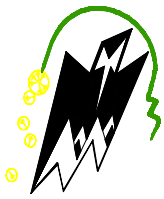
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou
Faculté de génie électrique et d'informatique
Département d'électrotechnique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Option : Machines électriques

Thème

Les tôles magnétiques fer- silicium : caractéristiques et processus d'élaboration

Proposé et dirigé par :

M^r^. M. Imache

Etudié par :

Melle. Sedkaoui Lynda

Promotion 2008

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à ma très chère famille que je remercie infiniment de m'avoir tout donner, en particulier ma très chère mère pour sa patience, sa compréhension et ses sacrifices; mon père ; mes frères Djamel et Tayeb ; ma sœur Safia et son mari Samir ; sans oublier toutes mes amies en particulier ; Farida, Fazia, Fatiha et Sabiha.

LYNDA

Remerciements :

Toute production ou travail est réalisé grâce à la volonté de dieu qui est au dessus de toutes considérations. Nous lui devons donc tous nos remerciements.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Mr. M. IMACHE, pour l'aide qu'il m'a apportée avec tant de gentillesse, son sérieux, son engagement et ses encouragements, ainsi son expérience scientifique dont j'ai bénéficie pour la réalisation de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mr. S. Idir qui nous a assuré avec sourire et gentillesse la réalisation de la partie pratique de ce travail au laboratoire de l'entreprise E.I d'Azazga.

Je témoigne ma profonde reconnaissance à tous les professeurs qui ont assuré ma formation, ainsi qu'à ceux qui me feront l'honneur d'examiner ce travail.

Sommaire

Introduction générale 01

Chapitre I : Généralités sur les notions de base du magnétisme

I.1. Définitions 03

I.1.1. Matériaux magnétiques, définitions 03
I.1.2. Les grandeurs magnétiques 03
I.1.3. L'induction magnétique 03
I.1.4. Le champ magnétique 03
I.1.5. Le flux d'induction magnétique 04
I.1.6. L'aimantation 04
I.1.7. La susceptibilité magnétique 05

I.2. Le comportement magnétique de la matière 05

I.2.1. Le moment magnétique 05
I.2.2. Diamagnétisme 05
I.2.3. Paramagnétisme 05
I.2.4. Ferromagnétisme 06

I.3. Organisation de la matière 07

I.3.1. Energie interne d'un cristal ferromagnétique 07
a) : L'énergie d'échange 07
b) : L'énergie d'anisotropie 07
c) : L'énergie magnétostatique 08
d) : L'énergie magnétostrictive 08

I.3.2. Les domaines élémentaires de Weiss 08
I.3.3. Processus de polarisation 09
I.3.4. Courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis 10

I.4. Les matériaux magnétiques 12

I.4.1. Les matériaux magnétiques doux 12
I.4.2. Les matériaux magnétiques durs 12

I.5. Les pertes magnétiques 13

I.5.1. Les pertes par hystérésis 13
- Evaluation expérimentale des pertes par hystérésis 13
  a) : La formule de Steinmetz 13
  b) : La formule de Richter 14

I.5.2. Les pertes par courants de Foucault ou courants induits 14
- Evaluation des pertes par courants induits 14

I.5.3. Pertes supplémentaires (pertes par excès) 16
- Evaluation des pertes supplémentaires..... 16

a) : Modèle des domaines parallèles 17
b) : Modèle statistique de Bertotti..... 17
Conclusion 17

Chapitre II : Les tôles magnétiques en alliage fer silicium

II.1. Introduction 19

II.2. Le fer. Matériau magnétique de base 19

II.3. Les alliages magnétiques doux : fer Nickel, fer Cobalt et fer Silicium 19

II.3.1. L'alliage fer Nickel, FeNi..... 19
II.3.2. L'alliage fer Cobalt, FeCo 20
II.3.3. L'alliage fer Silicium, FeSi..... 20
II.3.4. Influence du silicium sur les propriétés physiques, mécaniques et métallurgiques 20
II.3.5. Action des impuretés sur les propriétés magnétiques. Remèdes 22
a) : Impuretés contenues dans le fer 22
b) : Le rôle bénéfique joué par le silicium 23

II.4. Les tôles magnétiques en alliage fer silicium..... 23

II.4.1. Les tôles FeSi à grains non orientés (NO)..... 24

a) : Propriétés et constitution..... 24
b) : Elaboration et traitements thermiques 24
c) : Epaisseurs conventionnelles des tôles NO..... 25
d) : Isolation des tôles NO..... 25
e) : Utilisations 25
- Les tôles semi finies..... 25
- Les tôles finies 25

f) : Caractéristiques magnétiques 27

II.4.2. Tôles FeSi à grains orientés (GO)..... 29

a) : Propriétés et constitution..... 29
b) : Elaboration et traitement thermiques..... 30
c) : Utilisations et épaisseurs conventionnelles..... 32
d) : Isolation des tôles GO..... 33
e) : Caractéristiques magnétiques..... 33

II.5. Evolution et perspectives des alliages fer silicium 35

II.5.1. Les tôles FeSi de faibles épaisseurs 35
II.5.2. Alliage à haute teneur en silicium..... 37

Chapitre III : La mesure des caractéristiques initiales des tôles magnétiques FeSi

