



---

Department de Genie Technique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique

Présenté par :

BELOULHI Samia, & DHOUADI Hasna

### Thème

---

---

**TECHNOLOGIES DE FABRICATION DES ARMATURES  
(ENTREFER) DES SYSTEMES D'AIMANTATION DES  
MOTEURS ELECTRIQUES**

---

---

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
BEDDA Abdelmalek	MAA	Président
FARSI CHOUKI	MCA	Encadreur
ARSLANE Moustapha.	Docteur	Examineur

*Année Universitaire : 2021 / 2022*

N° d'ordre : GM/... ..... /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ***Remerciements***

*D'abord et avant tout, je dois remercier le Dieu le tout puissant de nous avoir donné la patience, la force et la volonté afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.*

*Nous remercions tous les enseignants du département de génie mécanique de l'université de M'sila qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*Aussi remercions notre encadreur Mr FARSI CHOUKI de nous avoir fait confiance et de nous avoir suivis de près pendant toute la durée de notre travail.*

*Nous tenons à remercier également les membres de l'administration des départements de génie mécanique et de la faculté qui ont participé dans ce travail avec leurs conseils,*

*Aussi je tiens à remercier tous Le personnel du stage*

***Merci à tous***

## *Dédicace 1*

*On dédie ce travail :*

*A la mémoire de  
nos parents*

*A nos familles*

*A tous nos aimables amis.*

BELOULHI Samia,

## *Dédicace 2*

*A mes chers parents*

*A Mes chers*

*frères et sœurs*

*A toute ma*

*famille*

*A tous mes aimables amis.*

DOUADI Hasna

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقديم مقترحات حول عمليات التصنيع أو الألواح أو الصفائح المعدنية المقطوعة بالأشكال المرغوبة من الدورات أو ساكن المحركات الكهربائية وأشكالها، بالإضافة إلى أنظمتها لتثبيت هذه الألواح معًا. إنها دراسات حول الفوائد؛ عيوب ... اعتمادًا على تطبيق هذه الألواح في المحركات من أنواع مختلفة وعلى تأثير العوامل الميكانيكية والمعلمات المغناطيسية للألواح المغناطيس المجاورة، سواء كانت دارة أو ساكن

يتم تقديم هذه العوامل الميكانيكية كما هو موضح في هذه الرسالة من خلال الخصائص في المقام الأول للمعدن المستخدم في تصنيعها، على سبيل المثال الفولاذ الخفيف والحصول عليه بالانصهار مبدأ المعالجة الحرارية لضمان التأثيرات والأداء المغناطيسي وقبل كل شيء لعمر خدمة طويل. كما يوجد عامل شكل خطوط التدفق وتوزيعها حسب حركة المحرك أو الآلات الكهربائية.

إن مساهمة هذه الذاكرة في التطبيقات الصناعية لها مزايا استراتيجية استخدام التقنيات للحصول على أشكال الألواح والمواد الجديدة، من أجل الوصول إلى تأثيرات كهرومغناطيسية مريحة وفعالة للغاية لتصنيع الدورات والساكن

في هذه الأطروحة يمكننا القول إننا فتحنا منظورًا حول تقنية جديدة لعمليات تصنيع فجوات الهواء في الدورات والساكن التي لها أهمية كبيرة خاصة في التحكم في المجالات المغناطيسية، في مفهومها جودة المنتج النهائي ضروري ومع ذلك فإنه يوفر ضمان جودة عالية جدًا للمحركات الكهربائية

اتخذ هذا العمل خطوة إلى الأمام لطلاب الجيل القادم لإجراء بحث متعمق في هذا المجال وهو أمر مهم للغاية بالنسبة للصناعة الجزائرية

## Résumé

L'objectif de ce travail est de faire des propositions sur les procédés de FABRICATION, des plaques ou feuilles métalliques coupées sous les formes voulus des rotors ou des stators des moteurs électriques et leurs formes, ainsi que leurs systèmes de fixation de ces plaques entre elles. C'est des études sur les avantages ; inconvénients...suivant l'application de ces tôles dans les moteurs de différents types et sur l'influence des facteurs mécaniques et paramètres magnétiques de ces plaques jointives d'aimantation, soit des rotors ou des stators.

Ces facteurs mécaniques comme c'est expliqué dans ce mémoire se présentent par les propriétés en premier lieu du métal utilisé pour leur fabrication par exemple des aciers doux et leurs obtentions par fusion. Le principe de traitement thermique pour assurer les effets et rendement magnétique et surtout pour une longue durée de service. Il y a aussi le facteur de formes des lignes du flux et ces distributions selon le mouvement des moteur ou machines électriques.

La contribution de ce mémoire dans les applications industrielles possède des avantages de la stratégie de l'utilisation des technologies pour l'obtention des formes de tôles et nouveaux matériaux, afin d'atteindre des effets électromagnétiques très rentables et efficaces pour la fabrication des rotors et stators

Dans ce mémoire, on peut dire qu'on a ouvert une perspective sur une nouvelle technique des procédés de fabrication des entrefers des rotors et stators qui à une grande

importance surtout dans la maîtrise des champs magnétiques, dans son concept la qualité du produit fini est essentielle et elle offre néanmoins la garantie d'une très haute qualité des moteurs électriques.

Ce travail a fait un pas en avant pour les étudiants de la prochaine génération pour procéder à des recherches profondes dans ce domaine qui est très importants pour l'industrie algérienne.

### **Abstract**

The objective of this work is to make proposals on the MANUFACTURING processes, plates or metal sheets cut in the desired shapes of rotors or stators of electric motors and their shapes, as well as their systems for fixing these plates together. It's studies on the benefits; disadvantages... depending on the application of these sheets in motors of different types and on the influence of the mechanical factors and magnetic parameters of these adjoining magnetization plates, either rotors or stators.

These mechanical factors as explained in this thesis are presented by the properties in the first place of the metal used for their manufacture, for example mild steels and their obtaining by fusion. The principle of heat treatment to ensure the effects and magnetic performance and above all for a long service life. There is also the form factor of the lines of the flux and these distributions according to the movement of the engine or electric machines.

The contribution of this memory in the industrial applications has advantages of the strategies of the use of technologies for obtaining the forms of sheets and new materials, in order to reach very profitable and effective electromagnetic effects for the manufacture of the rotors and stators

In this thesis, we can say that we opened a perspective on a new technique of the manufacturing processes of the air gaps of the rotors and stators which has a great importance especially in the control of the magnetic fields, in its concept the quality of the finished product is essential and it nevertheless offers the guarantee of a very high quality of electric motors.

This work has taken a step forward for the students of the next generation to carry out in-depth research in this field which is very important for the Algerian industry.

## Table des Matières

Introduction Générale.....	13
Chapitre I : GENERALITE SUR LES MOTEURS ELECTRIQUES	
I.1. Introduction.....	15
I.2. Historique.....	16
I.3. Les différents types de moteurs électriques.....	16
I.3.1 Moteur Électrique à Courant Continu.....	16
I.3.2. Moteur Électrique Universel .....	17
I.3.3. Moteur Électrique Asynchrone .....	17
I.3.4. Moteur Électrique synchrone.....	18
I.3.5. Moteur à réluctance variable .....	18
I.3.6. Moteur pas à pas.....	18
I.3.7. Moteurs linéaires.....	18
I.4. Les différentes structures envisageables.....	19
I.4.1. Systèmes utilisant un moteur asynchrone .....	19
I.4.2. Systèmes utilisant un moteur à courant continu .....	20
I.4.3. Systèmes utilisant un moteur synchrone .....	21
I.4.4. Systèmes utilisant un moteur synchrone à réluctance variable .....	24
I.4.5. Systèmes utilisant un moteur asynchrone (MAS) .....	25
I.4.6. <i>Systèmes utilisant un moteur à courant continu (MCC)</i> .....	26
I.4.7. Systèmes utilisant un moteur synchrone (MS).....	26
I.4.8. Systèmes utilisant un moteur à réluctance variable (MRV).....	27
I.5. Les composants magnétiques en électronique de puissance.....	28
I.5.1. Constitution.....	28
I.5.2. Circuit magnétique.....	29
I.5.3. Les matériaux magnétiques.....	29
I.5.4. Entrefer.....	29
I.5.5. Le bobinage.....	30
I.5.6. L'effet de peau.....	30
I.5.7. Effet de proximité.....	31
I.5.8. Effets dû aux entrefers.....	32
I.6. Choix du type de bobinage .....	33

## Chapitre II : EFFET DE L'ANISOTROPIE SUR LES TOLES

II.1.Introduction.....	35
II.2 Les noyaux magnétiques .....	35
II.2 .1 Effet de l'anisotropie sur les tôles .....	35
II.2.2 Applications pour les moyennes puissances .....	36
II.2.3 Description et propriétés pertes par courant de Foucault .....	37
II.2.4 les champs tournants dans les joints des transformateurs.....	38
II.2.5 Forme des noyaux.....	40
II.3. Les matériaux magnétiques .....	41
II.3.1 Les lignes du champ magnétique :.....	41
II.3.2 Aciers doux .....	43
II.3.2.1 Circuits magnétiques.....	44
II.3.2.2 Caractéristique B(H) d'un matériau magnétique .....	44
II.3.3 Pertes magnétiques .....	46
II.3.3.1 Pertes par hystérésis.....	46
II.3.3.2 Pertes par courants de Foucault.....	46
II.3.4 Définition, rôle et constitution.....	47
II.4 Haut fourneau .....	48
II.4.1 Définition .....	48
II.4.2 Constitution et fonctionnement .....	48
II.4.3 Installations périphériques .....	49
II.4.4 Installations annexes .....	50
II.4.5. Traitement du laitier.....	51
II.4.6. Évolutions récentes ou à venir .....	51
II.5 Matériaux ferromagnétiques durs .....	52
II.5.1.Caractéristiques d'un ferromagnétique dur.....	53

II.5.1.1. Cycle d'hystérésis.....	53
II.5.1.2 Propriétés magnétiques.....	54
II.5.2 Origine microscopique.....	55

### **Chapitre III : POBLEMATIQUE**

III.1. Introduction .....	59
III.2.1.Problèmes magnéto-mécanique des feuilles métalliques d'un rotor.....	59
III.2.2. Exemple de modélisation par réluctances du flux dans l'entrefer d'une machine à rotor à aimants en surface .....	60
III.2.3. Position du problème.....	60
III.3. Exemple du choix de la méthode de modélisation .....	61
III.3.1. Réduction du problème .....	61
III.4. Modèle a flux radial.....	62
III.4.1. Présentation du modèle .....	62
III.4.2. MODELE A FLUX INCLINÉ.....	64
III.4.2.1. Analyse de l'écart.....	64
III.4.2.2. Nouveau modèle à flux incliné .....	65
III.5. Différentes constitutions des entrefers .....	66
III.5. 1.Mise en équation : cas parfait.....	66
III.5.2. Circuit magnétique avec entrefer.....	67
III.6. Maintenance et perspectives des moteurs électriques.....	67
III.6.1 Moteurs électriques entretien et maintenance .....	67
III.6.2 Effectuez une analyse des vibrations.....	68
III.6.3. Exigez des moteurs mécaniquement équilibrés.....	70
III.6.4 Stockez les moteurs de manière appropriée.....	70
III.6.5. Tournez les arbres des moteurs stockés.....	70
III.6.6 On doit conservez les roulements dans leur emballage d'origine.....	70
III.6.7 On doit tournez les roulements lors du stockage.....	70
III.6.8 On doit Remplacez les roulements par des modèles identiques.....	70
III.6.9 On ne doit jamais lavez les roulements neufs.....	70
III.6.10. Manipulez avec précaution .....	71
III.6.11. Effectuez l'inspection avec soin.....	71

III.6.12. Évitez une surchauffe.....	71
III.6.13. Utilisez les outils adaptés.....	71
III.6.14. Faites attention à l'installation à froid des roulements.....	71
III.6.15. Une lubrification appropriée est ESSENTIELLE.....	71
III.6.16. Adoptez des pratiques de lubrification appropriées.....	71
III.6.17. Respectez scrupuleusement les tolérances d'alignement.....	71
III.6.18. Mettez en œuvre les bonnes pratiques en matière d'entretien.....	72
III.7. CONCLUSIONS.....	72

## Liste des figures

### **Chapitre I : GENERALITE SUR LES MOTEURS ELECTRIQUES**

<b>Fig. I.1-</b> Structure du moteur-roue asynchrone développé par GEC Alstom pour un bus hybride..	20
<b>Fig. I.2:</b> intégration d'un moteur à courant continu inversé dans la roue arrière d'un vélo électrique.	
<b>Fig. I.3</b> structure schématique du moteur synchrone à aimants, à flux axial et à enroulements dans l'entrefer, développé pour le véhicule AURORA.....	23
<b>Fig. I.4</b> moteur-roue développé par le LEEI pour la traction d'un véhicule solaire.....	24
<b>Fig. I.5</b> structure d'un moteur-roue hybride et à flux axial.....	25
<b>Fig. I.6</b> structure géométrique du rotor et du stator d'un moteur synchrone sans balais à structure inversée.....	28
<b>Fig. I.7</b> Energie stockée en fonction de l'entrefer.....	29
<b>Fig. I.8</b> Effet de peau. ....	31
<b>Fig. I.9</b> Effet de proximité.....	32
<b>Fig. I.10</b> Effet dû aux entrefers. ....	33
<b>Fig. I.11:</b> Représentation des connexions des bobines pour une machine triphasée $p = 4$ et $q = 1$ dans le cas d'un bobinage à pas diamétral et en double couche. ....	34

## Liste des figures

### Chapitre II :

Fig. II .1 : Comparaison de la structure magnétique par des noyaux magnétiques discrets et le noyau magnétique intégré.....	37
Fig. II .2: Section d'un entrefer : Le feuilletage permet de réduire les pertes par courants de Foucault.....	37
Fig. II .3 Tôles de transformateur ou d'inductance.....	38
Fig. II.4 Exemple de circuit magnétique de transformateur triphasé construit par empilage de segments. Les flèches doubles indiquent les directions de facile aimantation des tôles G.O.....	40
Fig. II .5 Détail des lignes d'induction dans la région à la jonction colonne centrale-culasse, à l'instant où le flux total $\Phi_2$ s'annule dans la colonne centrale.....	40
Fig. II .6 Deux surfaces couplées magnétiquement.....	41
Fig. II .7 Deux surfaces couplées magnétiquement avec un matériau magnétique.....	42
Fig. II .8 Relation B(H) du vide.....	45
Fig. II .9 Courbe hystérésis typique.....	46
Fig. II .10 Noyau lamine.....	47
Fig. II .11 a) bobine b) Lignes de champ magnétique.....	47
Fig. II .12 Les différentes parties du haut fourneau.....	49
Fig. II .13 Plan incliné pour bennes téléphériques aux hauts-fourneaux de Völklingen.....	50
Fig. II .14 Cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique dur.....	53
Fig. II .15 caractéristique magnétique B(H) d'un matériau ferromagnétique doux.....	54
Fig. II .16 Courbe caractéristique de l'aimantation d'un aimant permanent en fonction du champ qui lui est appliqué.....	54

## Liste des figures

### Chapitre III :

Figure III.1 : Déplacement des plaques rotorique par rapport a leurs places initiales.....	59
Figure III.2 : Vide et déplacement verticale entre les plaques metalliques d'aimantation....	60
Figure III.3 : Machine réduite modélisée.....	62
Figure III.4 : Modèle de circulationdu flux entre les dents stator.....	63
Figure III.5 :Modèle de circulation du flux au bord des aimants.....	63
Figure III.6 :Circulation du flux simuée aux éléments finis.....	64
Figure III.7 : inclinaison du flux dans l'entrefer.....	65
Figure III.8 : Chemins de flux du modèle à flux incliné avant transformation.....	65
Figure III.9 :Schéma de contitution d'un entrefer.....	66
Figure III.10 :Circuit magnétique dans le cas parfait.....	67
Figure III.11 : Théorème d'Ampère pour un circuit magnétique avec entrefer.....	67
Figure III.12: stator en cours de bobinage .....	68
Figure III.13: stator (vue d'ensembl).....	68
Figure III.14: Rotor à barres d'aluminium.....	69
Figure III.15 : Rotor à barres de cuivre.....	69
Figure III.16 : Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble).....	69
Figure III.17 : Cage d'écureuil en aluminium.....	69



## Introduction Générale

Les Ces facteurs mécaniques comme c'est expliqué dans ce mémoire se présentent par les propriétés en premier lieu du métal utilisé pour leur fabrication par exemple des aciers doux et leurs obtentions par fusion. Le principe de traitement thermique pour assurer les effets et rendement magnétique et surtout pour une longue durée de service. Il y a aussi le facteur de formes des lignes du flux et ces distributions selon le mouvement des moteur ou machines électriques.

La contribution de ce mémoire dans les applications industrielles possède des avantages de la stratégie de l'utilisation des technologies pour l'obtention des formes de tôles et nouveaux matériaux, afin d'atteindre des effets électromagnétiques très rentables et efficaces pour la fabrication des rotors et stators

Dans ce mémoire, on peut dire qu'on a ouvert une perspective sur une nouvelle technique des procédés de fabrication des entrefers des rotors et stators qui à une grande importance surtout dans la maîtrise des champs magnétiques, dans son concept la qualité du produit fini est essentielle et elle offre néanmoins la garantie d'une très haute qualité des moteurs électriques.

Les machines tournantes sont connues comme des équipements de base, que l'on trouve souvent dans divers domaines de la technologie moderne, tels que les installations industrielles (thermique, nucléaire, procès...), le transport terrestre, le transport maritime et l'aviation. Ils se composent de deux éléments principaux, la partie fixe s'appelle le stator et la partie tournante s'appelle le rotor.

Un rotor est un élément tournant autour d'un axe fixe. Le champ d'application des rotors est vaste, nous les trouvons dans les satellites géostationnaires animés d'une rotation libre, dans les machines tournantes industrielles qui constituent des structures assez complexes à analyser. Le rôle principal des rotors est de transformer un mode d'énergie selon les applications auxquelles ils sont destinés (l'aéronautique, l'industrie pétrolière, centrale électrique et hydraulique, l'industrie électronique et pharmaceutique...etc.), ils sont souvent composés de plusieurs tronçons et soumis à des sollicitations d'origines diverses.

Cependant, les tendances actuelles visent à développer des rotors plus légers et donc plus flexibles pouvant atteindre des vitesses très élevées afin de minimiser le rapport puissance / poids et de contrôler l'équilibre des vitesses de fonctionnement ainsi que de minimiser les jeux avec le stator et le rotor pour avoir une meilleure durée de vie et une meilleure fiabilité en service.

Dans un sens plus large, la dynamique du rotor couvre plusieurs sujets, à savoir la modélisation, l'analyse, la mesure, traitement du signal, identification, surveillance de l'état et contrôle des systèmes de roulement de rotor. La modélisation et l'analyse de la dynamique des paliers rotorique sont maintenant parvenues à maturité. La méthode des éléments finis (FEM) et la méthode de la matrice de transfert (TMM) ont été largement utilisées pour la modélisation et les analyses de systèmes de rotor. Jusqu'à aujourd'hui, la surveillance de l'état des systèmes de roulement de rotor basée sur les vibrations était principalement concernée par la détection et le diagnostic des défauts basés sur les fonctionnalités.

Le but de ce cours est de donner une compréhension de base des phénomènes de dynamique du rotor à l'aide de quelques simples rotors modèles et méthodes d'analyse modernes pour les systèmes de rotor réels.

Le contenu sera utile et servira d'ouvrage de référence pour poursuivre la recherche et le développement dans le domaine de la dynamique du rotor. Il comprend cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les rotors et donne un développement historique du sujet à travers les problèmes rencontrés dans le domaine dans en plus des progrès globaux qui ont été accomplis et les caractéristiques cinématique d'un rotor.

Le second chapitre présente les modèles simples des rotors.

Le troisième chapitre présente la modélisation des systèmes des rotors et présente les formulations mathématiques des équations de mouvement de la dynamique des rotors flexibles.

Le quatrième chapitre présente le développement de la modélisation par éléments finis. Dans celui-ci on présente la procédure et les moyens pour faire une étude précise de l'analyse du comportement vibratoire des arbres ou des rotors avec un exemple de modèle de rotor pour montrer le montage de la matrice globale. Dans le cinquième chapitre, on développe la simulation numérique du comportement dynamique d'un rotor par élément finis en utilisant le code de calcul ANSYS WORKBENCH.

# Chapitre I.

## Chapitre I. GENERALITE SUR LES MOTEURS ELECTRIQUES :

### I. 1. Introduction :

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer. Le travail de chaque moteur électrique se base sur son **système d'aimantation** c'est pourquoi qu'on a trouvé utile de toucher la constitution et le principe de fonctionnement de quelques types de ces moteurs. Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie et au-delà d'une certaine puissance dans les applications du bâtiment tertiaire. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre d'applications, l'emploi de matériels électroniques en constante progression élargit leur champ d'application. C'est le cas pour contrôler le démarrage et l'arrêt avec les démarreurs-ralentisseurs progressifs, comme lorsqu'un réglage précis de la vitesse est également nécessaire avec les variateurs-régulateurs de vitesse.

Toutefois, les moteurs asynchrones à bagues sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie et les moteurs asynchrones monophasés restent adaptés pour des applications de puissances limitées plutôt pour les applications du bâtiment

L'utilisation des moteurs synchrones dits sans balais ou à aimants permanents associés à des convertisseurs se généralise dans les applications nécessitant de fortes performances, notamment en couple dynamique (au démarrage ou aux changements de régime), et en précision et plage de vitesse.

