale supérieure de Cochon, Aouton de Bretagne, 2004.
- [08] **Bernard, N.** 'Machine synchrone : de la boucle ouverte à l'autopilotage'. Ecole Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker Lann – 35170 BRUZ, Revue 3EI, n° 30, septembre 2002.
- [9] **G. LACOMBE,** 'Définition et Réalisation d'une Nouvelle Génération de Logiciels pour la Conception des Moteurs Futurs', Mémoire de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [10] **J. Saint-Michel,** 'Bobinage des machines tournantes à courant alternatif', Techniques de L'ingénieur, D3 420, 2001.
- [11] **D. Fodorean, A. Miraoui,** 'Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants Permanents (MSAP)', D3554 Techniques de l'ingénieur, Novembre 2009.
- [12] **L. Chédot,** 'Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents Internes à large espace de fonctionnement'. Application à l'alternateur-démarrateur, thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [13] **Gieras, Jacek F.** 'permanent magnet motor technology' © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC, Pp, 173, 177.

Références bibliographiques

- [14] **R. Ibtouen**, 'Contribution au dimensionnement électromagnétique d'une machine autopilotée à aimants insérés', Thèse de doctorat, ENP, Alger, avril 1993.
- [15] **Bernard MULTON**, 'Application des aimants aux machines électriques', notes de Cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan.
- [16] **Honsinger VB**, 'Permanent magnet machines: asynchronous operations'. IEEE Transe on PAS 99(4):1503–1509, 1980.
- [17] **R. Manajmy**, 'Contrôle stratégies and paramètre compensation for permanent magnet Synchrony motor drives', Doctor of philosophy in electrical engineering Blacksburg, Virginia 2000.
- [18] **ph. Lamelotr, J. Guezal**, 'Les aimant permanent rendent les moteurs économes', Technologie et innovations, 2007.
- [19] **M.Budinger, J, Liscouet, S. Oreux, J-Ch. Mare**, 'Etat de l'art sur la conception des systèmes D'actionnement électromécanique', note de cours, INSA Toulouse, 2008.
- [20] **G.L. Wojcik, D.K. Vaughan, N. Abboud, Jr. J. Mould**, 'Electromechanical modeling using explicit time-domain finite elements', IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings 1993, pp. 1107-1112.
- [21] **R. Lin, A. Haavisto, and A. Arkkio**, 'Validation of a Time-Harmonic Numerical Model for Solving Magnetic Field in End Region of a Radial-Flux Machine', IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 45, NO. 12, Décembre 2009.
- [22] **S. Ratnajeevan and H. Hoole**, 'Rotor motion 292-2295, November 1985'.
- [23] **Merzoug Med salah**, 'Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)', Pour Obtenir le diplôme de Magister en Électrotechnique, Université de Batna
- [24] **J. A. Farooq, A. Djerdir, and A. Miraoui**, 'Analytical Modeling Approach to Detect Magnet Defects in Permanent-Magnet Brushless Motors', IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, NO. 12, DECEMBER 2008, pp. 4599-4604.

Références bibliographiques

- [25] **J.Y. Lee, S.H. Lee, G.H. Lee, J.P. Hong, and J. Hur**, ‘Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor’, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 42, No. 4, APRIL 2006, pp. 1303-1306.
- [26] **CHETOUANE hocine, BENAMIRA antar**, ‘Etude paramétrique d’une machine synchrone à aimants’ Mémoire Master., Université de Jijel ,2018/2019.
- [28] **M. N. O. Saduki**, ‘A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems’, IEEE Transactions on education, vol.32, No. 2, May 1989.
- [29] **P. Silvester, M.V.K. Chari**, ‘Finite element solution of saturable magnetic field problems’, IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-89, N° 7, Sept /Oct 1970.
- [30] **J. Pedro, A. Bastos, N. Sadowski**, ‘Electromagnetic modeling by finite element methods’, Library of Congress cataloging in publication data, 2003.
- [31] **G. Dhatt, D. Touzot**, ‘Une présentation de la méthode des éléments finis’, Editions Maloinés, Paris, 1984.
- [32] **Stéphane Baron**, ‘Outils pédagogique pour l’apprentissage des méthodes numériques’ Mémoire pour obtenir le diplôme de recherche technologique en génie électrique et systèmes technologiques en génie électrique et systèmes intelligents, Université de Picardie Jules Verne, 2001.
- [33] **Mémoire Master**, ‘Simulation par la Méthode des éléments finis d’une machine synchrone à aimant permanent [MSAP]’, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021/2022.
- [34] : **HAMDI Seyf Eddine**, ‘Modélisation d’une machine asynchrone par logiciel COMSOL – Multiphysics’, Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2018 in the dynamic finite element analysis of rotating electrical machinery”, IEEE Trans. On Magnetism, Vol. MAG-21, No.6, pp.2
- [35] **M. Feliachi**, ‘Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finis en vue d’une modélisation dynamique des machines électriques, thèse de docteur ingénieur, conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), Université de Paris VI, Janvier, 1981.

Références bibliographiques

[36] **Gieras, Jacek F.** 'permanent magnet motor technology' © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC ,Pp,173,177.

[37] **Z. Makni**, 'Contribution au Développement d'un Outil d'Analyse Multiphysique pour la Conception et l'Optimisation d'Actionneurs Électromagnétiques', thèse de doctorat, université Paris-Sud XI, 12 décembre 2006.

[38] **M. Rachek**, 'Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault ', thèse de doctorat, UMMTO, 2007.

[39] **G. Dhatt, G. Touzot, E. Lefrançois**, 'Méthode des éléments finis', Editions Germes, Lavoisier, Paris, 2005.

[40] **Y. Boutora**, 'Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents avec la méthode des éléments finis', thèse de doctorat, ENP, Alger, 2007.

[41] **E. Chauveau**, 'Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones ', thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2001.

[42] **D. Mushamalirwa, N. Germy, J.C. Steffens**, 'A 2-D finite element mesh generator for thermal analysis of underground power cables ', IEEE Transactions on Power Delivery, vol.3, No. 1, January 1988, PP. 62-68.bn

[43] Rubrique aide FEMM