III.1. Introduction 39

III.2. Banc de mesure 39

III.2.1. Cadre d'Epstein 39
- Constitution 40
- Principe de fonctionnement 42
- Avantages et inconvénients 42

III.2.2. Appareil Vettiner 43
III.2.2.1. Premier compartiment 43
III.2.2.2. Deuxième compartiment 43
- Caractéristiques électriques 43

III.2.2.3. Troisième compartiment 44

III.3. Procédure de mesure 44

III.3.1. Choix des éprouvettes 45
III.3.2. Les principales garanties et désignations 45
III.3.3. La pesée 45
a) : Calcul de la masse active 45
b) : Calcul de la section active 46
III.3.4.Construction du circuit magnétique 47
III.3.5. Introduction de données dans l'analyseur 47
III.3.6. Acquisition des résultats 47

III.4. Caractéristiques initiales des échantillons 47

III.4.1. Caractéristiques initiales de la tôle GO (M150-30S) 47
III.4.1.1. Recuit de relaxation 50

III.4.2. Caractéristiques initiales de la tôle NO (M530-50A) 53
III.4.2.1. Mesure de l'anisotropie 55

III.5. Le vieillissement des tôles 59

III.5.1. Le vieillissement pendant vingt quatre heures 59
III.5.2. Le vieillissement pendant sept jours 59

III.6. Interprétation des résultats 60

III.6.1. Interprétation des résultats obtenus avant et après vieillissement 62
III.6.2. Conclusion 64

Conclusion générale 70

Introduction générale

Le magnétisme de la matière est la source de propriétés variées qui sont à la base des utilisations diverses des matériaux magnétiques.

L'intérêt des matériaux magnétiques en électrotechnique se confirme de plus en plus fortement et cela, depuis plus d'un siècle maintenant.

Pour tout dispositif électrique, il est nécessaire de produire un flux d'induction variable de grande amplitude qui générera à son tour une force électromotrice importante. La seule technique qu'on utilise à cet effet consiste à utiliser des matériaux ferromagnétiques dont on fait varier l'aimantation.

Les matériaux ferromagnétiques doux sont donc des matériaux constitutifs fondamentaux de toutes les machines électriques. On les trouve dans tous les moteurs, générateurs et transformateurs d'énergie électrique.

Les qualités requises pour un matériau doux sont :

- Une polarisation à saturation aussi élevée que possible.
- Une perméabilité magnétique aussi grande que possible afin de canaliser le flux d'induction magnétique.
- Une dissipation d'énergie minimale au sein du matériau.

Le matériau le plus couramment utilisé en électrotechnique se présente sous forme de tôles minces que l'on empile en les séparant par des couches isolantes. Ces tôles sont des alliages fer- silicium à faible teneur en silicium.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire se divise en trois chapitres :

- Le premier chapitre est un rappel des lois générales du magnétisme.
- Le deuxième chapitre concerne l'alliage magnétique fer- silicium ou y trouve notamment les propriétés physiques, mécaniques et chimiques de l'alliage, les processus d'élaboration en métallurgie et les formes d'utilisation de cet alliage.
- Le troisième chapitre comporte les résultats de quelques essais pratiques que nous avons pu réaliser à l'entreprise Eléctro- industrie d'AZAZGA. Les mesures effectuées au laboratoire Eléctro- Industrie sur quelques échantillons de tôles Fe-Si concernent :
  - Les pertes magnétiques avant et après vieillissement des tôles Fe-Si à grains orientés.

- L'anisotropie et les pertes magnétiques avant et après vieillissement des tôles Fe-Si à grains non orientés.

I.1. Définitions

Nous donnons dans ce chapitre les principales définitions et lois physiques élémentaires associées à l'étude du magnétisme.

I.1.1. Matériaux magnétiques, définition

Soumises à une excitation magnétique, certaines substances se mettent à produire elles mêmes dans le volume qu'elles occupent et à l'extérieur, une induction magnétique. On dit qu'elles s'aimantent ou se polarisent magnétiquement. Cette propriété ne se manifeste très visiblement que dans certains matériaux appelés matériaux magnétiques. [1]

I.1.2. Les grandeurs magnétiques

I.1.2.1. L'induction magnétique

Selon la loi de Biot et Savart, si un fil de longueur **L** est parcouru par un courant ***I*** ,le champ d'induction magnétique **B** en un point aux environs de ce fil est donné par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\Pi} \int \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2} \qquad \text{(I -1)}$$

I.1.2.2. Le champ magnétique

Un espace magnétique ou aimanté peut être définit par deux grandeurs.L'induction magnétique $\vec{B}$ ou le champ magnétique $\vec{H}$. **H** s'appelle le champ d'excitation magnétique et s'exprime en A /m. **B** est le pouvoir d'induction issu de H, B s'exprime en T ou en Wb/m^2 et le calcul du champ magnétique H fait appel au **théorème d'Ampère** :

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^{N} NI_k \qquad \text{(I-2)}$$

Ou bien à la **loi de Biot et Savart** citée plus haut.

$\vec{B}$ et $\vec{H}$ dépendent l'un de l'autre par les formules suivantes :

Air : $$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \text{(I-3)}$$

μ_0 : Perméabilité absolue de l'air.

$$\mu_0 = 4\Pi \cdot 10^{-7} [H/m]$$

Matériaux : $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$ (I-4)

μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré.