C'est une machine électrique ou un dispositif électromécanique basé sur électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

Les machines électriques (moteurs) produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.

Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur ».

## **I.2.HISTORIQUE :**

Depuis de nombreuses années les humains s'intéressent aux phénomènes électriques, comme Thalès de Millet, qui, en 600 avant J-C, découvrit que de l'ambre frottée attire les fétus de paille (ambre se dit *électron* en grec d'où le mot *électricité*). Cependant, c'est en 1800 qu'apparut la première « pile électrique », créée par Alessandro Volta, au moyen de rondelles de cuivre et de zinc ainsi que des rondelles de tissus imbibés d'acide.

20 ans plus tard, le Danois Hans Oersted découvre qu'un courant électrique dévie une aiguille aimantée, expérience qui permettra à André-Marie Ampère d'écrire ses lois sur l'électromagnétisme. En 1934, Thomas Davenport invente le premier moteur électrique, qui fut commercialisé mais qui n'eut que très peu de succès à cause du prix très élevé des batteries. En 1859, Gaston Planté invente l'accumulateur électrique, afin de prolonger la durée de vie des batteries en les rechargeants. En 1868, l'électricien belge Zénobe Gramme invente la dynamo, qui permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Puis, en 1873, son associé français Hippolyte Fontaine montre lors de l'exposition universelle de Vienne une deuxième machine, qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, reliée à la première par des fils électriques et qui permet donc la transmission électrique d'une force. Ce fut le premier moteur électrique commercialisé et utilisé dans l'industrie.

A partir de 1887, Nikola Tesla invente le moteur à courant alternatif (asynchrone), qui est toujours utilisé aujourd'hui dans les transports et dans l'électroménager. Plus tard, les travaux de Charles Concordia, Edith Clark et Robert H. Park ont ouvert la voie aux méthodes modernes de contrôle du couple et de la vitesse des machines synchrones et asynchrones, appelés contrôle vectoriel. Ces théories ont été mises en application à partir des années 1980 et ont donné naissance aux machines synchrones autopilotées. Elles ont permis aux machines asynchrones de détrôner les machines à courant continu.

## **I.3.LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS ELECTREQUES :**

### **I.3.1 Moteur Électrique à Courant Continu :**

Le Moteur à Courant Continu (MCC) est une machine tournante qui exploite le fait qu'un Conducteur placé perpendiculairement à un champ magnétique et parcouru par un courant se déplace en fauchant le champ magnétique : il est donc capable de produire un effort mécanique.

La constitution d'un moteur électrique est identique à celle d'une dynamo, ce qui signifie que la

Même machine peut fonctionner soit comme un moteur, pour produire une force, soit comme un Générateur de courant, comme dans la dynamo, le champ magnétique est produit par les pôles inducteurs de l'inducteur. On fait circuler un courant dans les conducteurs de l'induit ; ceux-ci, étant perpendiculaire au champ, sont soumis à une force magnétique. Le bobinage est réalisé de telle sorte que les forces de chacun des conducteurs s'additionnent. La force totale du moteur est la somme des forces qui s'exercent sur les conducteurs : on l'appelle couple du moteur.

L'avantage du moteur à courant continu est de pouvoir facilement régler la vitesse de rotation de celui-ci. Le moteur à courant continu est alimenté par des batteries ou des piles. Ce genre de moteurs électriques est utilisé sur de petits outils tels que des appareils électroportatifs sans fil. Le principal problème de ces moteurs vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Ces inconvénients ont été partiellement résolus par des moteurs disques ou des moteurs cloches qui ne possèdent aucun fer au rotor, mais qui par contre possèdent toujours des balais. Par la suite, les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur brushless, aussi dénommé « moteur à courant continu sans balais », ou moteur sans balais.

### **I.3.2. Moteur Électrique Universel :**

Un moteur universel est un moteur électrique fonctionnant sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série. Le rotor est connecté en série avec l'enroulement de l'inducteur. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son appellation. D'une manière générale, le rendement de ce type de machine est mauvais, mais leur coût de fabrication est minime. Ce genre de moteur électrique est utilisé sur de petits et moyens électroménagers, perceuses, aspirateurs et outillages électroportatifs de faible puissance.

### **I.3.3. Moteur Électrique Asynchrone :**

Le moteur électrique asynchrone est le plus répandu des moteurs alternatifs. Le moteur asynchrone, connu également sous le terme " anglo-saxon " de moteur à induction, est un moteur à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces moteurs n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Le moteur asynchrone est uniquement alimenté par un courant alternatif triphasé. Il a la particularité d'être robuste et simple. Le moteur asynchrone est aujourd'hui le moteur électrique le plus utilisé, car sa gamme de puissance peut aller de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Ce genre de moteur électrique est utilisé sur des machines-outils tels que des nettoyeurs à haute pression.

**I.3.4. Moteur électrique synchrone :**

Le moteur synchrone existe dans deux versions soit bobinées pour les fortes puissances et à aimant pour les entraînements à hautes performances. Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de "rotation de l'arbre de sortie" est égale à la vitesse de "rotation du champ tournant". Les moteurs électriques synchrones sont généralement des moteurs triphasés. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source continue ou équipé d'aimants permanents. Le moteur synchrone est souvent utilisé comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ».

**I.3.5. Moteur à réluctance variable :**

Le moteur à réluctance variable possède un dispositif prometteur et est toujours en développement. Il s'agit d'un moteur qui comporte un rotor à encoches se positionnant dans la direction de la plus faible réluctance. Ce rotor, en fer doux, comporte moins de dents qu'il n'y a de pôles au stator. Le rotor étant en fer doux, son mouvement est indépendant du sens d'alimentation des différentes phases. Le choix de la séquence d'alimentation détermine son sens de rotation. Le fonctionnement du moteur est assuré par un pilotage du type unipolaire et l'avance du rotor est obtenu en excitant tour à tour une paire de pôles.

**I.3.6. Moteur pas à pas :**

Les moteurs pas à pas sont de petits moteurs de précision dotés d'un système de commande électronique. Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire. Ce type de moteur est très courant dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire un contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte, typiquement dans les systèmes de positionnement. L'usage le plus connu du grand public est dans les imprimantes et les lecteurs CD.

**- Il existe 3 types de moteur pas à pas :**

- Le moteur à réluctance variable.
- Le moteur à aimants permanents.
- Le moteur hybride, qui est une combinaison des deux technologies précédentes.

**I.3.7. Moteurs linéaires :**

Un moteur linéaire est essentiellement un moteur asynchrone. Dans celui-ci le rotor « a été déroulé » de sorte qu'au lieu de produire un couple de rotation, il produit une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement. Les moteurs linéaires sont des moteurs à entraînements directs électromagnétiques. Les déplacements linéaires sont réalisés ns avoir

recours à des réducteurs mécaniques donc il en résulte aucune usure de pièce. Le moteur est composé de deux pièces : le slider (partie mobile) et le stator. Le slider comprend des aimants en montés dans un tube de précision en acier inoxydable. Le stator comprend les bobinages du moteur, le guidage du slider, et un microprocesseur intégré qui assurent les fonctions de mesure de position, la commutation et la surveillance de la température du moteur.

**- Il existe 2 types de moteur linéaire :**

- Ceux à accélération faible utilisés dans le transport aussi bien le Transrapid que le SkyTrain.
- Ceux à accélération rapide dans les armes comme le canon magnétique et les engins spatiaux.

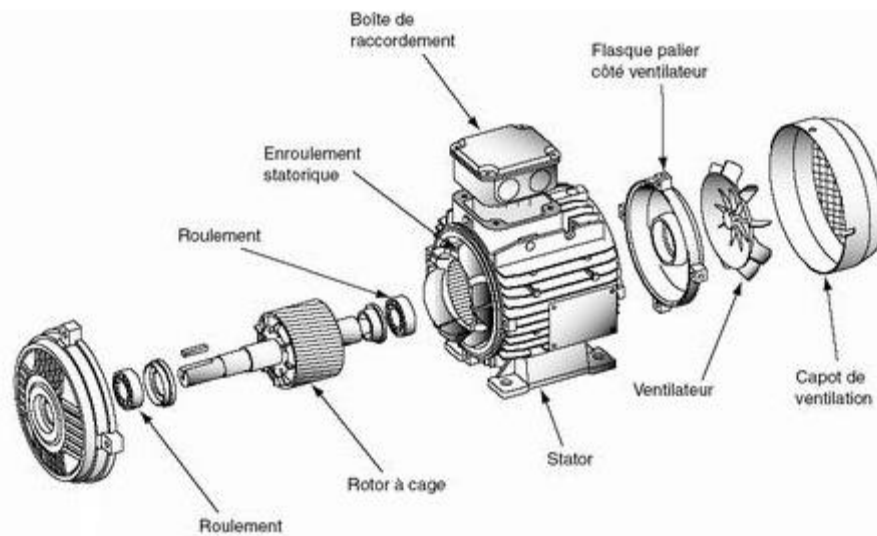
#### **I .4. Les différentes structures envisageables.**

Nous allons passer en revue différentes solutions envisageables. Dans la mesure du possible, nous ferons référence à des réalisations concrètes déjà publiées à ce jour, afin de justifier la vraisemblance des solutions envisagées. Pour autant, il ne s'agit pas d'une étude bibliographique exhaustive ; la production scientifique sur le sujet est actuellement très abondante et notre objet est plutôt d'illustrer différentes solutions techniques. Nous considérons ici à la fois les « vrais » moteurs-roue et les moteurs à proximité de la roue, et nous classons les systèmes en fonction de la nature du moteur utilisé.

##### **I .4.1. Systèmes utilisant un moteur asynchrone :**

Le moteur asynchrone reste aujourd'hui encore le moteur industriel par excellence et c'est celui où la standardisation est la plus avancée (par exemple, les tôles utilisables sont normalisées). Pour fonctionner à vitesse variable à partir d'une batterie, il doit être associé à un onduleur de tension triphasé. La société GEC Alsthom [12] a développé un moteur-roue pour la traction de bus électriques hybrides. Le moteur est associé à un réducteur et l'ensemble est intégré dans une roue très large pour laquelle un pneumatique spécial a été développé (cf. figure 01). Les caractéristiques techniques du moteur sont les suivantes :

- Type : moteur asynchrone triphasé rapide ;
- Puissance en régime continu : 60 kW ;
- Puissance maximale : 90 kW ;
- vitesse maximale : 9200 tr/min ;
- Couple maximal : 500 N.m ;
- Refroidissement : par circulation interne d'eau glycolée ;
- masse du moteur: kg  $\approx$ 130.



**Figure I.1 :** Structure du moteur-roue asynchrone développé par GEC Alsthom pour un bus hybride.

Le moteur est alimenté par un convertisseur compact, totalement intégré dans un boîtier. Les caractéristiques techniques de ce convertisseur sont les suivantes :

- type : onduleur de tension triphasé régulé par MLI ;
- Fréquence de la MLI : 7,5 kHz ;
- Refroidissement : par circulation interne d'eau glycolée ;
- masse du convertisseur : kg  $\approx$  10
- Volume occupé par le convertisseur : l  $\approx$  9.

#### **I.4.2. Systèmes utilisant un moteur à courant continu :**

Le moteur à courant continu est, pour sa part, le plus simple à piloter, car on régule une seule grandeur qui, en plus, est continue. La régulation par un hacheur réversible en courant et en tension est bien maîtrisée et largement décrite dans de nombreuses références bibliographiques. L'électronique est relativement simple et peu coûteuse. Cette solution est la seule utilisée par les constructeurs automobiles réalisant des voitures électriques en série (Peugeot 106 ou Renault CLIO par exemple).

Mais, sur ces véhicules, le moteur n'est pas à proximité des roues. Nous avons trouvé deux exemples de moteurs intégrés. La première date de 1975. Il est décrit par un brevet américain et il concerne un vélo électrique. La structure du moteur est décrite sur la figure 02. Il s'agit d'un moteur inversé. Il n'y avait pas de convertisseur statique et la régulation de la vitesse était réalisée par un rhéostat. On

peut noter la disposition intéressante des balais tournants.

Le second est plus récent. Il concerne un projet de véhicule en self-service développé par l'INRIA [7]. Il s'agit de « voitures » sans permis à quatre roues motrices et directrices. Ces véhicules seraient disponibles dans les zones piétonnières au centre des villes. Chaque moteur est intégré dans un « ensemble de roue » composé d'un moteur de traction à courant continu de 4 kW (associé à un réducteur mécanique), d'un frein motorisé, d'une suspension et de différents capteurs. Le moteur est alimenté par un hacheur dont les caractéristiques techniques ne sont pas plus précisées que celles du moteur. Notons que la version future utilisera un moteur synchrone sans balais.

#### **I.4.3. Systèmes utilisant un moteur synchrone :**

Le moteur synchrone autopiloté à rotor bobiné ou à aimants permanents est de plus en plus utilisé en traction. Le TGV Atlantique l'utilise depuis la fin des années 80. Il permet un fonctionnement à facteur de puissance proche de l'unité et son contrôle, quoique plus compliqué que celui du moteur à courant continu, paraît plus simple que celui du moteur asynchrone. Nous n'avons pas trouvé d'exemple de moteur à rotor bobiné utilisé dans un système de moteur-roue. A l'inverse, le moteur synchrone à aimants permanents est le moteur le plus utilisé pour ce type (Magnet Motors en Allemagne, Hydroquebec-M4 au Québec, [9], [39]). Par exemple, la société Hydroquébec (l'équivalent québécois d'E.D. F) a dépensé 30 millions de dollars canadiens pour le développement d'un moteur-roue synchrone à aimants. Nous présentons ici trois exemples. Le premier concerne le véhicule du projet IZA développé dès 1991 par la Compagnie Electrique de Tokyo [39]. Il s'agit d'une voiture de tourisme tout électrique. Les caractéristiques techniques du moteur sont les suivantes :

- type : moteur synchrone à aimant et à rotor inversé à attaque directe ;
- type d'aimants: aimants Sm-Co;
- puissance continue : 6,8 kW ;
- couple continu : 52 N.m ;
- puissance maximale : 25 kW ;
- vitesse maximale : 1540 tr/min (soit 180km/h pendant 3 min) ;
- couple maximal : 425 N.m (pendant 20 s) ;
- masse du moteur : kg 33.

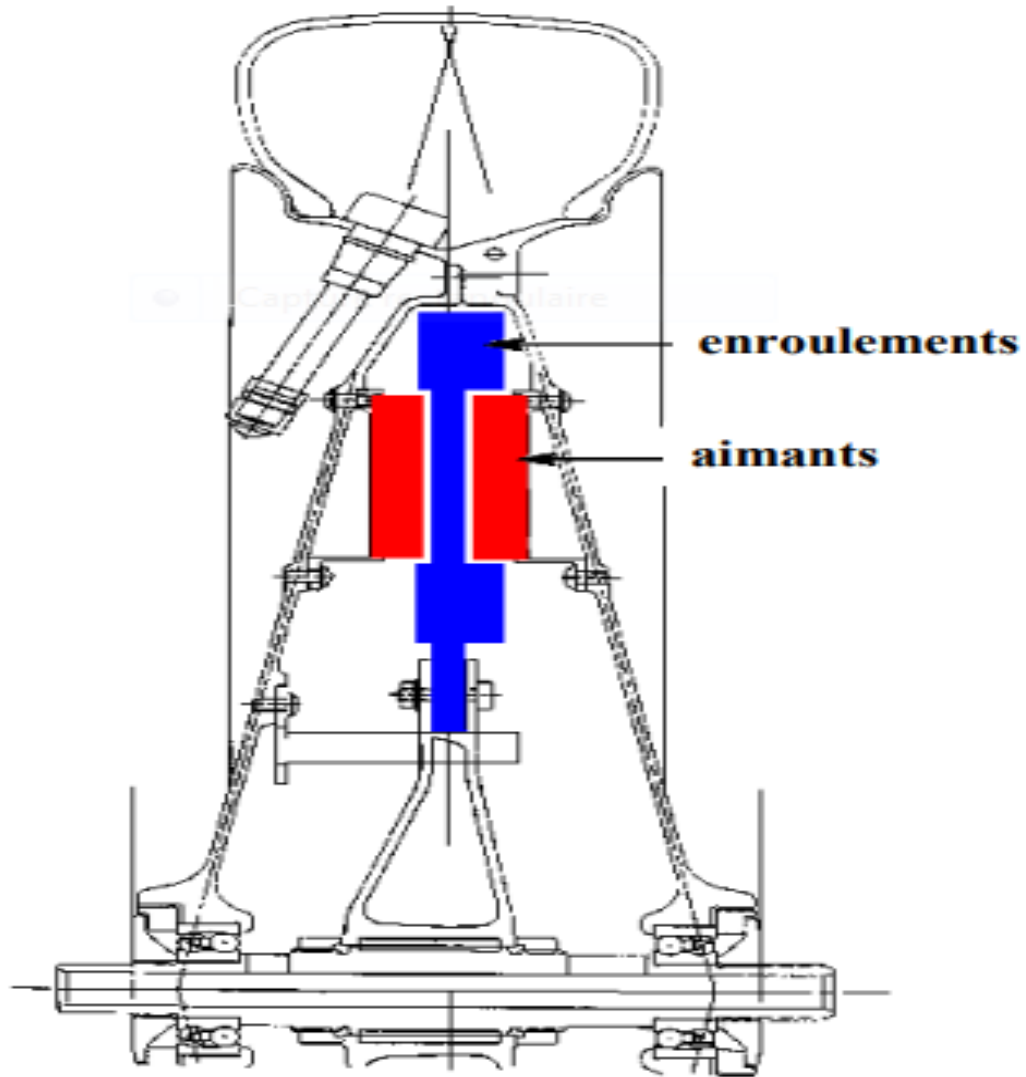
Le moteur est alimenté par un onduleur de tension régulé en courant, de masse 22 kg, lui-même alimenté par 24 batteries de type Ni-Cd de 100 A.h connectées de manière à fournir une tension de 288 V. Aucun renseignement supplémentaire n'est communiqué sur l'alimentation du moteur. Notons que l'autonomie mesurée du véhicule, à la vitesse stabilisée de 100 km/h sur un parcours plat,

est de 270 km. Le second système concerne le véhicule solaire AURORA développé par l'Université Technologique de Sydney pour le Challenge Mondial Solaire Darwin – Adélaïde. [40] donne uniquement des précisions sur le moteur, dont les caractéristiques techniques sont les suivantes :

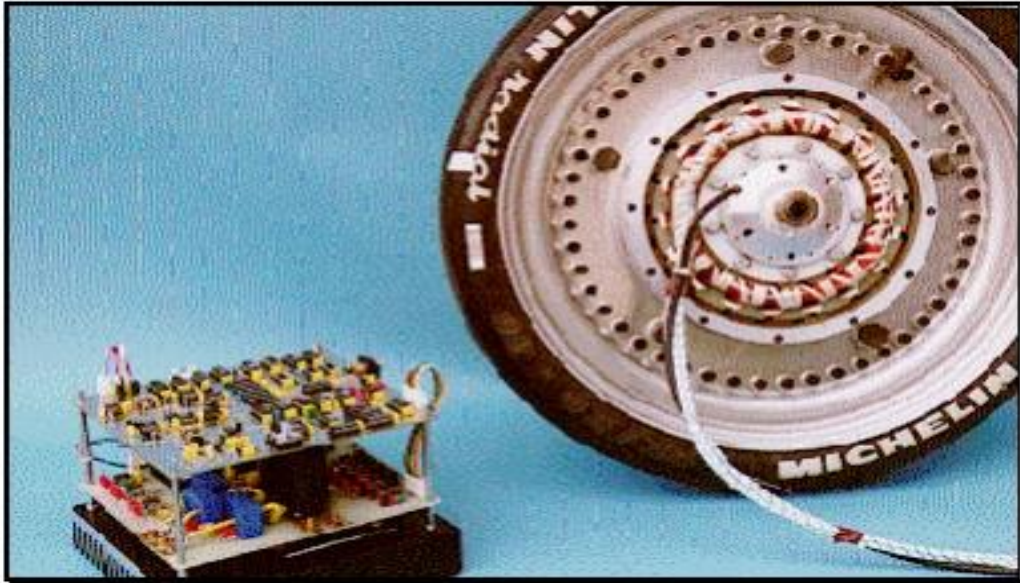
- type : moteur synchrone à aimant Nd-Fe-B, à flux axial et à enroulements statorique dans l'entrefer<sup>23</sup> ;
- puissance continue : 1,8 kW ;
- puissance maximale : kW  $3 \times 1,8$  (pendant 72s) ;
- vitesse moyenne : 1060 tr/min (soit 100 km/h) ;
- vitesse maximale : 1380 tr/min (soit 130km/h) ;
- couple nominal : 16,2 N.m ;
- couple maximal : 30 N.m (limite thermique dont la durée n'est pas précisée) ;
- rendement à la vitesse moyenne : 97,5 % ;
- masse totale du moteur : 8,3 kg.

La figure 03 montre l'intégration du moteur dans la roue, sans réducteur. Les performances de ce moteur sont excellentes, mais celui-ci reste essentiellement adapté à un véhicule solaire. Par exemple, le comportement mécanique du moteur en environnement difficile (routes cahoteuses, chocs contre des obstacles tels que les trottoirs...) n'est pas connu.

Le stator est réalisé sans matériaux ferromagnétiques ; les seules pertes du moteur sont localisées dans le bobinage : les pertes par effet Joule classiques et les pertes supplémentaires par courant induit



*Figure I.3 : Structure schématique du moteur synchrone à aimants, à flux axial et à enroulements dans l'entrefer, développé pour le véhicule AURORA.*



*Figure I.4 : moteur-roue développé par le LEEI pour la traction d'un véhicule solaire.*

Pour une application similaire le LEEI à Toulouse (France) a développé un moteur-roue à aimant permanent (cf. figure04). Les caractéristiques techniques du moteur sont les suivantes :

- Type : moteur triphasé à entrefer radial ;
- Nombre de pôles : 22 ;
- Nombre d'encoches : 18 ;
- Type d'aimants : aimants Nd Fe B frittés ( $B_r = 1.25T$ ) ;
- Longueur sur l'axe : 114 mm ;
- Diamètre extérieur : 240 mm ;
- Poids en ordre de marche : 14 kg ;
- Couple nominal : 20 N.m. Les caractéristiques techniques du convertisseur sont les suivantes :
- Type : onduleur de tension fournissant des créneaux de courant de  $120^\circ$  ;
- Type d'interrupteurs de puissance : transistors IGBT ;
- Fréquence de découpage MLI : 15Khz ;
- Rendement : 97% (le point de fonctionnement de ce rendement n'est pas précisé)
- Tension alimentation continue : 144 V ;
- Courant maximal : 100A.

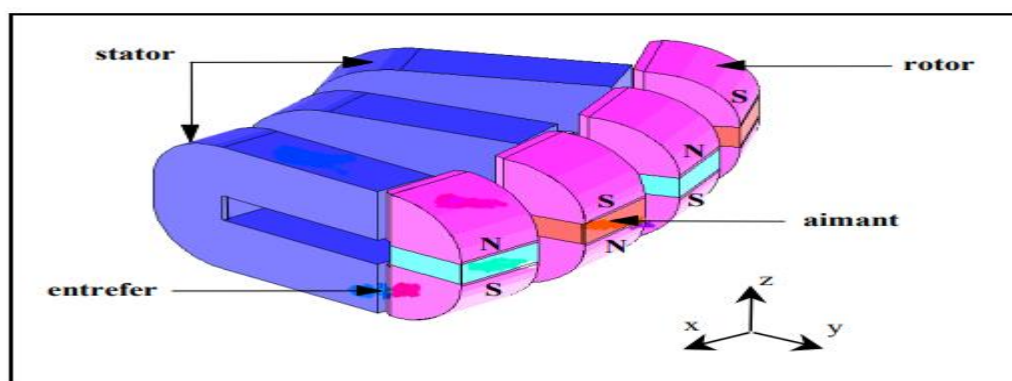
#### **I.4.4. Systèmes utilisant un moteur synchrone à réluctance variable :**

Il existe de nombreux types de moteurs à réluctance variable. Pour ce qui est des moteurs purement à réluctance, on peut citer les moteurs à bobinages dentaires, que l'on appelle aussi à double saillance [41], et les machines à bobinage globaux. Les moteurs à réluctance peuvent également associer des

aimants : ce sont les moteurs à réluctance hybrides [42]. Enfin, ces moteurs, comme les autres peuvent être à flux radial ou axial. Ils sont souvent alimentés comme les moteurs synchrones sauf pour le moteur à double saillance qui est alimenté en courants unidirectionnels par des demi-points asymétriques. Le moteur à réluctance variable a été envisagé par la société Radio Energie pour la traction d'un vélo électrique [43]. Par ailleurs, [41] propose une comparaison entre un moteur synchrone à réluctance variable à double saillance et un moteur synchrone à aimant en prenant comme application un moteur de puissance maximale de 26 kW de 2500 tr/min à 10000 tr/min pour un véhicule léger urbain. Nous avons trouvé une seule référence concernant un moteur-roue. Il s'agit du travail mené par l'IGE dans le cadre d'un contrat avec la Direction Générale de l'Armement sur un moteur triphasé de type vernier (12/16), hybride et à flux axial. La figure 05 précise la structure du moteur. Les performances prévues par la simulation d'un prototype de faible puissance sont les suivantes :

- puissance continue : 2 kW ;
- couple continu : 32 N.m ;
- vitesse maximale : 600 tr/min ;
- couple maximal : 90 N.m ;
- rendement à la vitesse maximale : 90 %.
- masse des parties actives du moteur : 10,4 kg ;
- masse d'aimants Nd-Fe-B : 0,9 kg.

Le moteur est alimenté par un onduleur de tension triphasé régulé en courant, lui-même alimenté par une batterie de tension 120 V.



*Figure I.5 : structure d'un moteur-roue hybride et à flux axial.*

#### **I.4.5. Systèmes utilisant un moteur asynchrone (MAS) :**

Le principal avantage du MAS est que le milieu industriel possède une expérience et une maîtrise de fabrication inégalée, ce qui plaide en faveur d'une bonne fiabilité. De plus le coût du moteur à cage d'écurieil est faible. Néanmoins, les performances du MAS sont relativement réduites. Il présente un

faible couple massique. Le rotor est toujours source de pertes Joule ; ceci complique le refroidissement et détériore le rendement. Pour obtenir un bon couple au démarrage, il faut utiliser une commande vectorielle du flux du moteur ; la commande de l'onduleur est alors plus difficile à mettre en œuvre, surtout si on veut obtenir une bonne fiabilité, et le coût du convertisseur augmente. Souvent, le moteur doit être associé à un réducteur, ce qui diminue le rendement et augmente l'encombrement et le bruit. La réversibilité du système est limitée par la nécessité de fournir en permanence de la puissance réactive.

#### **I.4.6. Systèmes utilisant un moteur à courant continu (MCC) :**

Le MCC bénéficie lui aussi d'une grande expérience de conception et de fabrication. Son alimentation est simple, fiable et peu coûteuse. La réversibilité du système est très simple à réaliser. Le moteur peut fournir un couple élevé dès le démarrage. Pour autant, les inconvénients de cette solution sont bien connus. Ils proviennent essentiellement du système balai/collecteur. La chute de tension au collecteur détériore le rendement et le contact tournant limite la vitesse de rotation et impose une maintenance régulière. De plus, le collecteur augmente la masse et l'encombrement du moteur (surtout en largeur). Ainsi, la puissance massique reste limitée et l'intégration dans une roue est difficile. Le collecteur représente en outre un surcoût incompressible. La présence d'un enroulement au rotor complique le refroidissement du cuivre et exclut quasiment de placer le rotor à l'extérieur (sauf à mettre des balais tournants comme sur la structure

#### **I.4.7. Systèmes utilisant un moteur synchrone (MS) :**

Il existe deux types de MS : les moteurs synchrones à rotors bobinés (MSRB) et les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP). Les conclusions sont très différentes pour les uns et pour les autres. Un avantage du MSRB est de pouvoir régler très facilement le flux inducteur. Cela permet d'augmenter simplement la plage de vitesse du moteur en diminuant le courant d'excitation, c'est-à-dire en diminuant le flux d'excitation. Malheureusement, ces moteurs nécessitent des contacts tournants, ce qui limite les possibilités d'intégration dans une roue. Comme pour le moteur à courant continu, le refroidissement des bobinages rétorques est compliqué. Le MSAP ne possède pas ces inconvénients provenant d'un bobinage tournant. Si les aimants ont une forte densité d'énergie (aimants terre-rare de type Nd-Fe-B ou Sm-Co) et que le moteur est alimenté par des créneaux de courant, il permet de fournir un couple massique élevé. Le rendement lui aussi est élevé, car on obtient une forte induction dans l'entrefer et il n'y a pas de pertes au rotor. Le seul inconvénient de ce type de structure est que l'induction dans le fer ne varie pas sinusoïdalement et que cela provoque des pertes fer supplémentaires à vitesse élevée. Cependant, en attaque directe, la vitesse de rotation des roues reste relativement basse quel que soit le type de véhicule ( $< 500$  tr/min). Remarquons enfin que la structure du moteur est simple ce qui signifie que les coûts de fabrication devraient être

relativement limités.

#### **I .4.8. Systèmes utilisant un moteur à réluctance variable (MRV) :**

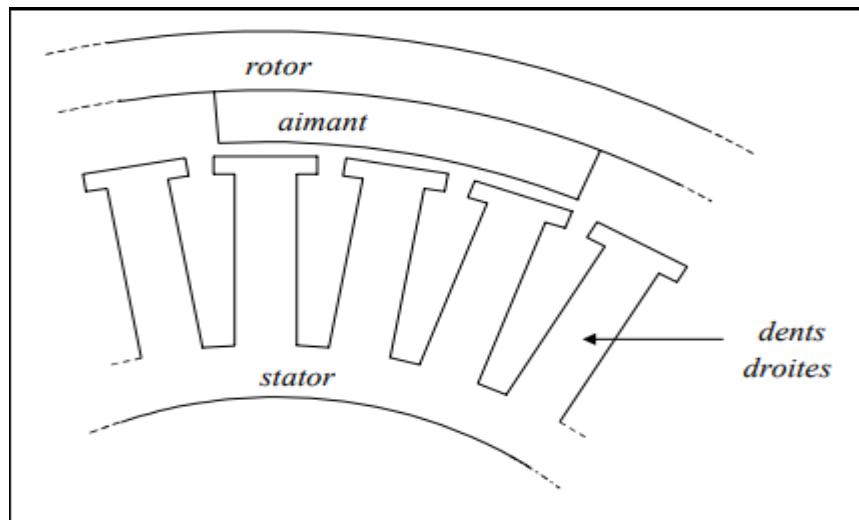
Nous considérons deux types de MRV : les moteurs à double saillance (MRVDS) et les moteurs hybrides (MRVH). Les premiers présentent de nombreux avantages. D'abord la structure est très simple : le stator possède un bobinage concentré (très simple à réaliser) et le rotor, homogène, ne supporte ni bobinages ni aimants. La construction (bobinage, équilibrage du rotor...) est facile donc peu onéreuse. D'un point de vue énergétique, les têtes de bobine sont courtes (à cause du bobinage concentré) et le coefficient de remplissage élevé, ce qui limite les pertes par effet Joule souvent plus faible que dans les MSA [41]. En revanche, du fait que les variations de l'induction sont non sinusoïdales, les pertes fer sont relativement élevées (comme pour les MAS à fém trapézoïdale). L'alimentation du moteur peut être réalisée par un onduleur en demi-pont asymétrique, car les courants dans le moteur sont unidirectionnels. Cela confère à ces moteurs une bonne sécurité de fonctionnement, car les trois phases sont indépendantes. Le gros problème de ces structures vient du bruit qui est créé, notamment à cause des ondulations de couple. De par le principe même de production du couple, celui-ci est pulsatoire, et il l'est d'autant plus que la vitesse est élevée, car, alors, on ne peut plus réguler le courant pour compenser les ondulations. Par ailleurs le couple maximal reste sensiblement plus faible que celui que l'on peut obtenir avec une MSA utilisant des aimants Nd-Fe-B. L'insertion des aimants dans les structures hybrides permet d'augmenter le couple en renforçant l'induction dans l'entrefer de la machine. On arrive donc à de bonnes performances de couple et de rendement. Les problèmes viennent des risques important de désaimantation des aimants et aussi de la fabrication du moteur rendue difficile par l'intégration des aimants dans les plots du rotor. De plus comme les MRVDS, elles fournissent un couple assez fortement pulsatoire.

#### **I .4.8. Constitution du système**

Nous allons détailler successivement la constitution du moteur et de son alimentation

#### **I .4.8. Constitution du moteur.**

La figure précise les formes géométriques du rotor et du stator du moteur.



**Figure I.6 :** Structure géométrique du rotor et du stator d'un moteur synchrone sans balais à structure inversée.

Le rotor extérieur du moteur est constitué d'une culasse en acier ferromagnétique doux, à l'intérieur de laquelle sont collés  $2.p$  aimants<sup>26</sup> en tuile de type Nd-Fe-B. Etant donné leurs positions, les aimants ne risquent pas d'être décollés par la force centrifuge. Cependant, on peut éventuellement les protéger de la corrosion et maîtriser leur position angulaire en les frettant. La frette doit alors être amagnétique et non conductrice, de façon à éviter de créer un couple asynchrone et des pertes électromagnétiques. Le stator est constitué de tôles magnétiques isolées entre elles. Le bobinage triphasé est réalisé en fil rond afin de minimiser la taille des têtes de bobines et les dents sont droites. Nous reviendrons plus loin sur le choix du nombre d'encoches par pôle et par phase et sur le type de bobinage. Une imprégnation globale du stator permet de protéger le bobinage.

### **I.5. Les composants magnétiques en électronique de puissance :**

- La fonction première des composants magnétiques, dans les circuits de l'électronique de Puissance est de transmettre une puissance (transformateurs) ou de stocker de l'énergie (inductances) : Les transformateurs sont utilisés pour isoler deux parties d'un circuit ou pour modifier l'amplitude des tensions (ou des courants). Ils sont également utilisés pour transmettre des signaux de faible puissance tout en assurant une isolation galvanique entre deux sous-ensembles d'un équipement. En conversion d'énergie les inductances sont utilisées comme élément de stockage. A chaque période, l'énergie est stockée temporairement dans l'inductance pour être ensuite restituée. Les inductances sont également utilisées comme élément de filtrage.

#### **I.5.1. CONSTITUTION**

Un composant magnétique est classiquement constitué d'un circuit magnétique autour duquel prennent place un ou plusieurs bobinages : un bobinage primaire constitué de  $n_1$  spires et un ou plusieurs bobinages secondaires constitués de  $n_2$  spires.

### I .5.2 Circuit magnétique

Le rôle du circuit magnétique est de canaliser les lignes de champ. Les matériaux magnétiques utilisés doivent présenter une perméabilité relative élevée, accepter parallèlement un niveau d'induction à saturation important et être le siège de pertes acceptables aux fréquences de travail, ce qui se traduit par une résistivité d'autant plus grande que la fréquence est importante. La définition du circuit magnétique s'effectue à partir des trois paramètres suivants nature du matériau, géométrie du circuit et dimension de l'entrefer.

### I .5.3. Les matériaux magnétiques :

Lorsque l'on cherche à utiliser un matériau magnétique métallique (Fe, alliages FeSi, FeNi, amorphes ou nanocristallins) en haute fréquence, on est confronté à des problèmes inhérents aux faibles résistivités de ces matériaux. Les pertes par courants de Foucault augmentent fortement avec la fréquence. Dès lors que l'on atteint quelques kilo Hertz et que l'on cherche à définir un circuit magnétique dont les dimensions sont grandes devant l'épaisseur de peau, ces problèmes deviennent insurmontables ; la solution la plus répandue consiste alors à utiliser des **ferrites**.

L'appellation "**ferrite**" concerne une importante variété de matériaux qui n'ont en commun que le constituant de base (l'oxyde de fer  $Fe_2O_3$ ) et la technique de fabrication, le frittage (moulage à chaud et sous pression). Les couples les plus fréquemment associés à l'oxyde de fer sont les couples manganèse - zinc (Mn-Zn) et nickel - zinc (Ni-Zn). On obtient des matériaux chimiquement stables, d'une grande dureté mais sensibles aux chocs mécaniques et thermiques.

### I .5.4. Entrefer

La première fonction de l'entrefer est d'éviter la saturation du matériau magnétique, il permet également de stocker une énergie magnétique importante comme l'indique la figure 07 ci- dessous.

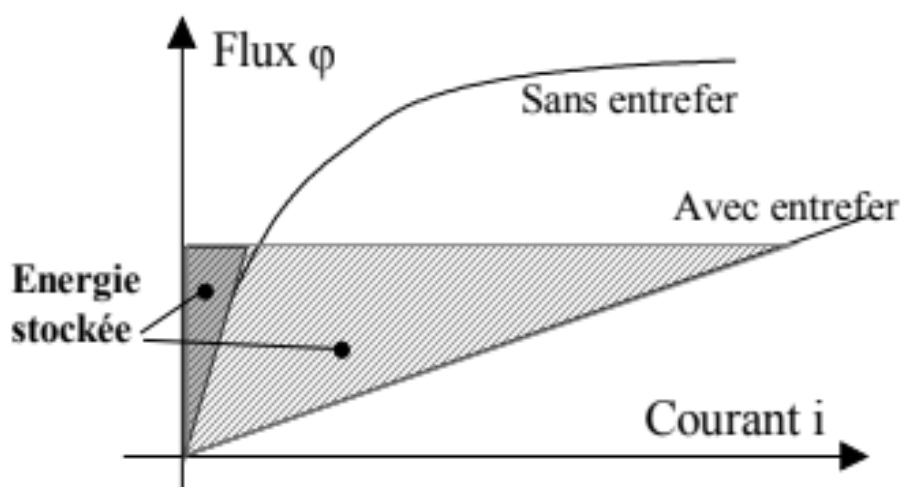


Fig I .7 : Energie stockée en fonction de l'entrefer

A flux constant, plus l'entrefer est important, plus l'énergie stockée est élevée ; l'augmentation de l'énergie emmagasinée étant naturellement due à un courant plus élevé.

Pour les matériaux comme les ferrites, l'entrefer est classiquement obtenu en rectifiant la jambe centrale du circuit magnétique ou en utilisant des cales. Pour des entrefers de forte valeur il est préférable d'utiliser des matériaux à entrefer réparti.

### **I .5.5. Le bobinage**

Pour les fréquences industrielles, on utilise des fils pleins et une densité de courants de 2 à 5 A/mm<sup>2</sup>. Plus les fréquences s'élèvent, plus la densité de courant peut devenir importante (car la longueur du conducteur dans les bobinages diminue). Par contre, il faut tenir compte des effets en haute fréquence : effets de peau et de proximité. L'utilisation de clinquants ou de fils de Litz devient parfois nécessaire. L'un des principaux problèmes associés à la réalisation de bobinages parcourus par des courants à fréquence élevée est l'accroissement de la résistance apparente des conducteurs. En électronique de puissance on rencontre deux cas typiques :

- \* Courant continu avec une composante alternative plus ou moins importante (cas des inductances de lissage par exemple). Dans ce cas, des conducteurs pleins (ronds ou plats) sont utilisés.
- \* Courant alternatif ou discontinu. Dans ce second cas, des fils de Litz (fils multibrins, torsadés et isolés) peuvent être utilisés pour les fréquences supérieures à 20 kHz.

Les manières de réaliser les bobinages sont multiples :

- \* Soit en utilisant différentes structures (bobinage dit concentrique, bobinage en galettes, bobinage à nid d'abeilles, bobinage au "pas de pèlerin", bobinage "deux fils en main").
- \* Soit en utilisant différentes technologies (technologie circuit imprimé multicouche, technologie multicouche, technologie type accordéon, technologie céramique sérigraphiée).

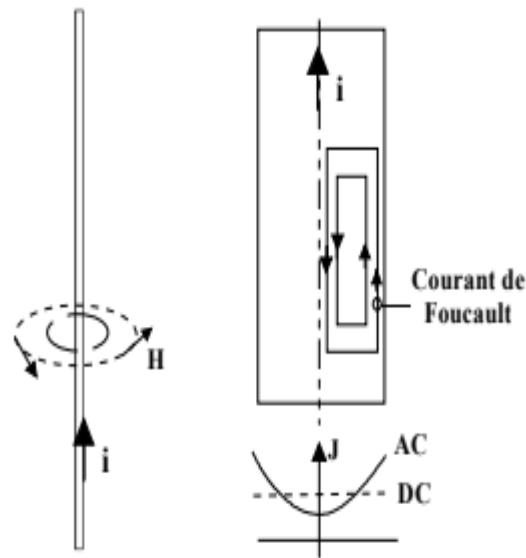
En haute fréquence les courants de Foucault qui se développent à l'intérieur des conducteurs, conduisent à une augmentation parfois très importante des pertes. Ces courants de Foucault sont dus aux variations rapides des champs magnétiques dans lesquels sont plongés les conducteurs. On distingue généralement trois cas différents bien qu'il s'agisse du même phénomène :

- L'effet de peau.
- L'effet de proximité.
- L'effet dû à la présence d'entrefer dans le circuit magnétique.

### **I .5.6. L'effet de peau.**

Considérons un conducteur isolé parcouru par un courant électrique (figure 08). Le courant  $i$  crée un champ magnétique dont les variations induisent des courants de Foucault à l'intérieur du conducteur.

Ceux-ci diminuent la densité de courant au centre du conducteur et l'augmentent sur la périphérie.