Dans les matériaux B et H ne sont pas proportionnels.

La correspondance entre les deux grandeurs est donnée par une courbe d'aimantation.

I.1.2.3. Le flux d'induction magnétique

Soit un élément de surface $d\vec{s}$ s'il existe un champ d'induction magnétique $\vec{B}$ dans la région ou se trouve cette surface, alors le flux magnétique traversant cet élément est donné par :

$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad \text{(I-5)}$$

On dit du vecteur $\vec{B}$ qu'il est à flux conservatif. C'est-à-dire que tout le flux qui sort d'un pole entre dans le pole opposé. Ce qui se traduit mathématiquement par la **loi de Gauss** :

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{(I-6)}$$

I.1.2.4. L'aimantation

On appelle aimantation magnétique, la valeur du moment magnétique ampérien par unité de volume de la substance magnétique. Elle est obtenue en soumettant le matériau à l'influence d'un champ magnétique. Le vecteur aimantation est défini par :

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_A}{V} \quad \text{(I-7)}$$

On peut caractériser un matériau par son aimantation $\vec{M}$ ou par sa polarisation $\vec{I}$. Les deux grandeurs sont liées par :

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M} \quad \text{(I-8)}$$

La polarisation J s'exprime en Tesla ou en Wb/m^2.

Dans les matériaux ferromagnétiques $\vec{B}$, $\vec{H}$, $\vec{M}$ et $\vec{I}$ sont liées par :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \quad \text{(I-9)}$$

I.1.2.5. La susceptibilité magnétique

Elle est définit comme étant le taux d'aimantation de la substance.

La susceptibilité magnétique absolue est définit par : $\chi = \frac{I}{H}$ $[H/m]$

Et la susceptibilité magnétique relative est définit par : $\chi_r = \frac{M}{H}$ [sans unité]

I.2.Le comportement magnétique de la matière

I.2.1.Le moment magnétique

Lorsque la matière est soumise à un champ magnétique, elle s'aimante, c'est-à-dire que chacun de ses éléments de volume dv est équivalent à une petite boucle de courant, donc on définit le moment magnétique $d\vec{m}$:

$$d\vec{m} = I \cdot d\vec{s} \qquad \text{(I-10)}$$

Avec :

I est l'intensité du courant circulant dans la boucle, **ds** est l'air de la surface limitée par la boucle et le moment magnétique **m** s'exprime en [A. m^2].

Un matériau magnétique apparaît donc, comme un ensemble de moments magnétiques élémentaires (les atomes) interagissant entre eux en un réseau cristallin. Et selon le comportement de cet ensemble, on distingue les types de magnétisme :

I.2.2.Diamagnétisme [1]

Le diamagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative négative de faible amplitude de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6}, il est du à un mouvement orbital des électrons provoqué par le champ magnétique extérieur. Ce mouvement peut être assimilé au comportement d'un courant induit dans un solénoïde. En vertu de la loi de Lenz, le courant induit s'oppose par ses effets au champ qui le produit. Les gaz rares, le carbone, le cuivre, et l'eau sont diamagnétiques.

I.2.3. Paramagnétisme

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative positive, de faible amplitude, comprise entre 10^{-6} *et* 10^{-3}. Il se rencontre dans les substances dont les atomes possèdent un moment magnétique permanent. Sous l'action d'un champ magnétique, ces moments tendent à s'aligner, créant ainsi une aimantation dans le même sens que ce champ.

Pour la majorité des corps paramagnétiques, la susceptibilité varie en raison inverse de la température, et obéit à la loi de Curie :

$$\chi_r = \frac{C}{T} \qquad \text{(I-11)}$$

Avec ; C : La constante de Curie.

T : La température.

L'aluminium, l'air et l'oxygène (à 1 atm) sont paramagnétiques.

I.2.4. Ferromagnétisme

Le ferromagnétisme résulte de l'alignement groupé de tous les moments magnétiques permanents. Le volume d'une substance ferromagnétique est de ce fait subdivisé en petites régions appelées domaines, à l'intérieur des quels les moments atomiques sons orientés parallèlement les uns par rapport aux autres. Les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par une aimantation spontanée en l'absence d'un champ magnétique extérieur et la valeur très élevée que peut prendre cette aimantation. Les ferromagnétiques possèdent une température dite température de Curie, au dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques, leurs susceptibilité suivant alors la loi de Curie Weiss :

$$\chi_r = \frac{C}{T - T_c} \qquad \text{(I-12)}$$

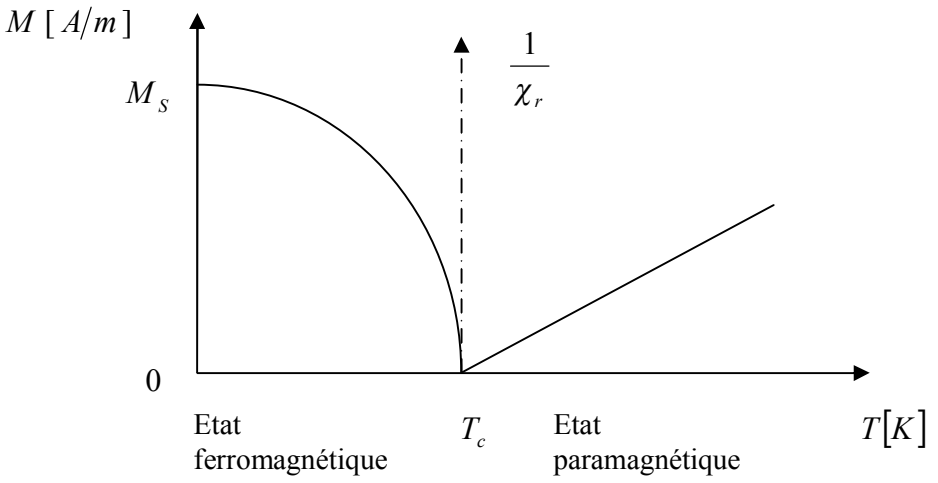


Fig.I.1.Variation de l'aimantation en fonction de la température. [3]