*Figure. I.8 : Effet de peau.*

Aux basses fréquences ce phénomène est négligeable, en revanche aux fréquences élevées le courant se répartit uniquement à la périphérie du conducteur. L'effet de peau se traduit par une augmentation apparente de la résistance du conducteur puisque sa section utile diminue au fur et à mesure que la fréquence augmente.

$$R_{ac} = K R_{dc} \quad (1)$$

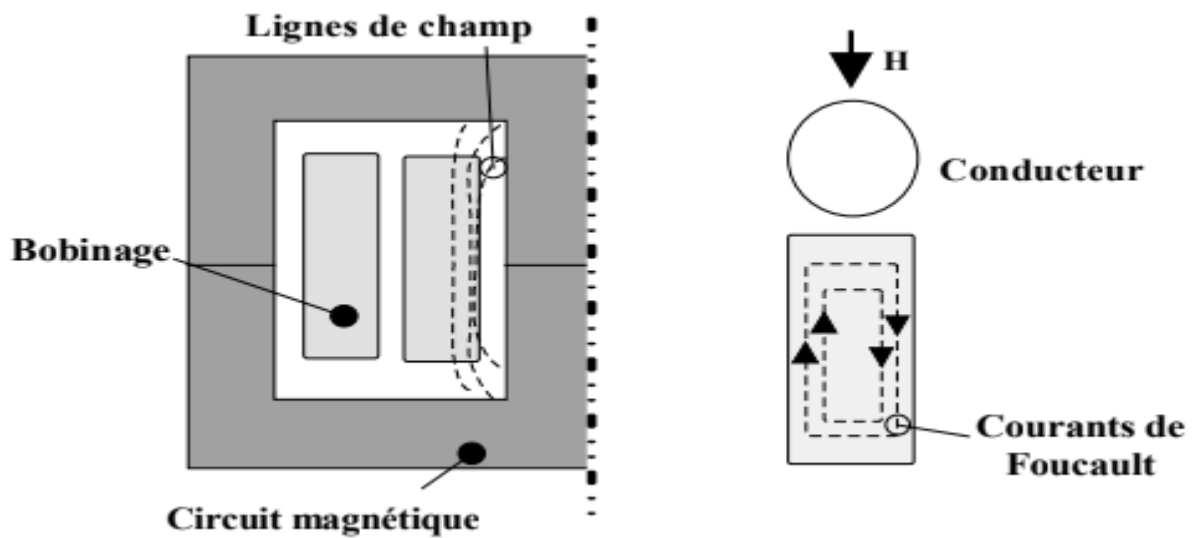
Des expressions simplifiées [3] permettent de déterminer la valeur du facteur K. Celui-ci est une fonction du rapport  $d/\delta$  où  $d$  représente le diamètre du conducteur (cas d'un conducteur cylindrique) et  $\delta$  la profondeur de peau :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu}} \quad (2)$$

$\rho$  et  $\mu$  représentent la résistivité et la perméabilité du matériau conducteur. En pratique l'effet de peau est limité en utilisant du fil de Litz, d'un coût élevé ou du feuillard bien adapté au secondaire de transformateur.

### **I.5.7. Effet de proximité.**

Dans un bobinage, les conducteurs ne peuvent plus être considérés indépendamment les uns des autres. Chaque conducteur subit l'influence du champ magnétique créé par l'ensemble des bobinages. Les variations rapides du champ créent des courants de Foucault à l'intérieur des conducteurs. Cet effet est appelé effet de proximité.



*Figure I.9 : Effet de proximité.*

De nombreux auteurs traduisent l'effet de proximité par une augmentation de la résistance apparente :

$$R_{ac} = K_p \cdot R_{dc}$$

Cette approche est correcte lorsque les enroulements sont tous parcourus par un courant. En revanche à courant nul dans un enroulement, cette approche ne permet pas de traduire l'augmentation des pertes [4]. La modélisation de l'effet de proximité est particulièrement Délicate. Au prix d'approximations plus ou moins importantes, certains auteurs ont proposé des solutions analytiques pour la prise en compte de l'effet de proximité. Il n'existe pas de solution générale.

L'objectif consiste en premier lieu à évaluer les pertes afin de ne pas se placer dans des conditions de fonctionnement critiques (augmentation trop importante de la résistance).

#### **I.5.8. Effets dû aux entrefers.**

En conversion d'énergie, les inductances (inductance de lissage, transformateur de convertisseur Fly back) servent en premier lieu à stocker de l'énergie. Elles possèdent donc un entrefer dont la hauteur varie classiquement de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres.

Dans la région de l'entrefer les lignes de champ sont d'autant moins bien canalisées que l'entrefer est important, on observe alors un épanouissement des lignes de champ (figure 08). Les conducteurs placés à proximité de l'entrefer se trouvent ainsi plongés dans un champ magnétique variable. Ils sont le siège de pertes importantes. Il est parfois plus judicieux d'utiliser des matériaux à entrefer réparti qui permettent ainsi de limiter ces effets.

### I.6. Choix du type de bobinage :

Le bobinage est nécessairement à pas diamétral. En effet le raccourcissement du pas de bobinage aurait pour effet de supprimer des harmoniques dans la fém. et par conséquent de détériorer sa forme trapézoïdale. Il en est de même pour la répartition, ce qui implique que le nombre d'encoche  $q$  par pôle et par phase doit être égal à 1.

Pour ce qui est du choix de  $q$ , un autre argument doit être pris en compte : l'optimisation de la masse du moteur. En effet, considérons une machine ayant une induction moyenne dans l'entrefer  $p$   $B_e$  au niveau du rayon moyen d'entrefer  $R$ . Si on maintient ces deux grandes constantes, le flux par pôle est d'autant plus faible que  $p$  est élevé. Alors, en maintenant aussi le niveau de saturation dans le fer, on peut diminuer l'épaisseur des culasses statorique et rotorique lorsqu'on augmente  $p$ . Accroître le nombre de pôles permet donc de diminuer la masse de la machine. Mais cette augmentation de  $p$  a deux limites.

La première concerne les pertes fer. En effet, pour une vitesse de rotation donnée, l'augmentation de  $p$  entraîne une augmentation de la fréquence électrique et, par suite, des pertes fer.

La seconde concerne la faisabilité mécanique et elle influence le choix de  $q$ . En effet, notons  $S_{enc}$  (la surface totale des encoches du stator),  $S$  la surface totale des dents et  $S_{stat}$  la surface totale du stator hors culasse. Ces trois surfaces sont liées par la relation suivante :

$$S_{enc} + S_{dent} = S_{stat}$$

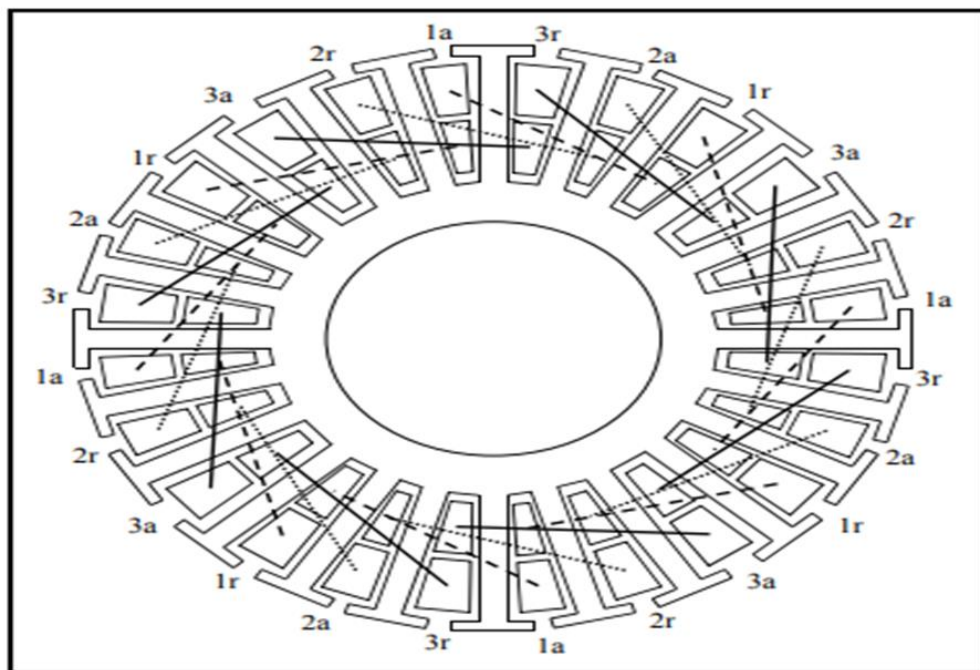
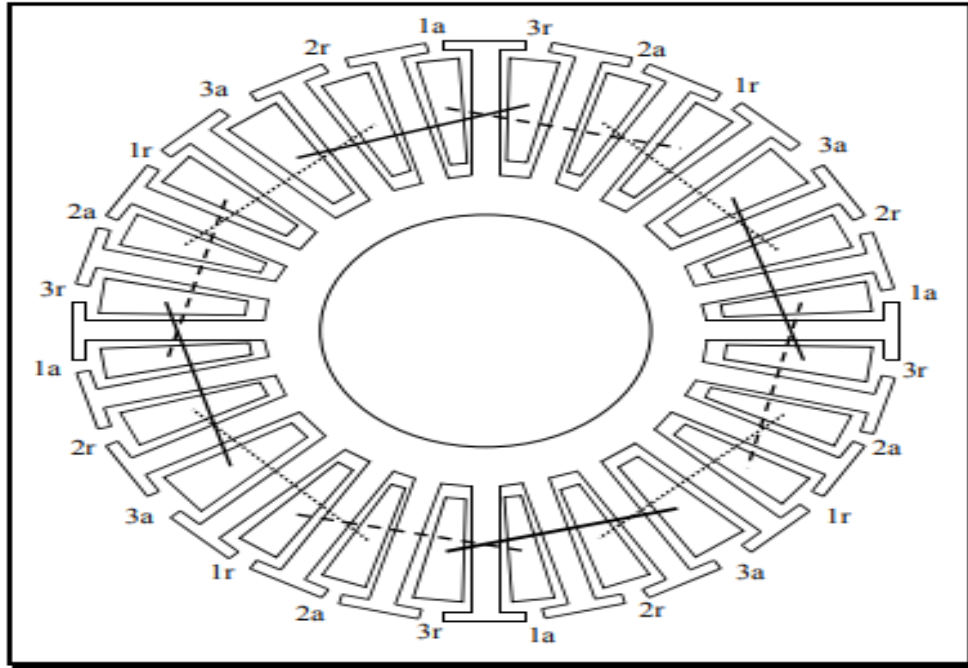


Figure I.10 : représentation des connexions des bobines pour une machine triphasée  $p = 4$  et  $q = 1$  dans le cas d'un bobinage à pas diamétral et en double couche



**Figure I.11:** représentation des connexions des bobines pour une machine triphasée  $p = 4$  et  $q = 1$  dans le cas d'un bobinage à pas diamétral et en simple couche.

Enfin, il faut limiter le plus possible la longueur des têtes de bobines car il s'y crée des pertes Joule sans que le courant y circulant ne produise de couple. Pour cette raison, le bobinage doit être réalisé en double couche. En effet, dans ce cas, on réduit le nombre de fils qui se croisent à l'extérieur du stator et, par conséquent, la longueur des têtes de bobine. La figure 11 et la figure 12 montrent les connexions des bobines à l'extérieur des encoches pour une machine triphasée ayant 4 pôles et une encoche par pôle et par phase, dans les cas de bobinages à simple couche et dans le cas d'un bobinage à double couche. Pour le bobinage simple couche, nous constatons que deux bobines au plus se croisent à l'extérieur de la machine, alors que pour le bobinage double couche ce sont au plus trois demi-bobines qui se croisent. Cela permet a priori une réduction du volume des têtes de bobine de 25 %.

## RÉFÉRENCES chapitre I :

- [7] L. LISOWSKI, G. BAILLE, "Spécification d'un petit véhicule électrique pour les zones piétonnières", Journée spécialisée INRETS, Propulsion hybride et bi-mode pour les véhicules particuliers et les transports en commun, Lyon-Bron, 14 Mai 1998, pp. 1-6.
- [9] H. KOLOWSKY, "La voie du véhicule hybride au travers de plusieurs projets de recherche", Journée spécialisée INRETS, Propulsion hybride et bi-mode pour les véhicules particuliers et les transports en commun, Lyon-Bron, 14 Mai 1998.
- [12] A. JULLIEN, "Systèmes de propulsion électrique modernes, du transport urbain routier au véhicule individuel", Journée spécialisée INRETS, Propulsion hybride et bi-mode pour les véhicules particuliers et les transports en commun, Lyon-Bron, 14 Mai 1998, pp. 81-94.
- [39] M. TERASHIMA, T. ASHIKAGA, T. MIZUNO, K. NATORI, N. FUJIWARA, and M. YADA, "Novel Motors and Controllers for High- Performance Electric Vehicle with Four In- Wheel Motors", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 44, No. 1, February 1997, pp. 28-38.
- [40] V. S. RAMSDEN, B. C. MECROW, and H. C. LOVATT, "Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle ", EMD'97.
- [41] B. MULTON, C. JACQUES, "Comparison of performances of two self-commutated electric motors: the permanent magnet brushless dc motors the switched reluctance motor", Congrès Véhicule Propres, réalités et perspectives du véhicule électrique, La Rochelle, 15-19 Nov. 1993, pp. 295-302.
- [42] D. HADJIDJ, C. ESPANET, A. MIRAOU, J. M. KAUFFMANN "A new structure of a wheel motor: The Transverse Vernier Hybrid Reluctance Motor - Comparison with the Synchronous AC Brushless Motor", EVS, Bruxelles, Octobre 1998.
- [43] J.-C. VANNIER, P. VIDAL, F. BINET, "Conception et simulation d'un moteur-roue", CEMD'99, 4 février 1999, Cachan, France, pp. 123-128.

**CHAPITRE II**

A downward-pointing arrow with a rectangular tail at the top, indicating a flow from the chapter title to the specific topic.

**EFFET DE L'ANISOTROPIE SUR LES  
TOLES**

A downward-pointing arrow with a rectangular tail at the top, indicating a flow from the specific topic to the main content of the page.

## **Chapitre II.**

### **II.1. Introduction**

Un matériau magnétique est un matériau de haute perméabilité magnétique ( $\mu_r \gg 1$ ). Le rôle est de canaliser efficacement les lignes de champ magnétique. Ceci permet de réduire les Fuites.

Ce chapitre donne un aperçu des noyaux et des matériaux magnétiques. On se souvient de tout

D'abord, en quelques lignes, nous parlerons des noyaux, de leurs formes et des pinces rotatives des transformateurs. Ensuite, nous discuterons des matériaux magnétiques et des circuits magnétiques nous aborderons également dans ce chapitre les hauts fourneaux.

### **II.2. Les noyaux magnétiques :**

#### **II.2.1 Effet de l'anisotropie sur les tôles :**

Toutes les tôles magnétiques qu'on utilise en construction électrique sont plus ou moins anisotropes. Leurs propriétés magnétiques varient avec l'orientation de l'induction  $B$  dans le plan de la tôle. La direction de laminage constitue presque toujours, mais pas obligatoirement, une direction d'aimantation facile. On observe dans cette direction une perméabilité magnétique supérieure à celle existante dans toutes les autres directions. Corrélativement les pertes totales sont minimales dans la direction de laminage. C'est particulièrement marqué dans les tôles FeSi à grains orientés comme on l'a dit au paragraphe précédent, mais c'est également vrai pour les tôles dites non orientées, ce qui est moins connu, et signifie tout simplement que les tôles même dites non orientées sont en réalité partiellement orientées. L'origine de l'anisotropie doit être recherchée dans ce que les métallurgistes appellent la texture de la tôle. En réalité un monocristal de Fe ou de FeSi, de structure cristalline cubique constitue un milieu magnétique très anisotrope. Les trois arêtes du cube (ou axes quaternaires) sont des directions de facile aimantation et les quatre diagonales (les axes ternaires) des directions d'aimantation difficile

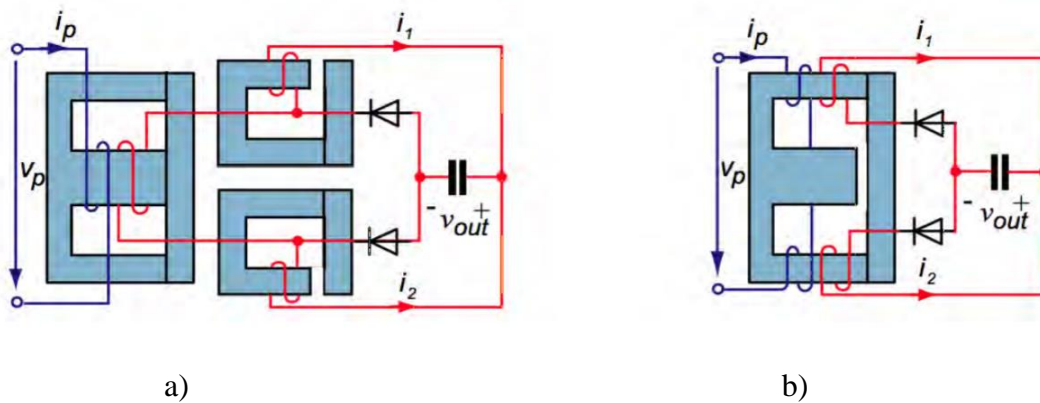
Dans une tôle. Il suffit que les différents grains qui la composent s'orientent préférentiellement suivant quelques directions privilégiées pour voir apparaître immédiatement un comportement anisotrope dans le plan de la tôle. Or toutes les tôles sont fabriquées en utilisant un certain nombre de processus métallurgiques successifs (une cristallisation, des laminages à chaud et à froid, des recuits de recristallisation) qui est pratiquement toujours, privilégient certaines orientations par rapport à d'autres sous les cylindres d'un laminoir à froid par exemple. Les cristaux d'alliage FeSi sont écrasés mais en pivotant autour de quelques axes privilégiés. La tôle plus mince obtenue possède alors une texture de laminage. Un recuit ultérieur donne naissance à de nouveaux grains avec une texture de

recristallisation tenant compte de la texture de laminage précédente. C'est ainsi que toute tôle, même une tôle destinée à la carrosserie, garde une mémoire de tous ses états intermédiaires.

### II.2. 2. Applications pour les moyennes puissances :

Pour la gamme de puissance de l'ordre de quelques dizaines de Watt au Kilowatt, Les applications d'électronique de puissance sont très variées (multimédia, télécom, les conversions de puissance au réseau électrique, etc.) Le but principal est d'optimiser le rendement et d'augmenter la densité de puissance. Deux axes de recherches sont développés. Le premier développe la synthèse des convertisseurs et la recherche de topologies entrelacées multicellulaires. La seconde porte sur l'intégration fonctionnelle des composants. L'axe de « l'intégration fonctionnelle » des composants consiste à intégrer séparément chacune des fonctions passives qui concernent : le transfert d'énergie via un transformateur (T) par exemple, le stockage d'énergie via une inductance (L) et une capacité (C) et, ensuite, *à les empiler* de manière à former un seul bloc comprenant plusieurs fonctions, soit à les regrouper au sein d'une fonction [1]. Cette technique a déjà permis d'obtenir un filtre de couplage électromagnétique intégré. Elle a été étendue ensuite au convertisseur complet. En fait, toute), Inductance et tout condensateur dans un convertisseur stockent l'énergie électrique, à la fois sous forme de *champ magnétique* et électrique. Mais chaque inductance possède une capacité parasite et vice versa. En vue d'améliorer les propriétés d'inductance vers la réalisation d'une inductance pure, une idée majeure est l'amélioration de l'aspect capacitif de l'inductance, ce qui conduit finalement à un composant L-C résonant, intégré dans le même module. Ainsi, on peut utiliser des éléments parasites comme les variables de dimensionnement du composant. Ce type de nouveau composant résonant est peut-être l'inductance-capacité intégrées (LC), l'inductance-capacité-transformateur intégrés (LCT), l'inductance-inductance-capacité transformateur intégrés (LLCT), l'inductance-capacité-inductance-capacité (LCLC), etc. [2]. Par ailleurs, un problème important des convertisseurs intégrés est leur management thermique. Diminuer le volume des composants et mutualiser les fonctions imposent une forte densité de *flux* de chaleur à évacuer, spécialement dans la gamme de moyenne puissance et de grande puissance. La conductivité thermique d'un *matériau magnétique* ferrite est très faible (5 W/km pour un ferrite Mn-Zn en comparaison avec les 400W/km du cuivre) [2]. Par conséquent, le problème de refroidissement des composants *magnétiques* prend de l'importance et les températures de fonctionnement s'avèrent limitatives pour le système. Dans ce type de recherche, la solution de refroidissement par une utilisation de composant magnétique planaire présente l'avantage d'utiliser une géométrie maîtrisée et parfaitement reproductible, permettant de garantir, avec une très bonne précision, ses caractéristiques. En plus, on peut ajouter aussi à cette particularité le fait que ce type de composant est mieux refroidi grâce à son profil plan plus simple à réaliser. Cette approche d'intégration des composants magnétiques planaires est

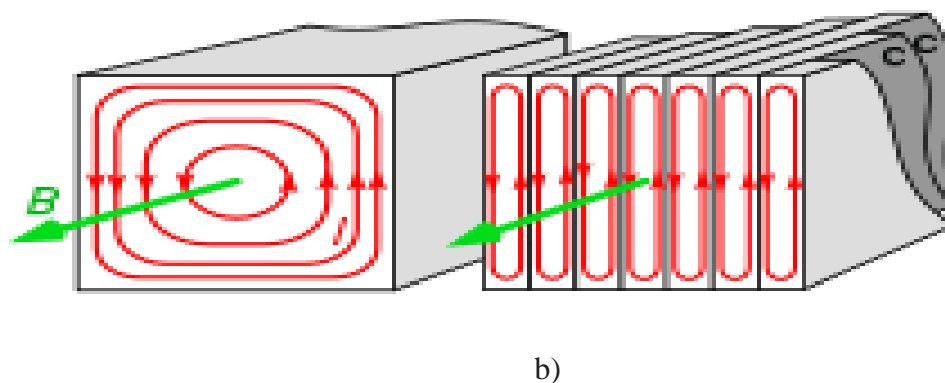
principalement développée pour les convertisseurs d'alimentation à découplage résonant. Concernant le composant du type LLCT dans les systèmes d'alimentation modernes, la structure d'intégration de LLCT utilisant un transformateur planaire classique présente les avantages de réduire le volume, les pertes et d'augmenter la performance en raison d'une intégration de la capacité dans le noyau magnétique via la technique nommée IPEC (Intégratéd Power Electronics Modules) [3], en remplaçant des noyaux magnétiques discrets-symétriques par des noyaux intégrés-asymétriques comme sur la figure suivant. Cette dernière approche a été développée au CPES (Centre for Power Electronics System).