I.3.Organisation de la matière

I.3.1.Energie interne d'un cristal ferromagnétique

Le fait qu'un corps ferromagnétique puisse ne présenter aucune aimantation d'ensemble en absence de champ magnétique extérieur, ne peut s'expliquer que par des considérations d'énergie. L'énergie totale ou interne associée à la structure en domaine comprend quatre termes :

$$W_i = W_{ec} + W_{an} + W_{mst} + W_{msc}$$

a) :L'énergie d'échange W_{ec}

En mécanique quantique, cette énergie est liée aux forces d'interactions d'échange qui ont tendance à provoquer une orientation parallèle des spins électroniques, son expression est :

$$W_{ec} = -\frac{1}{2}\Sigma_{ij} A_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j \qquad \text{(I-13)}$$

b) :L'énergie d'anisotropie W_{an}

La rotation des moments magnétiques par rapport aux axes de facile aimantation du cristal demande une dépense d'énergie ; cette énergie liée à ces axes, porte le nom d'énergie d'anisotropie. Les directions de facile aimantation sont les directions dans lesquelles cette

énergie W_{an} est minimale, pour un cristal cubique l'énergie d'anisotropie est représenté par: [2, 3]

$$W_{an} = K_0 + K_1 + (\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \cdots \quad \text{(I-14)}$$

Ou K_0 , K_1, K_2 Sont les coefficients d'anisotropie, et α_1, α_2 et α_3 sont les cosinus directeurs ; ils caractérisent la position du vecteur aimantation par rapport aux axes du cube.

c) : L'énergie magnétostatique W_{mst}

On appelle énergie magnétostatique, l'énergie de l'aimant permanent résultant des interactions entre chaque moment atomique et le champ local, appelé aussi champ démagnétisant du à la combinaison du champ crée par les atomes voisins et du champ magnétique extérieur.

d) : L'énergie magnétostrictive W_{msc}

On appelle énergie magnétostrictive ; l'énergie élastique associée aux déformations et aux contraintes que les domaines exercent les uns sur les autres. Le cristal peut s'allonger ou se contracter selon la direction de la polarisation par rapport à la déformation.

I.3.2. Les domaines élémentaires de Weiss [2]

L'expérience montre que tous les matériaux magnétiques de volumes suffisants se divisent spontanément en petites régions qu'on appelle domaines magnétiques. A l'intérieur d'un domaine tous les moments magnétiques atomiques sont maintenus parallèles par les forces d'échange, de telle sorte que chaque domaine se présente comme un petit volume aimanté à saturation. Les domaines se différent par l'orientation de la polarisation magnétique de chacun d'eux, de telle sorte que l'aimantation moyenne de la substance est nulle. La taille des domaines varie selon les matériaux. Chaque domaine est séparé d'un voisin par une zone de transition appelée paroi de Bloch. Fig. I.3.

Le volume d'un domaine est estimé à environ $10^{-8} cm^3$ tandis que l'épaisseur de la paroi de Bloch s'évalue en nanomètres.

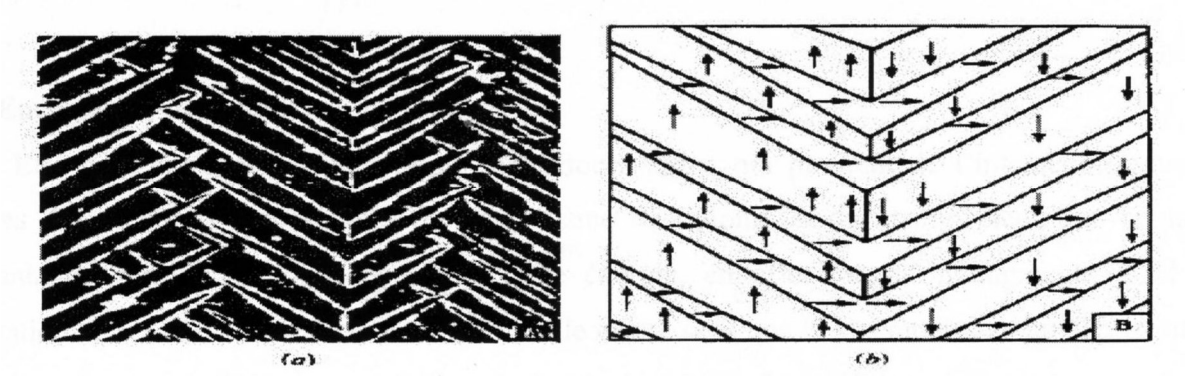


Fig. I.2. Visualisation des domaines magnétiques à la surface d'un échantillon de fer.

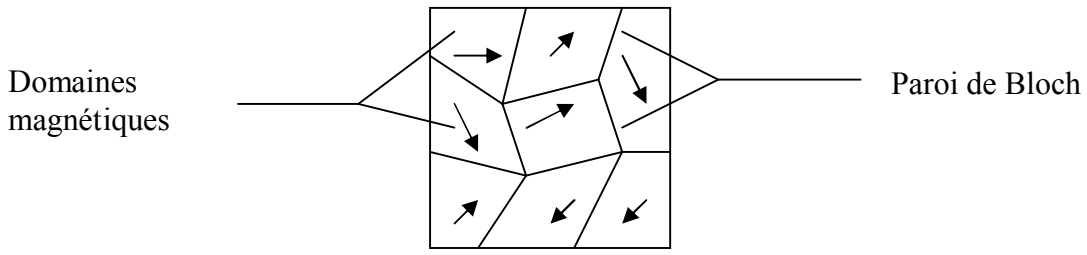
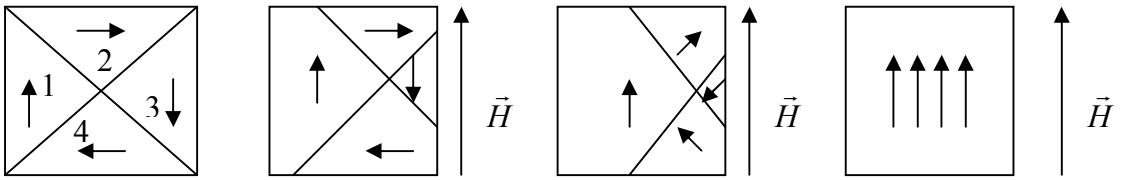


Fig.I.3.Structure en domaines d'un ferromagnétique. [3]

I.3.3.Processus de polarisation [1]

Soit un monocristal de fer, pratiquement sans défauts, dans lequel les domaines magnétiques se présentent comme suit :



a)H=0 b) H faible c) H moyen d) H fort (saturation)

Fig. I.4.structure en domaine d'une substance au cours du processus de polarisation. [1]

Dés qu'on applique un champ H, l'énergie des moments magnétiques est augmentée dans le domaine 3 et dans une plus faible mesure dans les domaines 2 et 4. Le respect de la condition de l'énergie minimum dans l'échantillon entraîne alors une diminution du volume de ces domaines. Dans un champ croissant, la structure des domaines prendra donc successivement les allures représentées sur la Fig.I.4.

Finalement, un seul domaine orienté selon H subsistera.

I.3.4. Courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis

Un matériau ferromagnétique est initialement démagnétisé (pas d'aimantation), on applique un champ magnétique extérieur régulièrement croissant et on obtient la courbe B (H) ; courbe de première aimantation.Fig.I.5.

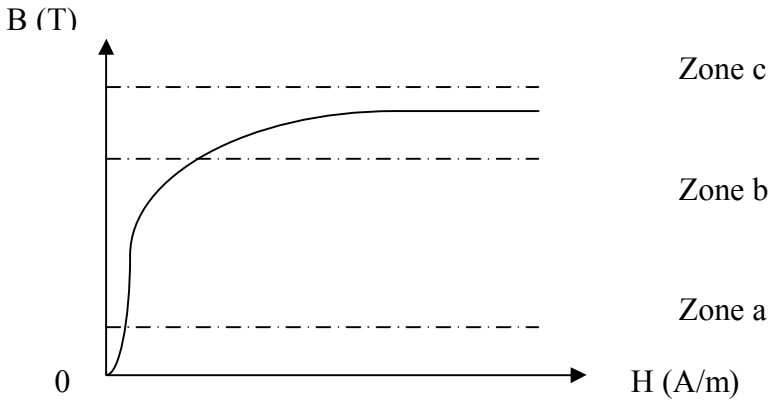


Fig.I.5.courbe de première aimantation.

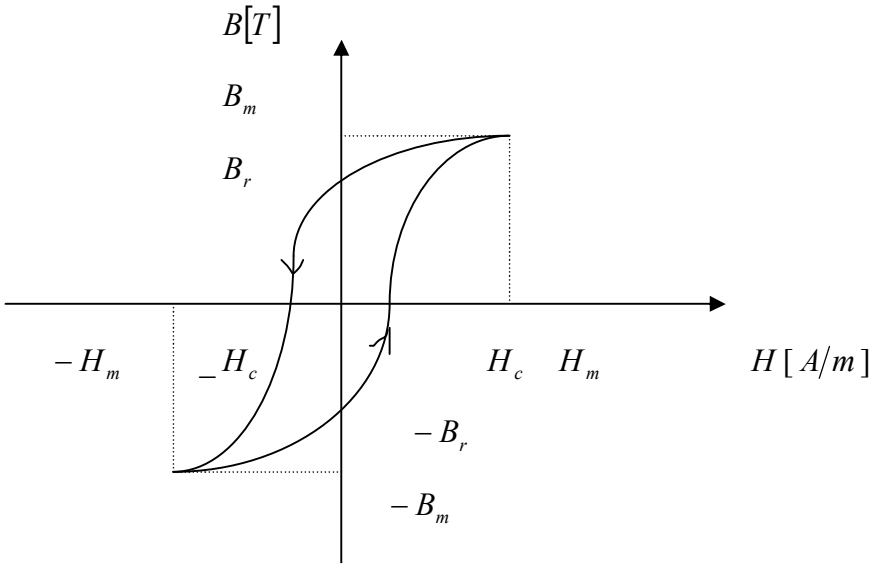
Zone a : région des champs faibles.