**Figure II.1:** Comparaison de la structure magnétique par des noyaux magnétiques discrets et le noyau magnétique intégré [1]

- a) Avec deux noyaux supplémentaires.
- b) Avec un seul noyau fermé.

### II.2.3. Description et propriétés pertes par courant de Foucault :



**Figure II.2 :** Section d'un entrefer : Le feuilletage permet de réduire les pertes par courants de Foucault

- a) non divisé en TOLES avec le vecteur d'induction magnétique  $B$
- b) divisé en TOLES avec des vecteurs d'induction magnétique partielle  $B$

Le feuilletage de tôles est fait de l'empilement de tôles d'acier, de même dimension, les unes sur les autres. L'oxydation ou un vernis isolant électrique déposé sur chaque tôle permettent de limiter la circulation du courant d'une tôle à sa voisine afin de réduire les courants de Foucault « courants vagabonds induits dans les masses conductrices » donc l'échauffement du circuit magnétique par rapport au même circuit massif. Ceci améliore le rendement par diminution des pertes fer et donc le dimensionnement des inductances, transformateurs ou machines qui les utilisent. [12]

Les pertes par courant de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence, au volume du matériau et inversement proportionnelles à sa résistivité. Ces pertes peuvent donc être réduites par le choix des matériaux (résistivité élevée) et par l'épaisseur des tôles. [12] Ces tôles existent en différentes qualités (*acier doux, au silicium, à grains orientés, etc.*), [12], épaisseurs, formes et dimensions. Elles sont classifiées, entre autres, par leurs pertes totales en watts par kilogramme, pour *une induction alternative* sinusoïdale de fréquence 50 Hz et de valeur maximale **1 T**. Ainsi, les tôles de qualité courante sont définies à 2,6 W/kg et 1,6 W/kg et les tôles à grains orientés (par traitements particuliers et laminage) à 0,6 W/kg.

Des matériaux de qualité supérieure sont réalisés par assemblage de « circuits coupés » de fines tôles (formes en E, U ou toriques), les surfaces de contact des éléments sont rectifiés afin d'éliminer l'entrefer non désiré. Des pièces de montage standards permettent leur assemblage. [12] [13]

L'image ci-dessous **Figure II. 3.** montre un exemple de tôles de transformateur ou d'inductance.



a). Schéma de la carcasse

d'un transformateur monophasé complet

b) Schémas des différentes tôles utilisées par

exemple pour un transformateur monophasé ou une inductance

*Figure II.3 : Tôles de transformateur ou d'inductance.*

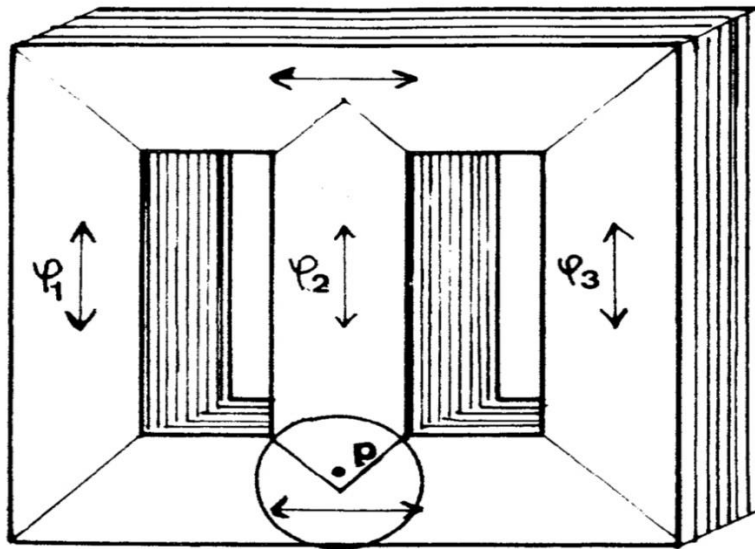
#### II.2.4 Les champs tournants dans les joints des transformateurs :

L'étude de la répartition du flux dans les joints des noyaux magnétiques des transformateurs triphasés montre qu'il existe là aussi des champs tournants. A l'origine on trouve encore essentiellement des effets de forme du circuit magnétique. Essayons d'expliquer sommairement ce qui se passe. La

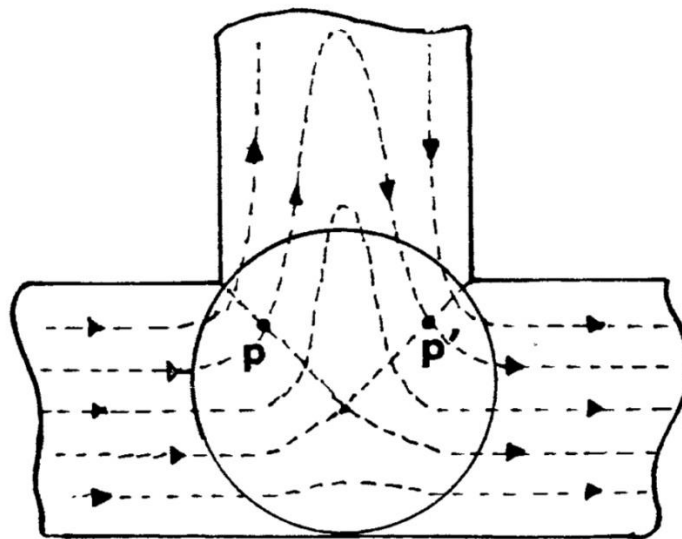
plupart des transformateurs utilisés en Europe pour la distribution d'énergie électrique sont du type triphasé [8]. Leurs noyaux magnétiques sont construits par empilement de segments de tôles à grains orientés convenablement découpés (fig. 2.4a). La circulation du flux entre les colonnes et les culasses se heurte périodiquement à de très graves difficultés dans les joints, en particulier aux deux extrémités de la colonne centrale. Imaginons pour simplifier que le noyau soit réalisé en matériau doux parfaitement isotrope et infiniment perméable [9]. En un point comme le point P (fig. 2.4 a) le champ d'induction ne s'annule jamais. Ses deux composantes horizontale et verticale doivent en effet assurer la propagation du flux vers les colonnes externes 1 et 3 d'une part. et dans la colonne 2 centrale d'autre part. Dans le cas d'un circuit équilibré une construction de Fresnel montre immédiatement que la différence de flux  $\Phi_1 - \Phi_3$  d'une part et le flux  $\Phi_2$  d'autre part sont deux grandeurs en quadrature. Toutes les conditions sont donc réunies pour observer au point P un champ tournant elliptique ou circulaire à savoir : deux composantes orthogonales déphasées de  $\pi/2$  radians, l'une par rapport à l'autre.

En pratique, la tôle FeSi à grains orientés est très anisotrope. Elle s'oppose vigoureusement à toute circulation du flux dans une direction perpendiculaire à la direction de laminage. Cette anisotropie est elle-même responsable de modifications supplémentaires des lignes d'induction. Essayons de représenter par exemple (fig.2.4 b) la circulation du flux à l'instant où le flux total. [10]

$\Phi_2$  s'annule dans la colonne centrale du transformateur. S'il y avait continuité parfaite du milieu et isotropie, toutes les lignes d'induction seraient des droites horizontales. En réalité la tôle G.O. n'autorise pas un passage direct de Pen p' car le plus court chemin correspond à une reluctance très élevée du circuit en direction travers. La tôle impose au flux de suivre un trajet très allongé pourvu qu'il s'éloigne aussi peu que possible de la direction de laminage. La figure (2.4 b) montre l'allure du chemin suivi.



*Figure II.4 : Exemple de circuit magnétique de transformateur triphasé construit par empilage de segments. Les flèches doubles indiquent les directions de facile aimantation des tôles G.O.*



*Figure II.5 : Détail des lignes d'induction dans la région à la jonction colonne centrale-culasse, à l'instant où le flux total  $\varphi_2$  s'annule dans la colonne centrale.*

### II.2.5 Forme des noyaux :

Les noyaux aujourd'hui disponibles pour les applications de puissance ont, quant à leur forme et leurs dimensions, trois origines :

- Des noyaux initialement conçus pour les applications de traitement du signal (pots, tores, E).
- Des noyaux développés spécifiquement.

Citons les principales formes de ces circuits :

**Noyaux U** : ils offrent une large surface bobinable. On distingue deux types : noyaux U à jambes rectangulaires et noyaux U à jambes rondes.

**Noyaux E** : utilisés comme transformateurs (avec ou sans entrefer) et comme inductances de lissage (avec entrefers importants). On distingue trois types : noyaux E à jambes rectangulaires, noyaux EC et noyaux ETD.

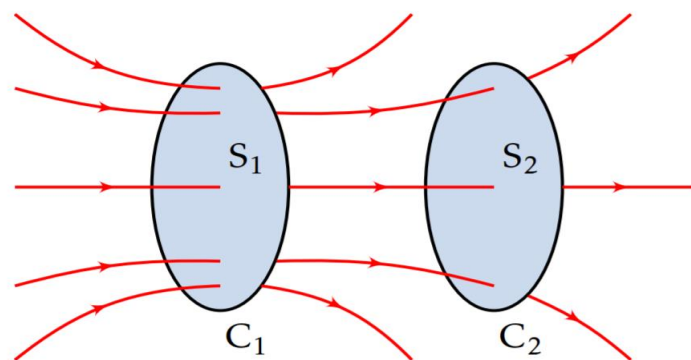
**Noyaux pots** : trois types de pots sont utilisés couramment : pots FP, pots RM et pots PM.

**Noyaux tores** : ils sont utilisés chaque fois qu'il est nécessaire d'obtenir un couplage très serré entre les divers bobinages et/ou un blindage « parfait ».

## II. 3. Les Matériaux magnétiques :

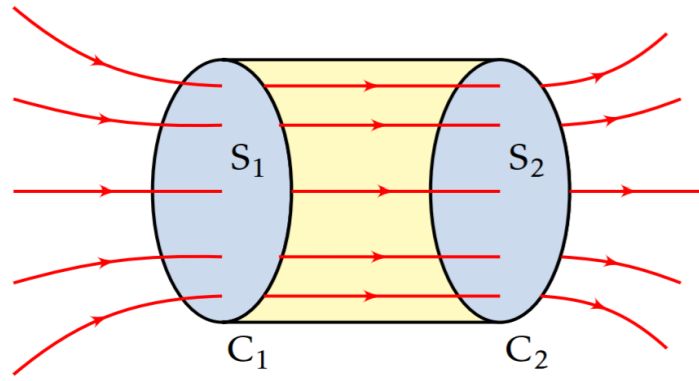
### II. 3.1 Les lignes du champ magnétique :

Un matériau magnétique est un matériau de haute perméabilité magnétique. Le rôle est de canaliser efficacement les lignes de champ magnétique. Ceci permet de réduire les fuites. La figure suivante montre deux bobines couplées sans matériau magnétique entre eux. Seule une partie du champ de la boucle 1 se rend à la boucle 2. [11]



*Figure II.6 : Deux surfaces couplées magnétiquement*

Avec un matériau magnétique, les lignes de champ sont guidées et les deux surfaces sont bien couplées :



*Figure II.7 : Deux surfaces couplées magnétiquement avec un matériau magnétique*

### II. 3. 2. Aciers doux :

Les matériaux doux sont des matériaux qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler ( $H_C$  est petit). A l'opposé des matériaux durs, un matériau doux présente un cycle d'hystérésis très petit voire inexistant ( $1 \cdot 10^{-2} \text{ A/m} < H_C < 100 \text{ A/m}$ ). C'est la base des machines tournantes ou de tout système magnétique voyant une induction alternative ( $\mu_r$  dans la zone linéaire : 50 à  $10^4$ ). [11]

Ils sont réalisés à base de Fer. En fonction de l'alliage utilisée, on trouve différente valeur de champ de saturation  $B_{\text{sat}}$  :

Fe	: $B_{\text{sat}} \rightarrow 2.2\text{T}$	
FeSi	: $B_{\text{sat}} \rightarrow 1.8\text{T}$	Bonne tenue mécanique (Moteur, transformateur)
FeCo	: $B_{\text{sat}} \rightarrow 2.4\text{T}$	Faibles pertes, cher !!
Céramique	: $B_{\text{sat}} \rightarrow 0.5\text{T}$	Très faibles pertes (H.F.)
FeNi	: $B_{\text{sat}} \rightarrow 1,3\text{T}$	Faible $H_C$ (Alimentation à découpage)

Exemples d'alliages utilisés pour les tôles des transformateurs

FeSi 3.5% de Si	FeSi à grains orientés
Saturation à $B_{\text{sat}} \cong 2\text{T}$	Saturation à $B_{\text{sat}} \cong 3\text{T}$
Induction rémanente $B_r \cong 0$	Induction rémanente $B_r \cong 1.4\text{T}$
Champ coercitif $H_C \cong 0$	Champ coercitif $H_C \cong 8\text{A/m}$
Perméabilité relative $\mu_r=7000@50\text{Hz}$	Perméabilité relative $\mu_r>40'000@50\text{Hz}$

Toute variation d'induction dans une matière magnétique génère des pertes sous forme d'échauffement. On distingue les pertes par hystérésis, par courant de Foucault et des pertes résiduelles ou par traînage dues au retard du champ l'induction magnétique (B) par rapport au champ magnétique (H).

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la surface du cycle et donc à la fréquence de parcours, pour une valeur  $B_{\text{max}}$  donnée. Les pertes par courants de Foucault résultent des courants créés dans la matière conductrice par un flux variable dans le temps. Pour réduire les pertes par hystérésis, il faut agir sur la composition des alliages et le contrôle des impuretés, tout en procédant parfois à des traitements thermiques appropriés. On vise un cycle le plus étroit possible et une perméabilité maximum si l'on veut conduire le flux sur un parcours donné avec un rendement maximum. Le fer ordinaire ou fer doux a des propriétés moyennes dans ce domaine, en raison des impuretés qu'il contient ( $U_{r \text{ max}} = 5000$ , pertes 10 à 12 W/Kg à 1.5T et 50Hz). Sa purification (fer pur Armco), associée à un traitement coûteux, à haute température en atmosphère d'hydrogène, apporte

des améliorations spectaculaires ( $\mu_{\text{max}} > 10^5$ ) tout en réduisant les caractéristiques mécaniques. La perméabilité relative  $\mu_r$  peut être augmentée par adjonction de quelques % de silicium. Le champ coercitif  $H_C$  diminue considérablement et la résistivité augmente. La baisse de 10% à 20% de l'induction de saturation est largement compensée par la diminution des pertes. Il existe toute une série d'alliages de Fe-Ni présentant, selon le taux de Ni (env. 30% à 80%), les traitements thermiques et mécaniques appliqués, des perméabilités relatives  $\mu_r$  très élevées, des champs coercitifs minimum, etc. ... On pense notamment à des alliages spéciaux à base de Cobalt, aux ferrites à haute perméabilité et à faibles pertes à haute fréquence utilisées en électronique. Dans d'autres applications ou types de moteurs, on a à faire à des flux constants. Le problème des pertes est alors tout différent et on peut employer un matériau magnétique massif ; c'est le cas pour certains moteurs à courant continu.

### II. 3. 2. 1 Circuits magnétiques

Ils sont basés sur l'utilisation de matériaux ferromagnétiques avec comme but d'obtenir un champ d'induction  $B$  dans une zone précise (entrefer). Pour ce faire, on crée un champ d'excitation  $H$  à l'aide de bobinage puis on le canalise vers la zone d'utilisation (entrefer).

#### II. 3. 2. 1.1. Constitution

On peut résumer un circuit magnétique à cette géométrie

On retrouve trois éléments :

1. le bobinage qui génère l'excitation et donc le champ ;
2. la culasse qui dirige le champ  $H$  vers la zone utile. La culasse impose le parcours du champ magnétique de part sa grande perméabilité par rapport à l'air. Le matériau qui compose la « culasse » se comporte comme un tube de champ
3. l'entrefer où l'on souhaite utiliser le champ. L'entrefer est la zone d'interaction avec l'extérieur.

#### II. 3. 2. 1.2. Mise en équation : cas parfait

La mise en équation se base sur les trois lois fondamentales que nous avons établies :

##### **Conservation du Flux – Théorème d'Ampère – Loi des matériaux**

Dans le cas parfait, le circuit magnétique se confond avec un tube de champ. Tout le flux est canalisé par le circuit. De plus, il a un comportement linéaire en tout point :  $B = \mu H$  ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ ). Il en est de même dans l'entrefer :  $B = \mu_0 H$

#### II. 3. 2. 1.3. Circuit magnétique avec entrefer

D'après le théorème d'Ampère

$$H(L - \delta) + H\delta = NI$$

$L$  : longueur moyenne des lignes de champ [m]

$\delta$  : longueur de l'entrefer [m]

N : nombre de spires de la bobine  
 I : courant dans la bobine [A]  
 H : excitation magnétique dans la matière [A/m]  
 H<sub>0</sub> : excitation magnétique dans l'entrefer [A/m]

### II. 3. 2. 2. Caractéristique B(H) d'un matériau magnétique :

On a vu que la relation entre la densité de flux et le champ magnétique est  $B = \mu H$ . Dans le vide (ou l'air), cette caractéristique prend la forme d'une relation linéaire. Le vide est un milieu linéaire, homogène (la qualité est uniforme) et isotopique (les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions). La relation B(H) du vide est donné dans la figure II.8. [11]

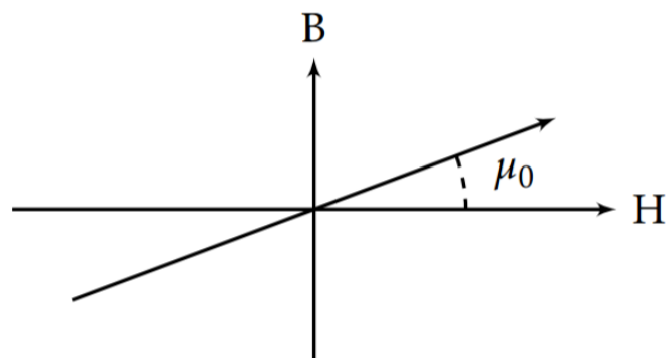


Figure II.8 : Relation B(H) du vide

Pour un matériau magnétique, la relation B(H) est :

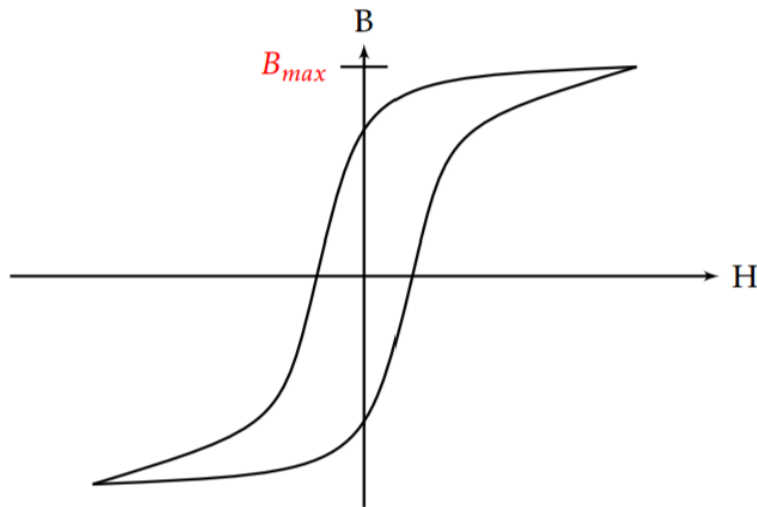
$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$$

Où  $\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau. Pour la plupart des matériaux, la perméabilité n'est pas constante, et la relation B(H) est non-linéaire. On peut classifier les matériaux magnétiques en deux groupes importants :

- matériaux non-magnétiques :  $\mu_r$  est environ 1. Exemple : air, verre, cuivre, aluminium.
- matériaux ferromagnétiques :  $\mu_r$  est très élevé (100 à 100000). Exemple : fer, acier, cobalt, alliages, etc... La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type **hystérésis**.

Où  $\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau. Pour la plupart des matériaux, la perméabilité n'est pas constante, et la relation B(H) est non-linéaire. On peut classifier les matériaux magnétiques en deux groupes importants :

- matériaux non-magnétiques :  $\mu_r$  est environ 1. Exemple : air, verre, cuivre, aluminium.
- matériaux ferromagnétiques :  $\mu_r$  est très élevé (100 à 100000). Exemple : fer, acier, cobalt, alliages, etc... La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type **hystérésis**.



**Figure II. 9 :** Courbe hystérésis typique.

$B_{max} = 1.5T$  (fer)

$B_{max} = 0.3T$  (ferrite)

### II. 3. 3. Pertes magnétiques :

Il y a deux grandes sources de pertes dans les matériaux magnétiques :

1. Pertes par hystérésis
2. Pertes par courants de Foucault

#### II. 3. 3. 1. Pertes par hystérésis

Sous excitation cyclique (sinusoïdale, par exemple), le matériau magnétique fait un cycle d'hystérésis et crée ainsi des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'opération. Une formule empirique permet de calculer les pertes (par  $m^3$ ) :

$$P_{hys} = KB_{max}^2 f$$

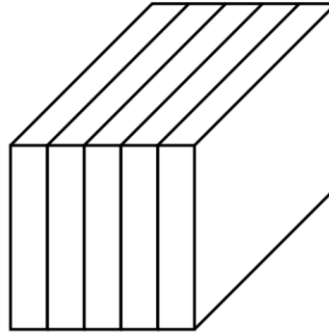
Où  $K$  est une constante qui dépend du matériau,  $B_{MAX}$  est la valeur maximale de la densité de flux, et  $f$  est la fréquence de fonctionnement.