Zone b : région des champs moyens.

Zone c : région des champs forts.

Cycle d'hystérésis

Après avoir parcouru la courbe de première aimantation, arrivée à saturation, si l'on fait décroître le champ H, l'induction B décroît de manière lente pour atteindre une «induction rémanente» B_r pour H=0. Cette induction rémanente B_r ne peut être réduite à une induction nulle q'en appliquant un champ $-H_c$ de sens inverse, le champ $-H_C$ est le «le champ coercitif»nécessaire pour annuler l'aimantation. Si l'on continue enfin de faire varier H jusqu'à $-H_m$, puis si l'on revient à $+H_m$, on obtient une courbe fermée appelée cycle d'hystérésis. Fig. I.6.



FigI.6. Courbe de cycle d'hystérésis

I.4.Les matériaux magnétiques

I .4.1. Les matériaux magnétiques doux

Selon les critères de l'ingénieur, un bon matériau magnétique doux, soumis à l'action des champs magnétiques relativement faibles, doit présenter une aimantation élevée,proche de l'aimantation à saturation. Cette facilité d'aimantation signifiée une perméabilité magnétique très élevée, le cycle d'hystérésis associé est très étroit , donc un champ coercitif très réduit, en d'autres termes présentent peu de défauts dans leurs structures cristallines, ainsi qu'une anisotropie très réduite . Ces matériaux sont généralement utilisés dans les applications, ou il est nécessaire de canaliser le flux magnétique :(transformateurs, moteurs, générateurs, composants électronique).

I.4.2.Les matériaux magnétiques durs

Par opposition aux matériaux magnétiques doux qu'on aimante et désaimante facilement, les matériaux durs ne peuvent être désaimantés qu'avec difficulté, d'où l'intérêt pour la réalisation des aimants permanents.

Les performances d'un aimant sont très étroitement liées à la forme de son cycle d'hystérésis, en particulier à sa courbe de désaimantation. Ils sont utilisés lorsque le champ

engendré par le matériau doit rester stable ou élevé si possible dans le matériau et généralement utilisés dans les noyaux des haut-parleurs, les moteurs de faibles puissances…etc.

I.5. Les pertes magnétiques

Tout système à base de matériau magnétique soumis à un champ d'excitation variable, subit des pertes énergétiques dissipées sous forme de chaleur et n'est généralement pas récupérable. On distingue trois types de pertes magnétiques :

I.5.1.Les pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis sont liées aux propriétés physiques du matériau et sa géométrie. Sous l'effet du champ d'excitation, les forces de Laplace créent des contraintes internes au matériau qui mettent en mouvement les domaines de Weiss et qui favorisent l'échauffement du matériau. Ces pertes proviennent de la différence entre l'énergie emmagasinée lors de la croissance de H et celle restituée lors de sa décroissance. Les pertes par hystérésis sont exprimées par :

$$P_H = A_H V f \quad [W] \tag{I-15}$$

$P_H[W]$, $A_H[W/m^3]$, $V[m^3]$, $f[HZ]$.

- **Évaluations expérimentales des pertes par hystérésis**

On distingue deux modèles :

a) : La formule de Steinmetz

Elle est donnée pour l'énergie mise en jeu par l'hystérésis et pour un cycle décrit entre deux valeurs B_m et $-B_m$ du champ magnétique dans la substance :

$$A_H = \eta \ B_m^{\gamma}$$

Donc : $P_H = \eta B_m{}^{\gamma} V f$ [W] (I-16)

V : Le volume de la substance ;

η : Le coefficient de Steinmetz ;

f : la fréquence.

γ : est pris généralement égal à 1,6 pour le fer, dans les tôles fer silicium modernes on prend γ égal à 2.

b) : La formule de Richter

La puissance perdue est donnée par la relation :

$$P_H = aVfB_m + bVfB_m^{\ 2} = Vf(bB_m^{\ 2} + aB_m) \quad [W] \tag{I-17}$$

Pour $B_m \geq 1\,\text{T}$: $A_H = bB_m^{\ 2}$; la formule se réduit pratiquement à :

$$P_H = bVfB_m^{\ 2} \tag{I-18}$$

Avec f la fréquence du cycle d'hystérésis, a et b des constantes qui dépendent de la nature de matériau et V le volume.

En général ces pertes sont globalisées comme suit :

$$P_H = K_H fB_m^{\ 2} \tag{I-19}$$

Où ; K_H est une constante d'hystérésis.

I.5.2. Les pertes par courant de Foucault ou courant induits

Les courants induits ou courants de Foucault sont induits dans la masse du matériau ferromagnétique en vertu de la loi de Lenz, lorsque le matériau est soumis à un champ d'induction variable. Ces courants provoquent par effet Joule, une dissipation d'énergie et un échauffement du circuit magnétique.

- **Evaluation des pertes par courants induits**

On considère une tôle de longueur L, de largeur l et d'épaisseur e, soumise à un champ d'induction uniforme et sinusoïdale: $B = B_m \cos\omega t$. Fig. I.7.

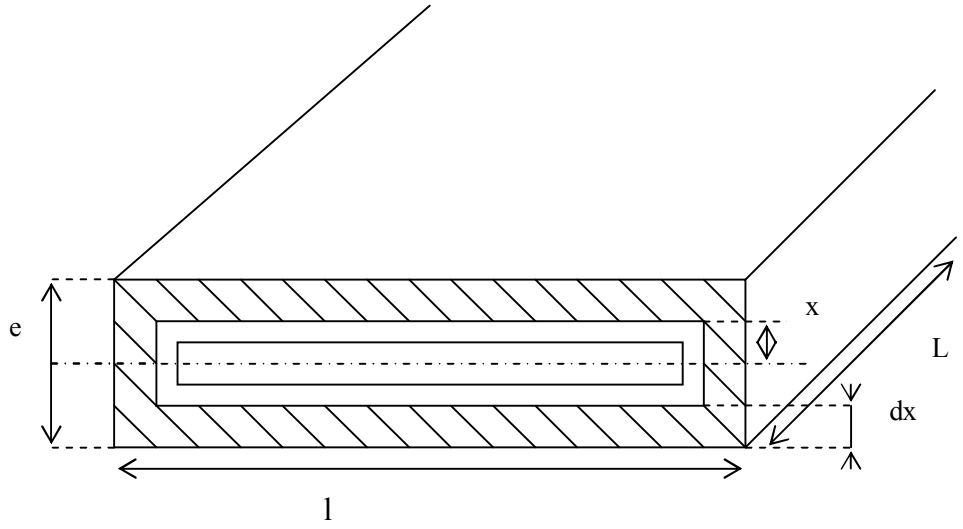


Fig.I.7.Représentation d'un circuit élémentaire d'une tôle. [4]

Le circuit schématisé équivalent à une spire de résistivité ρ , de longueur 2l, de section droite Ldx, et présente une résistance :

$$r = \frac{2\,l\,\rho}{Ldx} \tag{I-20}$$

Cette spire embrasse un flux d'induction :

$$\phi = S_{Sp}\,B = 2\,lxB = 2\,lxB_m \cos\,\omega t \tag{I-21}$$

Elle est le siége d'une fem d'induction :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = 2\,lxB_m \sin\,\omega t \tag{I-22}$$

De valeur efficace E :

$$E = \sqrt{2}\,xlB_m\omega = \sqrt{8}\,xlB_m\pi f \tag{I-23}$$

En négligeant l'inductance de cette spire, l'intensité du courant qui la traverse a pour valeur efficace :

$$I = \frac{e}{r} = \sqrt{2}\,\frac{\pi LfB_m}{\rho}\,xdx \tag{I-24}$$

D'où la puissance dissipée par effet joule :

$$dP_{CF} = rI^2 = \frac{4\pi^2 lLf^2 B_m^2 x^2 dx}{\rho} \tag{I-25}$$

En intégrant sur l'intervalle [O, e/2] ; on aura :

$$P_{CF} = \frac{\pi^2 lLe^3 f^2 B_m^2}{6\rho} \quad \text{(I-26)}$$

On aura finalement les pertes volumiques classiques :

$$P_{CF} = \frac{e^2 \omega^2 B_m^2}{24\rho} \quad \text{[W/Kg]} \quad \text{(I-27)}$$

B_m : Valeur maximale de l'induction.

V : Volume de la tôle.

e : Epaisseur de la tôle.

ρ : est la masse volumique de la tôle.

I.5.3.Pertes supplémentaires (pertes par excès)

Les pertes classiques par courant de Foucault représentent les pertes minimales qu'on peut obtenir pour un matériau considéré quand ses processus d'aimantation se limitent à des rotations réversibles sans déplacement de parois et par conséquent sans hystérésis locale. Ainsi, les pertes dynamiques sont obtenues par la différence entre les pertes spécifiques totales mesurées et les pertes par hystérésis :

$$P_{dyn} = P_{fer} - P_h \quad \text{(I-28)}$$

La relation liant les pertes dynamiques P_{dyn} aux pertes classiques P_{CF} dépend de la forme de l'induction :

Si l'induction est sinusoïdale : $P_{dyn} = \eta P_{CF}$ (I-29)

Si l'induction n'est pas sinusoïdale : $P_{dyn} = \eta (F/F_S)^2 P_{CF}$ (I-30)

F : facteur de forme de l'induction non sinusoïdale.

F_S : Facteur de forme de l'induction sinusoïdale.

η : Coefficient d'anomalie des pertes.

- **Evaluation des pertes supplémentaires [5]**

  Plusieurs modèles ont été élaborés pour tenter de prédéterminer ces pertes ; les plus importants sont :

a) : Modèle des domaines parallèles

Dans ce modèle, Pry et Bean supposent dans une tôle d'épaisseur e des domaines à 180° en forme de barres de longueur 2L, séparées par des parois planes perpendiculaires aux faces de la tôle. Le coefficient d'anomalie des pertes η est alors associé par les auteurs au rapport $2L/e$.

$$\eta = \frac{48}{\pi^3}\frac{2L}{e}\sum_{n\geq 1}\frac{1}{(2n-1)^3}\coth\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}2\frac{L}{e}\right] \qquad \text{(I-31)}$$

Si $2L/e \prec 1$ (domaine très étroit), on aura $\eta \approx 1$: les pertes dynamiques se confondent aux pertes classiques.