On réduit les pertes par hystérésis en utilisant des tôles ayant un faible pourcentage de silicium (0.8 à 3.5%) ou en utilisant des tôles à courants orientés (tôles en silicium à faible teneur en carbone).

#### II. 3. 3. 2. Pertes par courants de Foucault

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau par des forces électromagnétiques crée un courant induit dans le matériau. Ces courants induits vont créer des pertes  $RI^2$  (puisque les matériaux magnétiques ont une résistivité non-nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur. Afin de

minimiser les courants induits dans le noyau, on utilise des noyaux formés de laminations isolées électriquement les unes des autres (pour les bobines fonctionnant à basses fréquences) ou des noyaux en ferrite (pour les bobines fonctionnant à hautes fréquences).



*Figure II.10 : Noyau lamine*

On peut estimer les pertes par courant de Foucault avec la relation empirique suivante :

$$4 \frac{\pi^2}{6} \frac{d^2 B_{\max}^2 f^2}{\rho D}$$

Où : **d** : est l'épaisseur de la plaque,  **$\rho$**  est la résistivité,

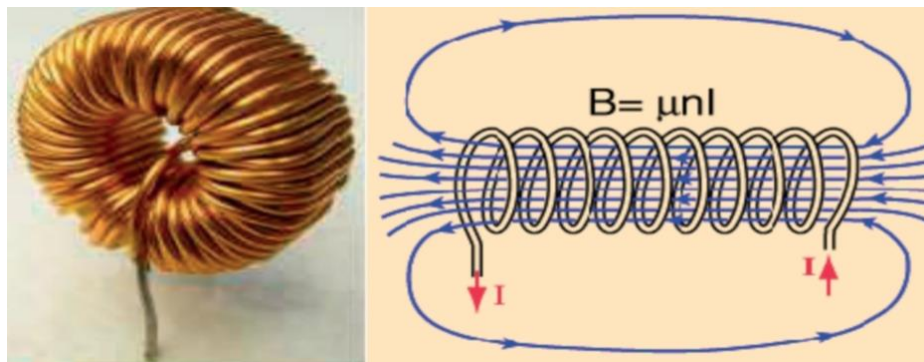
**D** : est la densité du matériau,

**F** : la fréquence.

Habituellement, les pertes sont estimées à l'aide de données fournies par les manufacturiers.

#### II.3.4 Définition, rôle et constitution :

L'inductance par définition est un dipôle formé d'une ou de plusieurs spires de fil enroulées autour d'un noyau (figure 2.10 a et b). Ce noyau peut être isolant et non magnétique ou réalisé avec un matériau magnétique canalisant les lignes de champ. Il peut être également fermé, avec ou sans entrefer afin de constituer un circuit magnétique permettant d'obtenir un meilleur confinement des lignes de champ, une valeur plus élevée de l'inductance et la possibilité de stocker une énergie importante.



*Figure II.11 : a) bobine b) Lignes de champ magnétique*

Lorsque le bobinage d'une inductance est parcouru par un courant  $i$ , celui-ci crée un champ magnétique  $B$  qui donne naissance à un flux  $\varphi$  à travers chacune des spires de la bobine. Le flux total  $\Phi$  à travers la bobine est la somme des flux à travers chaque spire :  $\Phi = n\varphi$ . [14]

## II.4. Haut fourneau :

### II.4.1. Définition :

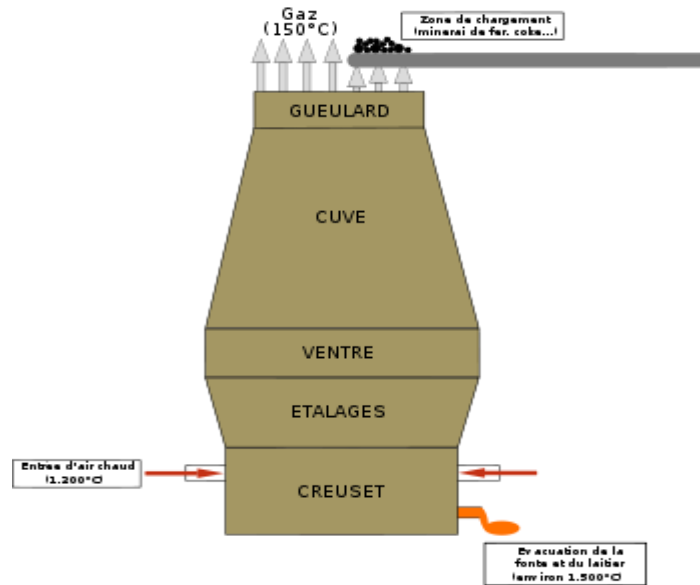
Un **haut fourneau** est un four industriel qui sert à la fabrication de la fonte (à partir de laquelle on fabrique l'acier). Dans un haut-fourneau, on brûle à très haute température (1 600 °C) un mélange de minerai de fer et de coke (charbon traité pour enlever le gaz) ; souvent on y ajoute des additifs. La combustion du coke produit de la chaleur et les atomes de carbone se mêlent aux atomes de fer pour donner un nouveau produit, la fonte, qui dans le haut-fourneau est un métal fondu.

Pour obtenir ces très hautes températures, il faut apporter de l'air sous pression. Un haut fourneau est d'ailleurs appelé *blast furnace* (« fourneau ventilé ») en anglais. La plus haute température dépend de l'oxygénation du minerai. On peut s'en rendre compte facilement : plus on souffle fort sur une braise, plus celle-ci rougit, signe qu'elle est plus chaude. De larges soufflets apportent l'air nécessaire. Ces soufflets sont animés par de l'énergie hydraulique ou éolienne.

Une telle température ne peut pas être obtenue dans un bas fourneau (installation des premiers temps de la sidérurgie). Dans un bas fourneau l'air était amené par des moyens mécaniques rudimentaires (par exemple un soufflet à vent), et le forgeron devait, après l'avoir sorti du bas fourneau, marteler le produit obtenu pendant très longtemps, pour en extraire les impuretés principalement.

### II.4.2. Constitution et fonctionnement

- La cuve, de forme cylindrique élargie dans le 1/4 de sa base, est constituée de briques réfractaires soutenues par une armature extérieure en tôle.
- Le chargement s'effectue par le haut (minerai de fer, déchets ferreux, coke ou « Charbon »).
- La récupération de la fonte s'opère par coulée au bas du four.
- Une injection d'air est effectuée au plus large du four, afin d'entretenir la combustion du charbon, permettant ainsi la fusion de tous les éléments.
- La coulée de laitier, qui correspond aux scories issues de la fusion des stériles du minerai, se fait après la coulée de fonte (le laitier flottant sur la fonte, il n'apparaît au trou de coulée qu'une fois que le niveau de fonte dans le creuset est suffisamment bas). Si le haut-fourneau consomme des minerais pauvres en fer, la quantité de laitier produite peut imposer l'utilisation d'un trou dédié, situé plus haut.



*Figure II.12 : Les différentes parties du haut fourneau*

- La température est variable en fonction de la hauteur dans la cuve (de haut en bas):

1. 300 °C au niveau du gueulard, phase de dessiccation;
2. 400 °C à 800 °C, phase de réduction ;
3. 900 °C à 1 200 °C, phase de carburation ;
4. 1200 °C, phase de fusion ;
5. 1 600 °C, phase de liquéfaction, lieu des coulées.

Compte tenu de la forte présence de carbone au cours du processus, le produit obtenu est un alliage fer-carbone de type fonte (taux de carbone supérieur à 2.1 %).

#### II.4.3. Installations périphériques :

Si la cuve d'un haut-fourneau est la partie la plus critique de l'outil, celle-ci ne représente qu'une petite partie des installations. La marche d'un haut-fourneau ne peut en effet pas s'envisager sans:

- Des installations de stockage, de pesage, de montée et d'enfournement des matières premières

Un atelier, de dimensions parfois imposantes, stocke, crible et pèse les matières premières pour constituer les charges qui alimenteront le haut-fourneau. Ces charges calibrées, constituées de coke ou de minerai de fer, sont amenées au sommet de la cuve (le gueulard) par un plan incliné (si celui-ci est alimenté par skips ou bennes téléphériques), par un élévateur vertical à bennes ou par une bande transporteuse. Au gueulard, un dispositif (cloches ou pelle) étale la charge pour constituer les strates de minerai de fer et de coke.

Les halls de coulée

Plus qu'une halle, l'endroit où la fonte et le laitier débouchent est un véritable outil: le bouchage et le débouchage régulier du trou de coulée, la séparation de la fonte du laitier (par siphon si le trou de coulée est commun aux deux produits), l'entretien des rigoles à fonte et à laitier, l'analyse et l'aiguillage des liquides en fusion vers les poches,... en font un ensemble distinct et complexe. Les contraintes mécaniques et thermiques liées au passage régulier de fluides chauds amènent généralement à des conceptions de rigoles et de dalles articulées.

une installation de dépoussiérage des gaz

Les gaz issus du gueulard ont traversé les charges enfournées, en se chargeant de particules abrasives et polluantes. Le dépoussiérage de ces énormes quantités de gaz se fait généralement en deux étapes: une étape sèche (par cyclone ou pot à poussière) puis une étape humide dans un laveur.

- les compresseurs à vent froid et les fours à vent chaud

L'air soufflé dans les tuyères est réchauffé dans des fours à vent chaud (souvent appelés cowpers), qui sont chauffés par la combustion du gaz de haut-fourneau. Une fois chauds, la chaleur est restituée à l'air de soufflage qui atteint 1 200 °C. Les cowpers, qui sont généralement au nombre de 3 par haut-fourneau, sont des constructions aussi imposantes que la cuve elle-même.



*Figure II.13 : Plan incliné pour bennes téléphériques aux hauts-fourneaux de Völklingen*

#### **II.4.4. Installations annexes :**

Si les formes générales de la cuve ont peu évolué ces dernières décennies, beaucoup d'installations périphériques sont apparues ces dernières années. Leur rôle est essentiel pour assurer l'efficacité

économique de l'outil, son adaptation aux évolutions économiques (fluctuations des cours des ferrailles, du minerai de fer, du charbon, ...)

- injection de charbon

Cette installation est composée d'un broyeur à charbon, d'un sécheur et d'un silo d'injection à débit contrôlé. Le charbon, finement broyé, est injecté au niveau des tuyères, en même temps que l'air chaud et aide à l'obtention d'une atmosphère réductrice riche en CO. Les avantages recherchés sont :

- Substitution du coke par du charbon meilleur marché
- Amélioration du rendement chimique, le charbon étant injecté au meilleur endroit pour jouer son rôle d'agent réducteur
- limitation de la teneur en soufre dissous dans la fonte qui est amené par le coke
- enrichissement en CO du gaz de haut-fourneau qui devient meilleur combustible

Historiquement, l'injection de charbon a été précédée des injections fioul, moins performantes, mais qui n'exigeaient pas d'installation de broyage. Une injection de 200 kg de charbon par tonne de fonte produite est un point de fonctionnement fréquemment visé.

#### **II.4.5. Traitement du laitier :**

Le volume de laitier produit par un haut-fourneau est comparable à celui de la fonte. La valorisation de laitier en tant que remblais concassé est faite en coulant le laitier liquide dans des fosses, où celui-ci va craqueler en se solidifiant. Plus rentable, la vente sous forme de granulats est réalisée par des installations de bouletage, qui sont aujourd'hui progressivement remplacées par celles de granulation. Dans ces installations, le laitier liquide est violemment refroidi au contact d'eau. Le produit obtenu est un sable fin et homogène qui se vend aux cimenteries ou aux verreries.

#### **II.4.6. Évolutions récentes ou à venir :**

Les recherches et modernisations actuelles visent essentiellement à améliorer la rentabilité et la durée de vie de l'outil. Cependant, la limitation de l'impact environnemental d'un haut fourneau est aujourd'hui une préoccupation essentielle.

Améliorations économiques

Circuit de préparation et d'enfournement des matières premières polyvalent et configurable. L'époque où la charge d'un haut-fourneau ne se composait que de minerai et de coke est révolue. Certains hauts fourneaux peuvent remplacer leur minerai par des déchets ferreux, mixer les qualités de minerais. Il est alors essentiel de contrôler finement l'arrivée et la disposition des charges dans le gueulard.

- Augmentation de la pression dans la cuve pour améliorer le rendement de la carboréduction. Une pression supérieure à 2 bar est un objectif courant pour un haut-fourneau moderne.
- Améliorations de la durée de vie
- Creuset en matériau réfractaire à base carbone, à très haute conductivité thermique (le refroidissement du creuset crée alors une couche de fonte solidifiée qui protège les briques). La durée de vie des creusets a doublé en 30 ans : elle était de 10 ans en 1980, les objectifs actuels sont de 20 ans. Cet aspect est essentiel quand on sait qu'une réfection d'un creuset peut atteindre, en 2010, 100 millions d'euros.
- Refroidissement renforcé de la cuve. Là aussi, l'objectif est de créer une couche protectrice qui va protéger les parois de l'abrasion due au minerai.
- Améliorations environnementales
- Passage en circuit fermé des circuits d'eau de refroidissement et de granulation de laitier.
- Récupération de chaleur, notamment des fumées des fours de réchauffage du vent (cowpers).
- Récupération de l'énergie de détente pneumatique des gaz captés au gueulard par un ensemble turbo-alternateur.
- Condensation de vapeur, notamment celles produites lors de la granulation de laitier, pour éviter l'émission de dioxyde de soufre ou d'hydrogène sulfuré.
- Recyclage du carbone pour éviter l'émission de gaz à effet de serre L'objectif des recherches actuelles consisterait à réinjecter aux tuyères le CO capté au gueulard, au lieu de le brûler pour produire de l'électricité

## II.5. Matériau ferromagnétique dur :

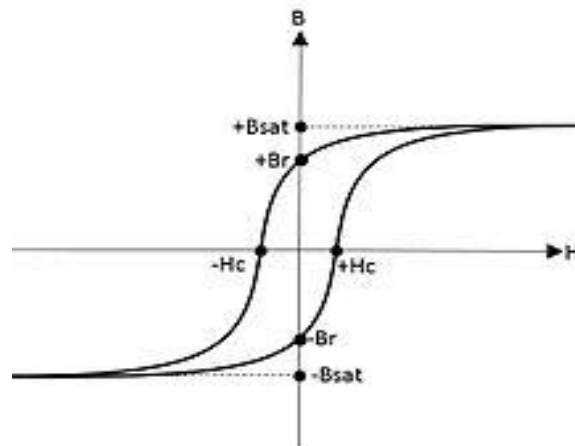
Les **matériaux ferromagnétiques durs** forment un sous-groupe des matériaux ferromagnétiques. Ils possèdent une aimantation naturelle présente en absence de champ magnétique extérieur. Comme pour les autres matériaux ferromagnétiques, les ferromagnétiques durs ont la particularité de

s'aimanter fortement en présence d'un champ magnétique extérieur. On distingue les ferromagnétiques durs des ferromagnétiques doux par leurs propriétés magnétiques, telles que la forme de leur cycle d'hystérésis. Le cycle d'hystérésis des **ferromagnétiques doux** est fin et allongé vers le haut, alors que celui des ferromagnétiques durs est aplati et allongé sur l'axe des abscisses.

Les matériaux durs magnétiquement ne sont pas nécessairement durs mécaniquement. La dureté mécanique et la dureté magnétique sont deux propriétés différentes et non liées. Les matériaux ferromagnétiques durs sont à la base des aimants permanents, et notamment des aimants à forte puissance [4].

## II.5.1 Caractéristiques d'un ferromagnétique dur

### II.5.1.1. Cycle d'hystérésis :



*Figure II.14. Cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique dur*

Comme pour tous les matériaux ferromagnétiques, les ferromagnétiques durs possèdent une évolution de l'aimantation non linéaire avec le champ magnétisant. Les chemins empruntés pour passer d'une aimantation de saturation positive à une aimantation de saturation négative sont différents. On observe l'apparition d'un cycle d'hystérésis. Ce cycle fait apparaître l'aimantation rémanente ( $M_r$ ), le champ coercitif ( $H_c$ ) et l'aimantation de saturation ( $M_s$ ) du matériau.

Chez les matériaux ferromagnétiques durs, ce cycle d'hystérésis est très large, c'est-à-dire que le champ coercitif ( $H_c$ ) du matériau est très élevé. Les ferromagnétiques durs ont une aimantation qui croît lentement avec le champ appliqué. Du fait de son champ coercitif fort, la désaimantation est difficile. Ces raisons font que l'aire du cycle d'hystérésis est importante, ce qui amènera des pertes

magnétiques importantes.

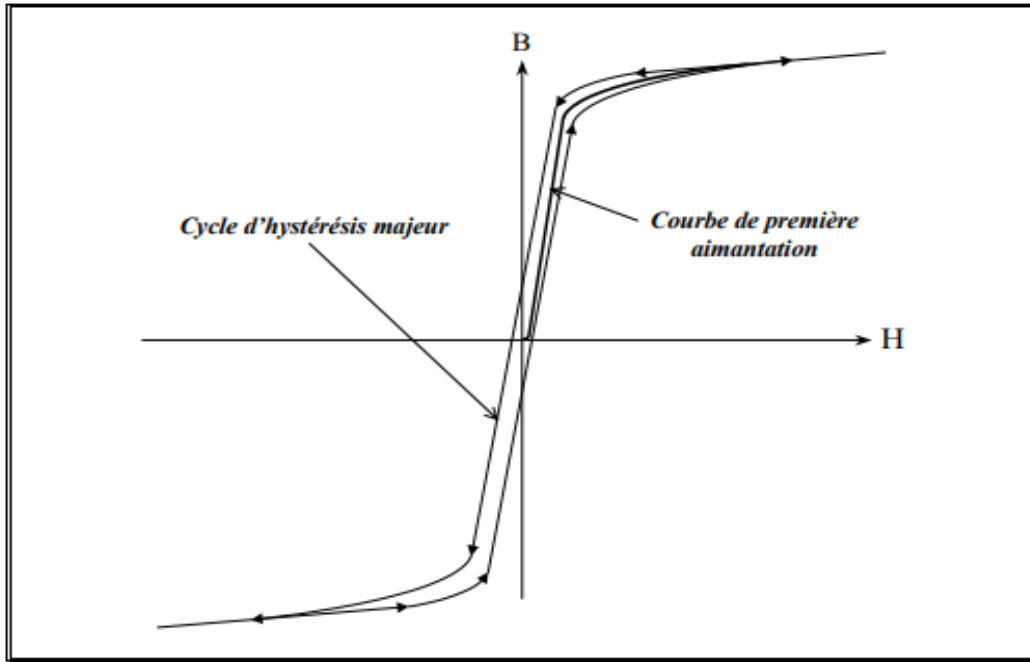


Figure II.15 : Caractéristique magnétique  $B(H)$  d'un matériau ferromagnétique doux

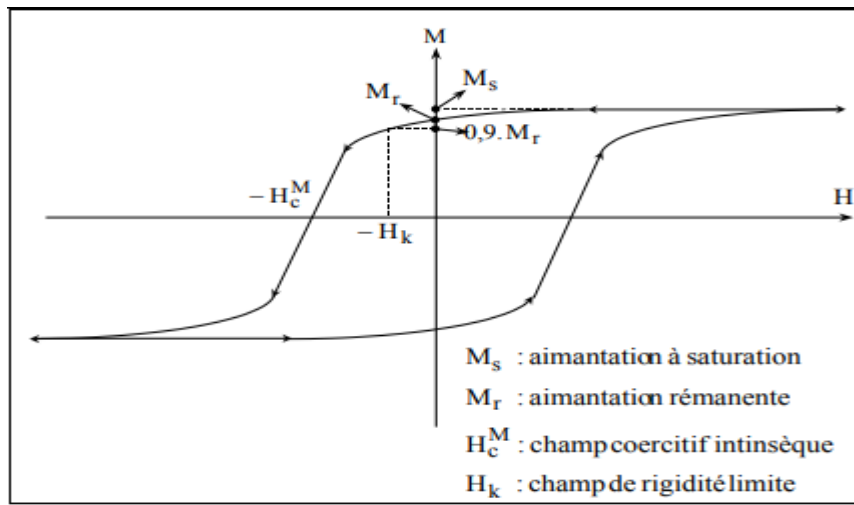


Figure II.16: Courbe caractéristique de l'aimantation d'un aimant permanent en fonction du champ qui lui est appliqué.

### II.5.1.2. Propriétés magnétiques :

Les matériaux ferromagnétiques durs se différencient des autres matériaux notamment par leurs propriétés magnétiques. Les ferromagnétiques durs ont un champ coercitif important (de 50 à

1 500 kA/m). C'est-à-dire que le champ magnétique extérieur, qui doit être appliqué pour annuler ou retourner l'aimantation naturelle du matériau, doit être très élevé.

De même, les ferromagnétiques durs restent aimantés après suppression du champ magnétisant. Cette aimantation, appelée aimantation rémanente, vaut entre 0,2 à 1,3 T.

L'aimantation à saturation, qui correspond à l'aimantation maximale du matériau, est également très élevée. Elle peut prendre des valeurs de l'ordre de 10 T (contre 10  $\mu$ T chez les ferromagnétiques doux). Ces différentes propriétés font des ferromagnétiques durs de bons aimants permanents.

### **II.5.2. Origine microscopique**

Pour obtenir un matériau avec un champ coercitif important, il faut limiter la nucléation et/ou la propagation des parois, qui sont à l'origine du renversement de l'aimantation.

Plus l'aimantation se renverse facilement, plus le champ coercitif du matériau est faible et plus il y a de domaines magnétiques. Les défauts structuraux vont agir comme sites de nucléation. Afin d'éviter ce phénomène, le matériau peut être divisé en plusieurs parties isolées magnétiquement. De ce fait, le renversement de l'aimantation provoqué par un défaut restera localisé et ne provoquera pas un effet de cascade de renversement dans le matériau. La technique la plus utilisée pour obtenir une telle microstructure est la métallurgie des poudres [6]

## RÉFÉRENCES chapitre II:

- [1] H. Wetzel, A. Siegel, H. D. Njiende, N. Fröhleke, and J. Böcker, “Low Voltage Asymmetrical Half-Bridge Converter with Integrated Magnetics” Institute of Power Electronics and Electrical Drives, University of Paderborn; 2004.
- [2] W. water and J. Lu, “Improved High-Frequency Planar Transformer for Line Level Control (LLC) Resonant Converters”, *Magnetics Letters*, IEEE, vol. 4, pp. 1–4, 2013
- [3] R. Chen, J. T. Strydom, and J. D. van Wyk, “Design of planar integrated passive module for zero-voltage-switched asymmetrical half-bridge PWM converter,” *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 39, no. 6, pp. 1648–1655, 2003.
- [4] François Leprince Ringuet, *technique de l'ingénieur*, 1994
- [5] José-Philippe Pérez, robert Carles, robert fleckinger, *électromagnétisme- fondements et applications*, 2001
- [6] Richard H. Bube, *electrons in solids- An introductory survey*, 1992
- [7] Charles kittel, *physique de l'état solides*, 1998
- [8] A. BASAK and A. A. ABDUL QADAR "Fondamental and harmonie flux behaviour in A 100 KVA Distribution Transformer Core" *IEEE T. Mag.*, Vol. MAG-19, NO. 5, pp. 2100-2103 (1983).
- [9] F. G. BAILY "The hysteresis of iron and steel in a rotating magnetic field" *Phil. Trans. Roy. Soc. LONDON* 187, pp. 715-746 (1896).
- [10] J. BONNEFOUS "Méthode de mesure de l'hystérésis rotationnelle ferromagnétique" *c.R. Académie des Sciences (FRANCE)*, Vol. 255, pp. 1706-1708 (1962).
- [11] Gabriel Cormier, *Circuits magnétiques et inductance*
- [12] Revenir plus haut en : a b c d e f g h et i J.C Duez, G. Auclerc, *Électronique appliquée* 2, Paris, Classiques Hachette, 1973 ; 2e éd. 1975, 304 p. (ISBN 2010029801 et 978-2010029806), p. 65-66.
- [13] Revenir plus haut en : a et b [PDF] « « Réduction des courants de Foucault », dans *Électrotechnique*, chap. 11 « Inductance », p. 10/14 » [archive], sur [psic.ch](http://psic.ch), Éditions de la Dunanche, octobre 2000 (consulté le 7 octobre 2012).
- [14] Dagal Dari Yaya “Conception, Réalisation et Caractérisation d’Inductances Planaires à Couches Magnétiques » UNIVERSITÉ JEAN MONNET DE SAINT-ÉTIENNE, thèse soutenue en mars 2013, pp.170

**Chapitre III.**

A large, hollow, downward-pointing arrow with a thin black outline, centered below the 'Chapitre III.' box.

**PROBLEMATIQUE**

A large, hollow, downward-pointing arrow with a thin black outline, centered below the 'PROBLEMATIQUE' box.

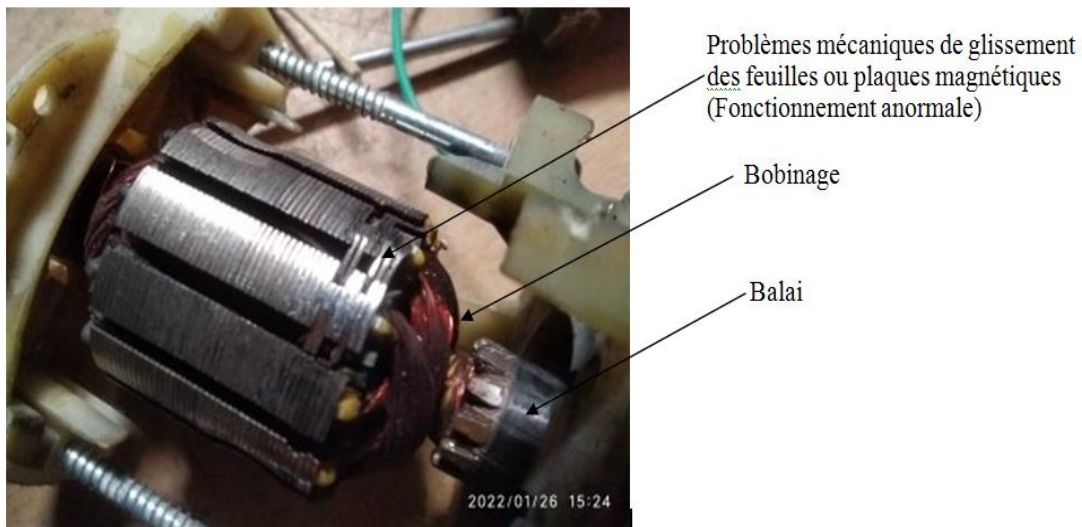
**Chapitre III :****III.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous étudions certains des problèmes magnéto-mécanique des feuilles métalliques d'un rotor, auxquels est confronté le moteur électrique, qui à leur tour affectent le fonctionnement de ce dernier

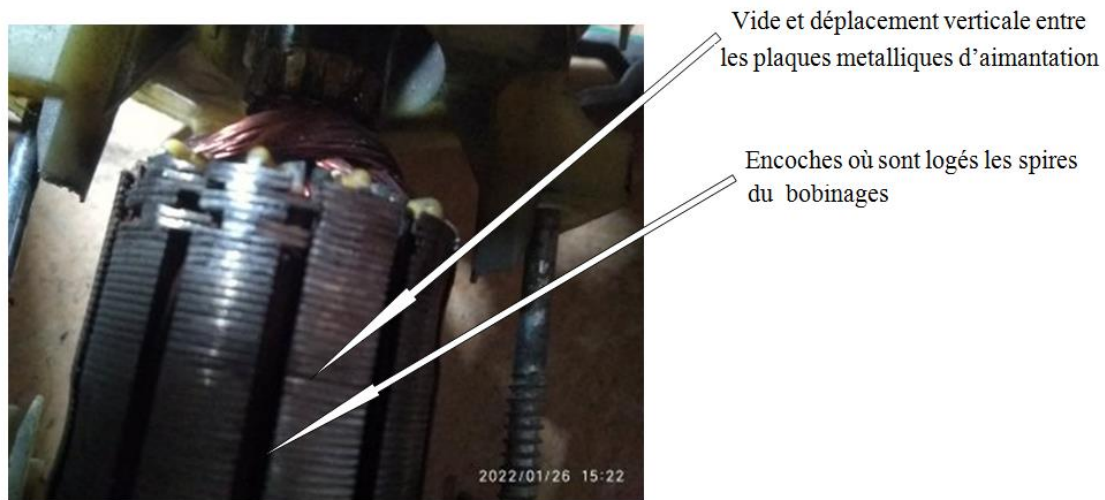
Nous avons également étudié l'entretien qui peut améliorer le rendement du moteur pendant qu'il fonctionne et la maintenance et perspectives des moteurs électriques.

**III.2. Problèmes :****III.2.1. Problèmes magnéto-mécanique des feuilles métalliques d'un rotor.**

Parmi les problèmes mécaniques qui apparaissent pendant une certaine durée de travail, c'est que les plaques ou feuilles métalliques jointives qui doivent être bien arrangés. Ces plaques à cause des forces de glissement ou forces magnétiques se déplacent l'une par rapport à l'autre, et par rapport a leurs emplacements initiaux comme c'est indiqué dans la figure si dessous



*Figure III.1 : Déplacement des plaques rotorique par rapport a leurs places initiales*



**Figure III.2 :** Vide et déplacement verticale entre les plaques métalliques d'aimantation

Pour bien analyser les problèmes magnéto-mécaniques des plaques ou feuilles métalliques d'aimantation soit rotoriques ou statoriques, on doit faire des études pour l'obtention d'un modèle par circuit magnétique équivalent d'un moteur associant un stator. La problématique de la circulation du flux dans l'entrefer ; surtout la circulation tridimensionnelle du flux dans le fer. Que se soit un modèle, avec un flux radial dans l'entrefer, pour le comportement du couple à vide, ou un second modèle introduisant les formes d'inclinaison du flux principal dans l'entrefer afin de mieux se rendre compte du comportement du moteur.

**III.2.2. Exemple** de modélisation par réluctances du flux dans l'entrefer d'une machine à rotor à aimants en surface :

Cet exemple d'étude est une étape vers l'obtention d'un modèle par circuit magnétique équivalent d'une machine associant un stator à griffes à un rotor à aimants en surface. La problématique de la circulation du flux dans l'entrefer est ici isolée, avec une réduction à une machine 2D à dents de même largeur que les aimants ;

### **III.2.3. Position du problème :**

L'objectif est d'établir un modèle de la machine à flux transverse à griffes à aimants permanents en surface. La circulation du flux à l'intérieur de la machine étudiée est tridimensionnelle, en particulier à l'intérieur du stator, à l'intérieur duquel le flux se reboucle en circulant dans la direction de l'axe de rotation. La modélisation de cette machine par éléments finis est donc nécessairement tridimensionnelle ; elle est précise mais exige un temps important.

### III.3. Exemple du choix de la méthode de modélisation [3]:

La méthode habituelle pour modéliser des machines synchrones à aimants en surface est le calcul analytique direct du champ dans l'entrefer, souvent réduit au calcul des premiers harmoniques ; Le fer est alors souvent supposé de perméabilité infinie. Cette méthode, bien adaptée aux structures classiques ; se heurte à plusieurs difficultés pour la machine visée. Tout d'abord, la circulation du flux dans le fer est complexe, elle ne peut être réduite facilement et doit être modélisée en détail. Les flux de fuite sont significatifs en raison du nombre élevé de paires de pôles, et l'effet de concentration de flux dans le pied de la dent va naturellement saturer cette zone, conduisant à un comportement fortement non-linéaire du fer, compliquant l'utilisation de modèles analytiques purs. Par ailleurs, la nature fortement saillante du stator, avec des dents de même largeur que les aimants du rotor, donnent des formes d'onde de champ dans l'entrefer assez rectangulaires, donc riches en contenu harmoniques et là encore plus difficile à modéliser avec un calcul analytique direct du champ dans l'entrefer associé à une analyse harmonique.

Tous ces éléments nous ont conduits à préférer la mise en place d'une modélisation par circuit magnétique équivalent, avec la construction d'un réseau de réluctances. Ce type de modèle de complexité intermédiaire, avec un temps de calcul contenu [3], permet de rendre compte plus facilement des fuites, de la saturation du fer et de formes de champ plus saillantes.

#### III.3.1. Réduction du problème [3] :

Une observation détaillée de la circulation des flux dans la machine fait apparaître deux problématiques assez distinctes. La première est la circulation des flux dans le rotor, les aimants et l'entrefer, qui prend place essentiellement dans le plan orthogonal à l'axe de rotation du moteur. Cette circulation a lieu principalement au sein de matériaux au comportement linéaire (si la culasse du rotor est bien dimensionnée), mais avec des transitions brutales aux frontières latérales des aimants et des dents pouvant induire des effets de bord significatifs. Il s'agit d'un problème bidimensionnel que nous pouvons isoler. La deuxième problématique est la circulation du flux dans le fer du stator et les flux de fuite associés. Il s'agit d'un problème tridimensionnel, dont une complexité attendue est le comportement fortement non linéaire, du fait du haut niveau de saturation du pied de dent. Ce problème sera étudié dans un deuxième temps une fois le modèle de circulation du flux dans l'entrefer bien établi.

Dans un premier temps, nous limitons donc l'étude à une projection des flux dans l'entrefer, selon une coupe orthogonale à l'axe de rotation de la machine. Le fer du stator est de perméabilité 400, représentative de la faible perméabilité du SMC, et le flux reboucle dans le plan via une culasse

imaginaire. La périodicité du système est prise en compte, et seule une paire de pôles est modélisée. Un bobinage induit est ajouté sur chaque dent. Le rotor est lui constitué de fer classique, de perméabilité relative 4000. La courbure de l'entrefer est négligée, et la machine est réduite à une machine linéaire, le déplacement du rotor étant assimilé à une translation. Cette machine réduite, représentée sur la figure 3, est donc une machine plane, munie au stator de deux grandes dents portant chacune un bobinage, avec un rotor se déplaçant en translation.



*Figure III.3 : Machine réduite modélisée [3],*

### III.4. MODELE A FLUX RADIAL

#### III.4.1. Présentation du modèle

Un circuit magnétique équivalent, composé de réluctances modélisant la circulation du flux magnétique dans la machine, est constitué. La force magnétomotrice du bobinage du stator est ajoutée en série avec la culasse du stator. Les aimants sont modélisés par une réluctance d'air en série avec une force magnétomotrice équivalente, proportionnelle à l'induction rémanente de l'aimant.

Les flux directs sont représentés simplement : dans l'entrefer situé à l'aplomb entre la dent stator et l'aimant du rotor, le flux est supposé vertical. Le flux situé entre les deux aimants du rotor est supposé nul, ainsi que le flux situé à l'aplomb de la dent stator mais pas en face d'un aimant. L'aimant est séparé en deux zones, la première située sous la dent stator, la deuxième située sous l'espace entre les deux dents stator. Le flux dans l'aimant est supposé vertical.

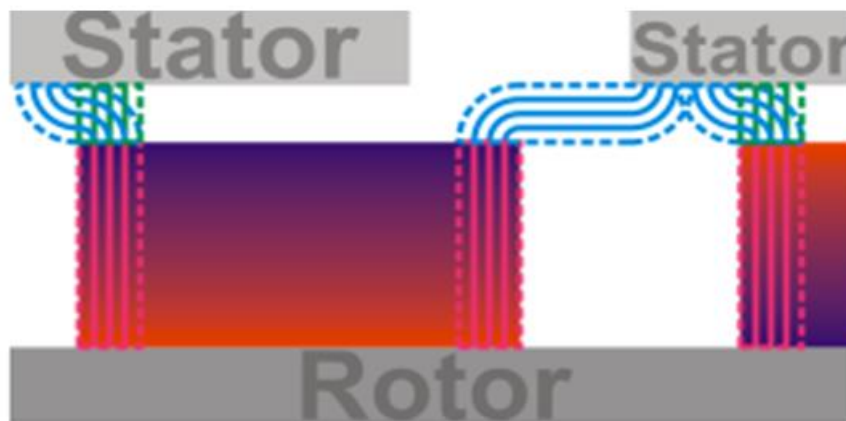
Le flux situé au-dessus de l'aimant mais entre les deux dents stator est modélisé vertical sur la hauteur de l'entrefer, puis se séparant en deux chemins (chacune modélisée par une réluctance dans le circuit équivalent) formant des arcs de cercle, comme présenté à la figure 4.

Nous modélisons également l'effet de bord correspondant à l'élargissement du flux au bord de

l'aimant : sur une largeur égale à l'épaisseur d'entrefer, un chemin de flux supplémentaire est ajouté, pour lequel le flux tourne de  $90^\circ$  vers l'extérieur, puis de  $90^\circ$  dans le sens opposé pour rejoindre la dent. Pour l'extrémité de l'aimant situé entre les deux dents stator, ce chemin de flux inclut une composante horizontale. L'inclusion de ces chemins de flux s'est avérée nécessaire pour améliorer la continuité du couple : s'ils étaient négligés, la coénergie totale présentait des ruptures de pente et donc des discontinuités de couple, limitant fortement la représentativité du modèle.



**Figure III.4 :** *Modèle de circulation du flux entre les dents stator.*



**Figure III.5 :** *Modèle de circulation du flux au bord des aimants*

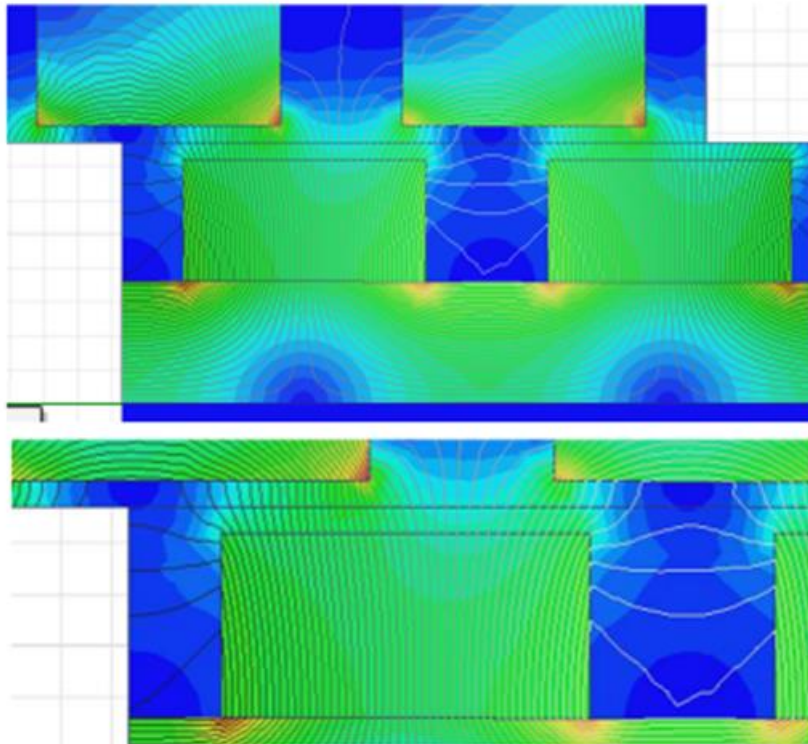
La symétrie du système est prise en compte et seul un pôle est modélisé, le deuxième étant déduit directement par antisymétrie. Le circuit magnétique équivalent est alors constitué de 12 à 18 réluctances distinctes et 10 à 12 flux indépendants selon la position.

Ce circuit est résolu en exprimant les lois de conservation des flux (lois des nœuds) en tous les points du circuit sauf un, puis le théorème d'Ampère (loi des mailles) sur un ensemble de mailles indépendantes. Le calcul nous donne alors l'ensemble des flux dans la machine pour chaque position.

### III.4.2. MODELE A FLUX INCLINÉ [3]:

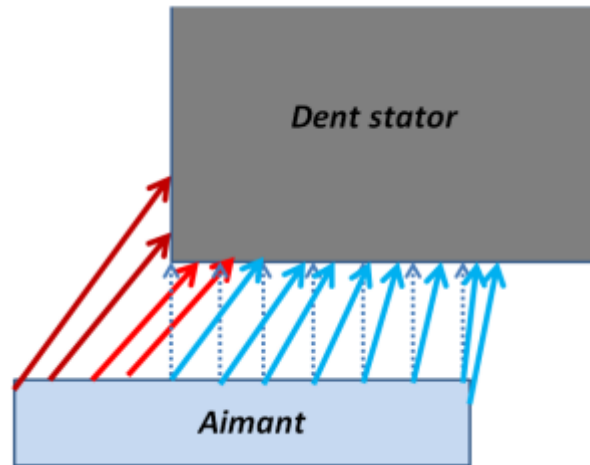
#### III.4.2.1. Analyse de l'écart

L'étude de la circulation des flux aux éléments finis, présentée sur la figure 12, fait apparaître que le flux principal, entre la dent stator et l'aimant, est incliné de manière significative autour de  $90^\circ$  (angle électrique), sous l'influence de la partie d'aimant située entre les deux dents du stator.



**Figure III.6 :** Circulation du flux simulée aux éléments finis [3],

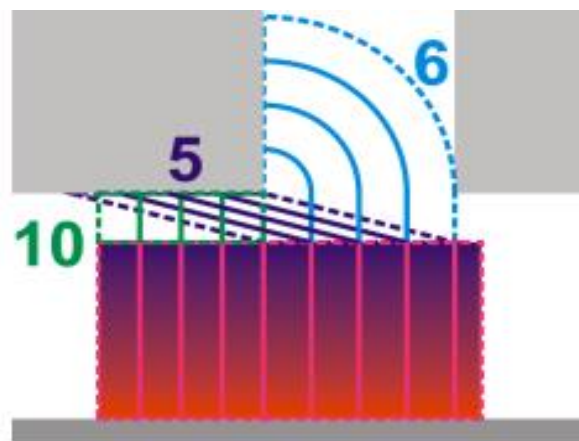
La partie d'aimant située à l'aplomb de l'espace entre les deux dents stator est située à une plus grande distance du fer du stator que le reste de l'aimant. Le flux sortant de cette portion d'aimant va donc rejoindre le fer du stator au plus court, en partie en arrivant sous la dent stator (en rouge sur la figure 13). Ce comportement va donc « tasser » le flux direct (pointillés bleu sur la figure 13), celui de la portion d'aimant située à l'aplomb de la dent, en l'inclinant vers la partie de la dent situé au-dessus de l'espace inter-aimants (flèches continues en bleu sur la figure 13). Nous faisons l'hypothèse que c'est ce phénomène, non modélisé dans le schéma initial, qui explique l'écart de notre modèle autour de l'angle électrique  $90^\circ$ .



**Figure III.7 :** inclinaison du flux dans l'entrefer

#### III.4.2.2. Nouveau modèle à flux incliné :

Dans ce nouveau modèle, nous supprimons les flux tournants qui étaient modélisés en bordure des aimants. Seuls trois chemins de flux sont modélisés dans l'entrefer et dans l'air situé entre les deux dents stator, représentés sur la figure.



**Figure III.8** Chemins de flux du modèle à flux incliné avant transformation

Les réluctances correspondant à ces trois chemins sont ensuite calculées ; nous les numérotons  $R_5$ ,  $R_6$  et  $R_{10}$ . Nous définissons alors le facteur d'inclinaison de flux :

$$F_{inc} = \frac{R_5 // R_6 // R_{10}}{R_5}$$

Ce facteur d'inclinaison joue un rôle clef dans la détermination de l'inclinaison du flux. Concrètement, il compare le flux du modèle classique ( $R_{10}$  et  $R_6$ ) avec le nouveau flux non modélisé

précédemment, R<sub>5</sub>.

### III.5. Différentes constitutions des entrefers :

Ils sont basés sur l'utilisations de matériaux ferromagnétique avec comme but d'obtenir un champ d'induction B dans une zone précise (entrefer).

Pour ce faire, on crée un champ d'excitation H à l'aide de bobinage puis on le canalise vers la zone d'utilisation (entrefer).

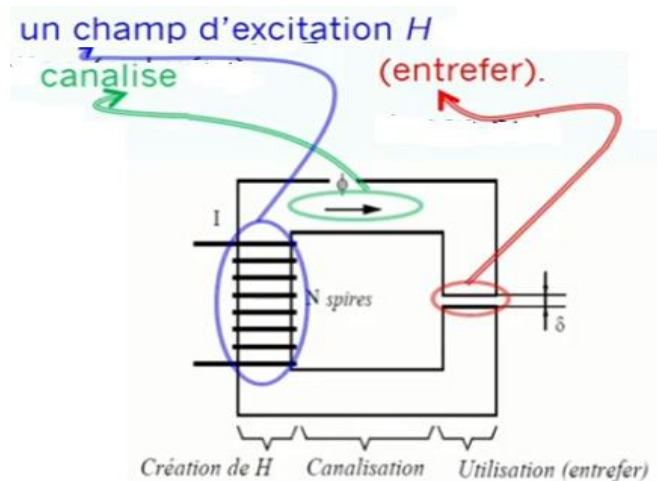


Figure III.9 : Schéma de constitution d'un entrefer.

#### III.5. 1. Mise en équation : cas parfait

La mise en équations se base sur les trois lois fondamentales :

- Conservation du flux
- Théorème d'Ampère
- Loi des matériaux

Dans le cas parfait, le circuit magnétique se confond avec un tube de champ de contour (C).

- Tout le flux est canalisé par le circuit.

De plus, le champ a un comportement linéaire en tout point :

- Dans le matériau :  $B = \mu_0 \mu_r H$  ;
- Dans l'entrefer :  $B = \mu_0 H$  .

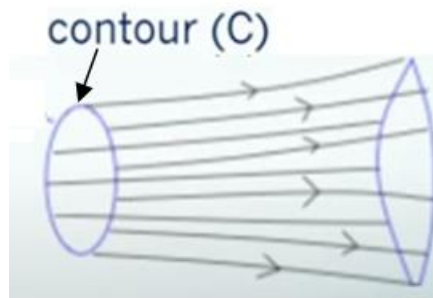
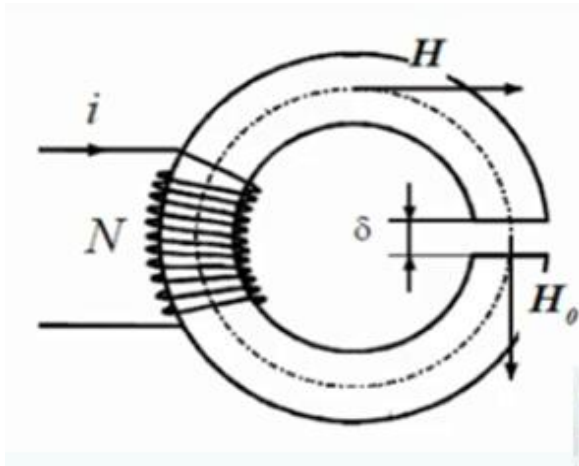


Figure III.10 : Circuit magnétique dans le cas parfait.

### III.5.2. Circuit magnétique avec entrefer.



$L$  : longueur moyenne des lignes de champ (m)

$\delta$  : longueur de l'entrefer (m)

$N$  : nombre de spires de la bobine

$i$  : courant dans la bobine (A)

$H$  : excitation magnétique dans la matière (A/m)

$H_0$  : excitation magnétique dans l'entrefer (A/m)

D'après le théorème d'Ampère :

$$H(L - \delta) + H_0\delta = Ni$$

Figure III.11 : Théorème d'Ampère pour un circuit magnétique avec entrefer.

## III.6. Maintenance et perspectives des moteurs électriques :

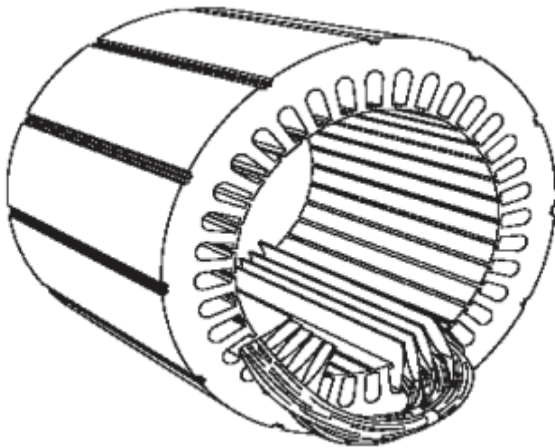
### III.6.1 Moteurs électriques entretien et maintenance :

Les moteurs électriques constituent des équipements essentiels dans les processus de fabrication modernes, ils sont rencontrés dans tous les secteurs industriels. D'un fonctionnement simple et fiable, ils peuvent facilement être contrôlés lors du travail quotidien. Malheureusement, lorsque qu'un moteur électrique montre les premiers signes de défaillance, il est souvent trop tard pour une intervention simple.

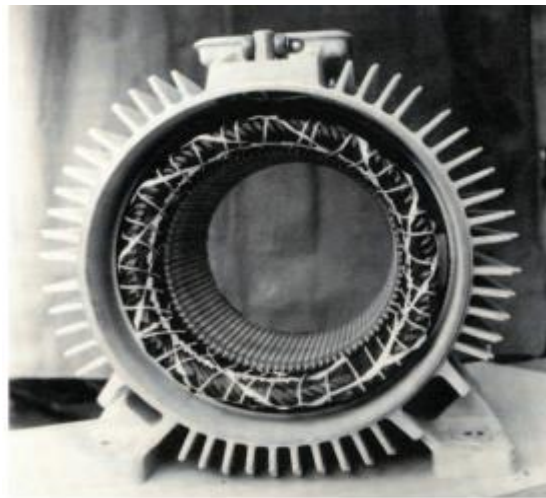
Ce chapitre décrit différents outils et pratiques d'entretien standard qui sont faciles à adopter, et qui permettent de réduire au minimum les réparations et remplacements de moteurs électriques.

**On doit s'assurer que les moteurs neufs ou réparés sont en bon état de marche.**

La constitution d'un moteur d'une couronne de tôles minces (0,35 mm) empilées du stator [1], nous indique certainement qu'il est caractérisé par des pertes allant de 1,6 à 2,3 W/kg à 50 Hz [2]. Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement triphasé, c'est à cause de ces formes complexes qu'on générale est difficile de maîtriser le champ magnétique surtout tournant.



*FigIII.12 : stator en cours de bobinage*



*FigIII.13 : stator (vue d'ensembl)*

Cet enroulement peut être bipolaire, tétra polaire, etc. (Figures1 et2). Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à bornes voilà ce qui montre la combinaison des champs magnétiques de chaque spire de bobine.

### **III.6.2 Effectuez une analyse des vibrations.**

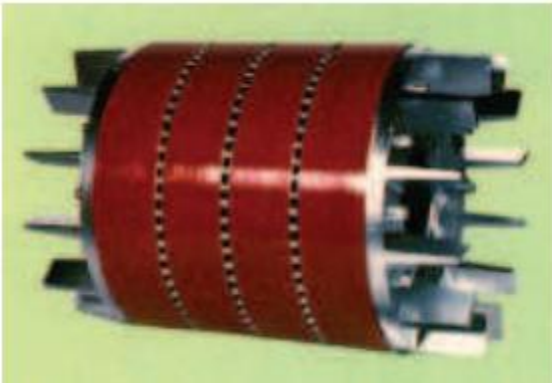
On doit veillez à analyser les vibrations du moteur électrique pour détecter d'éventuels défauts. La valeur maximale recommandée est de 0,13 cm par seconde (de 0 à 120 000 cpm).

L'étude des machines dites à cage d'écureuil, avec des rotors à cage d'écureuil des machines asynchrones, qui sont constitués par un cylindre en disques de **tôles empilées**, percées de trous sur la périphérie pour former des encoches, possèdent aussi une technique d'entretien qui se base sur le réglage et vérification de leur type de métal ou acier ordinaire doux. Ces aciers en fonction du temps peuvent perdre leur propriétés magnétiques initiales. Ces encoches, fermées ou semi fermées, sont destinées à recevoir les barres rétorques en cuivre nu ou en aluminium coulé sous pression à une température voisine de 735°C.

Les cages en cuivre sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées

ou brasées sur deux anneaux en cuivre, disposés de part et d'autre du rotor.

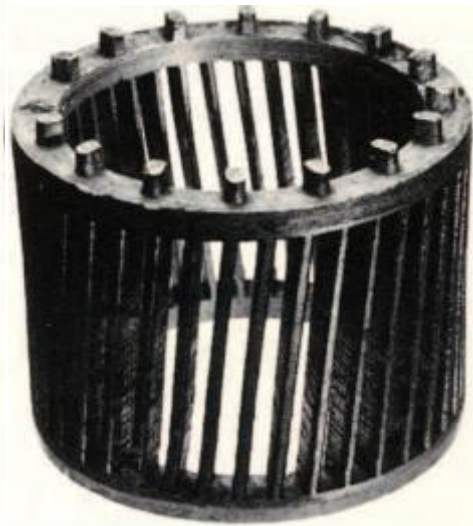
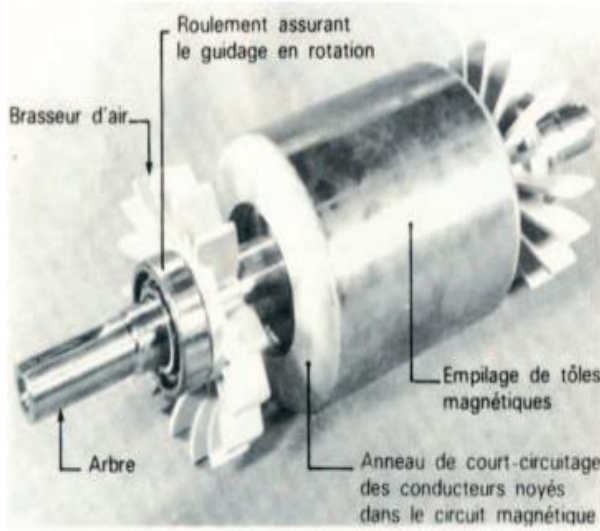
La brasure au cuivre est faite au chalumeau, par soudure à l'arc électrique ou par chauffage inductif. Les rotors à cage d'écureuil en aluminium se généralisent de plus en plus. La coulée d'aluminium doit être réalisée sans subir des chocs thermiques qui peuvent causer de grands problèmes techniques. La coulée qui produit non seulement le remplissage des encoches, forme également les deux anneaux du rotor qui court-circuitent toutes les barres. La cage est souvent dotée d'ailettes de ventilation. La construction de la cage en barres est actuellement réservée aux moteurs de grande puissance (Figures 3 et 4). Les moteurs de petites et moyennes puissances ont des cages en aluminium (Figures 5 et 6) (puissance inférieure à 20kW).



**Fig. III.14 :** Rotor à barres d'aluminium



**Fig. III.15 :** Rotor à barres de cuivre



**Fig. III.16 :** Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble) **Fig. 17 :** Cage d'écureuil en aluminium

Le stator et le rotor sont séparés par un entrefer très faible, de l'ordre de (0,2 à 3 mm suivant la puissance) [2]. Pendant le montage ou le démontage il faut faire très attention à ne pas détériorer ces parties pour ne pas faire apparaître le phénomène du courant de FOUCAULT.

**III.6.3. Exigez des moteurs mécaniquement équilibrés :**

On doit toujours exiger des moteurs mécaniquement équilibrés, en particulier pour les applications utilisant des modèles à haut rendement / à grande vitesse. Les limites acceptables sont indiquées dans les spécifications ISO. Les spécifications sont indiquées en G-6.3 pour les moteurs de faible puissance (inférieure à 75 kW) ou utilisés dans des conditions moins intensives, et en G-2.5 pour les moteurs de puissance élevée, verticaux ou utilisés dans des conditions intensives.

Antirouille, sauf avis contraire du constructeur.

**III.6.4 Stockez les moteurs de manière appropriée.**

Pour éviter la rouille et la corrosion dans les roulements, stockez les moteurs électriques avec leurs roulements entièrement graissés. Si vos moteurs sont lubrifiés à l'huile, demandez conseil à votre fournisseur pour leur stockage.

**III.6.5. Tournez les arbres des moteurs stockés.**

Assurez-vous que les moteurs neufs ou réparés restent en bon état de marche, en tournant manuellement leur rotor une fois par mois. Cela va empêcher la corrosion de contact, un processus d'usure qui provient de « l'effet Brinell » (marques à intervalles réguliers dans les chemins de roulements, provoquées par les vibrations en statique).

**Manipulez les roulements de rechange avec précaution****III.6.6 On doit conserver les roulements dans leur emballage d'origine.**

Stockez les roulements, de préférence à l'horizontale, dans un endroit sec et dans leur emballage d'origine non ouvert. Ne posez jamais les roulements sur une surface sale.

**III.6.7 On doit tourner les roulements lors du stockage.**

Tournez les roulements graissés afin d'éviter que la graisse ne s'accumule sur un côté.

**III.6.8 On doit Remplacez les roulements par des modèles identiques.**

Utilisez des roulements identiques lors des remplacements. En cas de besoin, contactez votre fournisseur de roulements ou le fabricant du moteur

**III.6.9 On ne doit jamais lavez les roulements neufs.**

Ne lavez jamais les roulements neufs avant leur installation. Les fabricants de roulements emballent et expédient les roulements avec le plus grand soin, pour que ces derniers soient exempts de saleté et prêts à être lubrifiés. Il n'est pas nécessaire de les laver ou de retirer leur protection antirouille, sauf avis contraire du constructeur.

**On doit s'assurer des bonnes pratiques de montage et de réparations**

**III.6.10. Manipulez avec précaution :**

Assurez-vous de manipuler les roulements avec précaution. Ne vous appuyez jamais sur un roulement ou sur une piste. Si vous laissez tomber un roulement, ne l'installez plus. Si vous utilisez un étau pour le montage, protégez l'arbre avec une feuille de métal tendre.

**III.6.11. Effectuez l'inspection avec soin :**

Vérifiez que l'arbre et le logement ne présentent ni usure ni dommage. Retirez toutes les entailles et bavures à l'aide de papier émeri. Si l'arbre ou les boîtiers présentent des signes visibles d'usure ou d'endommagement, remplacez-les ou réparez-les.

**III.6.12. Évitez une surchauffe :**

Ne mettez jamais les roulements en contact direct avec une flamme, et ne les exposez jamais à une température supérieure à 110 °C. Pendant les opérations de montage à chaud, placez les roulements contre l'épaulement de l'arbre jusqu'à ce qu'ils refroidissent et restent en place, afin de vous assurer qu'ils gardent leur position correcte.

**III.6.13. Utilisez les outils adaptés :**

Il est très important d'utiliser des outils adaptés, afin de minimiser les risques d'endommagement des roulements et de faciliter leur processus d'installation. Demandez conseil à votre fournisseur de roulements concernant la sélection d'outils adaptés.

**III.6.14. Faites attention à l'installation à froid des roulements :**

Assurez-vous que les roulements sont correctement positionnés en appliquant une pression homogène sur l'extérieur des pistes à l'aide d'un kit de montage à froid.

**Adoptez les meilleures pratiques en matière de lubrification et de contrôle****III.6.15. Une lubrification appropriée est ESSENTIELLE :**

Pour les roulements lubrifiés à la graisse, celle-ci fait plus que simplement prévenir l'usure. Elle protège aussi les parties en mouvement contre la rouille et empêche la pénétration de poussières, de saletés, d'impuretés et d'autres contaminants. Pour la lubrification des roulements de moteurs électriques, Exxon Mobil recommande principalement l'emploi des graisses de la gamme Mobil Polybe™ EM, Mobil SHC Polyrex™ 102 EM et Mobilith SHC™ 100. Demandez conseil à votre interlocuteur ExxonMobil quant à la graisse la mieux adaptée à votre application

**III.6.16. Adoptez des pratiques de lubrification appropriées.**

Plus de 90 % des défaillances de roulements de moteurs électriques sont dues à un graissage excessif. Le graissage excessif entraîne également un endommagement des joints d'étanchéité, ce qui permet à la graisse de contourner les roulements et de pénétrer dans le bobinage moteur.

**III.6.17. Respectez scrupuleusement les tolérances d'alignement.**

La défaillance des roulements d'un moteur électrique peut aussi avoir été provoquée par un mauvais alignement. De nombreuses méthodes existent pour aligner le moteur électrique et la partie entraînée, mais ce qui est primordial, c'est de respecter strictement les tolérances. Rappelez-vous : plus le moteur est grand et rapide, plus les tolérances sont strictes.

### **III.6.18. Mettez en œuvre les bonnes pratiques en matière d'entretien.**

Évitez l'accumulation des saletés et des pollutions sur les moteurs électriques, car elles peuvent agir comme un isolant et générer de la chaleur inutile susceptible d'impacter la durée de vie des roulements.

### **III.7. CONCLUSIONS :**

Un exemple de modèle par circuit magnétique équivalent peut nous aider à modéliser le flux dans l'entrefer d'une machine en surface à aimants permanents comportant autant de dents au stator que d'aimants au rotor. Le premier modèle, à flux radial, inclut les effets de bord de l'épanouissement du flux aux extrémités des aimants, ce qui permet d'arriver à une force continue. Si la force utile est bien modélisée, la modélisation de la force à vide autour de l'angle électrique  $90^\circ$  est mauvaise, le résultat modélisé étant même l'opposé de la simulation éléments finis.

L'investigation a pointé l'influence de l'inclinaison du flux dans l'entrefer sous l'influence de la partie d'aimant située entre les deux dents stator. Un nouveau modèle est alors proposé, prenant en compte ce phénomène par l'introduction d'un facteur d'inclinaison dépendant des réluctances calculées sans l'effet de cette inclinaison. Ce nouveau modèle, simple, permet une modélisation de la force utile encore meilleure, et modélise la force à vide avec une erreur de 40% environ. Il peut être encore amélioré pour être plus représentatif pour la force à vide. Cette amélioration devrait cependant conserver l'aspect simple et générique du modèle actuel, sans introduire des éléments très conjoncturels l'ajustant à un type très précis de machine.

L'intérêt principal de ce modèle est sa rapidité. Le temps de calcul, inférieure à la seconde pour une trentaine de positions angulaires, est très réduit. En l'état, il s'agit d'une étape vers le développement d'un modèle complet par circuit magnétique équivalent de la machine à stator à griffes associé à un rotor à aimants en surface. Ce modèle complet permettra d'évaluer rapidement les performances des machines, notamment pour permettre les premières étapes d'optimisation, sans passer par des calculs élément finis tridimensionnels assez longs.

Par ailleurs, le travail d'établissement de ce modèle a également permis de mieux comprendre le comportement de la machine à vide, en jetant un regard nouveau sur les sources de l'ondulation de couple. L'influence de la partie d'aimant situé entre les dents sur le flux principal s'avère ici être un effet de bord non négligeable, avec un effet au premier ordre sur la forme du couple à vide. Cette information peut s'avérer utile pour une étude future qui aurait pour but de réduire les vibrations de la machine, causées notamment par les ondulations de couple. Ces vibrations sont en effet assez élevées sur ce type de machine, qui ne comporte qu'une seule dent stator par pôle. Si les simulations éléments finis sont aujourd'hui bien plus précises et d'une rapidité de plus en plus acceptable, l'établissement de modèles analytiques ou par circuit magnétique équivalent des machines électriques peut ainsi permettre une meilleure compréhension de leur fonctionnement électromagnétique, mettant en avant des phénomènes qui peuvent passer inaperçus avec une simple étude aux éléments finis.

**RÉFÉRENCES chapitre III:**

- [1] J. Cros, P. Viarouge, « New structure of polyphase claw-pole machines », IEEE transactions on industry applications, Vol 40, Issue 1, Jan-Feb 2004.
- [2] K. Y. Lu, E. Ritchie, P. O. Rasmussen, P. Sandholdt, « Modelling a single phase surface mounted permanent magnet transverse flux machine -30 -20 -10 0 10 0 30 60 90 120 Angle électrique (°) Force à vide (N) éléments finis réseau de réluctances -25 -20 -15 -10 -5 0 0 30 60 90 120 Angle électrique (°) Force utile (N) based on Fourier series method », IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003.
- [3] M-F. Hsieh, Y-C. Hsiu, «A Generalized Magnetic Circuit Modeling Approach for Design of Surface Permanent-Magnet Machines», IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 59, n°2, Feb 2012.