Si $2L/e \succ 1$, on aura $\eta \approx 1{,}63(2L/e)$: les pertes dynamiques sont plus importantes que les pertes classiques.

b) : Modèle statistique de Bertotti

Bertotti a définit une nouvelle entité physique«objet magnétique» ou «OM» grâce auquel s'inverse l'aimantation. Ainsi, les pertes magnétiques par excès d'un matériau seront caractérisées par le nombre d'OM participant au processus de l'aimantation.

Pour une induction sinusoïdale de fréquence f et de valeur de crête B_m, les pertes par excès par cycle dans une tôle de section S sont exprimées par :

$$P_{ex} = \frac{8{,}8}{M_V}\sqrt{\frac{GH_{\circ}S}{\rho}}B_m^{1,5}f^{0,5}\left[J/Kg\right] \qquad \text{(I-32)}$$

G : est le coefficient de frottement de l'OM (G= 0 ,136 dans le cas ou L'OM correspond à une paroi entière) ; $H_{\circ}$ est équivalent à un champ coercitif.

M_V : est la masse volumique de la tôle.

Conclusion :

Cette étude théorique nous permet de conclure que, les matériaux magnétiques qui nous intéressent dans la construction électrique doivent posséder simultanément plusieurs caractères exceptionnels ; ils doivent êtres porteurs de moments magnétiques qui doivent s'ordonner spontanément.

Les matériaux ferromagnétiques tendent à se subdiviser spontanément en régions aimantées à saturation (domaines de Weiss) et donc la diminution de l'énergie interne du système en domaine. La rotation des moments entre domaines voisins s'effectue graduellement, dans des couches de transition (parois de Bloch). Cette structure en domaine explique le processus d'aimantation qui correspond toujours à la modification de l'arrangement des domaines accompagnés d'hystérésis.

II .1.Introduction

Le matériau magnétique le plus couramment utilisé en électrotechnique se pressente sous forme de tôles minces que l'on empile en les séparant par des couches isolantes. Ces tôles sont des alliages fer silicium. Cela permet d'obtenir de grandes perméabilités magnétiques et des cycles d'hystérésis de surfaces réduites. Dans les autres domaines de l'électricité ou les fréquences d'utilisation sont plus élevées, d'autres alliages magnétiques aux propriétés intéressantes sont utilisés. Parmi les alliages les plus courants, on peut citer les alliages fer nickel du type permalloys, le fer cobalt auxquels s'ajoute une autre catégorie qui regroupe les ferrites doux.

II.2. Le fer. Matériau magnétique de base

Le fer technique est plus au moins pur, qui contient toujours un peu de carbone, avec des traces d'autres éléments (le Soufre, l'Azote, le Manganèse, …etc.), provoquant à leurs tour l'apparition d'inclusions insolubles qui favorisent le vieillissement magnétique et mécanique du matériau et qui sont responsables des déformations importantes du réseau cristallin, cela entraîne en outre, l'existence de barrières pour les parois magnétiques, et en conséquence la diminution de la perméabilité et l'augmentation des pertes.

De plus, le fer pur, trop mou, ne peut se prêter à l'élaboration de tôles de faibles épaisseurs. Pour cela, on lui incorpore quelques pourcents de Nickel, de Cobalt, ou de Silicium, afin d'améliorer ses qualités.

II.3.Les alliages magnétiques doux : fer Nickel, fer Cobalt, et fer Silicium

II.3.1.L'alliage fer Nickel, FeNi

Ce sont des matériaux qui ont des propriétés magnétiques intéressantes suivant le pourcentage de Nickel dans le fer, qui varie entre 30% et 80%. De ce fait les alliages FeNi sont très malléables, on peut les laminer jusqu'à de très faibles épaisseurs (5à10µm), et les recuire à toute température. [6]

Ce type d'alliage a les plus hautes perméabilités connues pour le frittage des matériaux magnétiques doux. Le fer à 80% Ni ; produit commercialisé sous le nom de «Permalloys» ou «Mumetal» peut avoir une perméabilité maximale de 95000 et un champ coercitif de seulement de 0,02 $A \cdot cm^{-1}$. Le fer à 50% Ni a un plus grand champ coercitif et une basse perméabilité mais donne une induction à saturation plus grande. Ces alliages sont

convenables pour l'usage dans les circuits qui sont excités à courants faibles et exigeant une réponse rapide.

II.3.2.L'alliage fer cobalt, FeCo

Ils ont des qualités exceptionnelles entre 30 et 50 % de Cobalt, ces alliages possèdent une aimantation spontanée à température ambiante supérieure ou égale à 2,4T, le record absolu de tous les alliages ferromagnétiques. On note aussi que la constante d'anisotropie K_1 de l'alliage à 50 % de Cobalt est bien supérieure à celle du fer pur. Malheureusement, l'alliage qui est cubique centré, devient cubique à faces centrées au dessus de $900^\circ c$, ce qui complique beaucoup les traitements métallurgiques à haute température. Les traitements d'épuration en phase solide étant plus difficiles, on ne sait pas obtenir des alliages très faciles à aimanter comme dans le cas de FeNi ou FeSi .De plus, le Cobalt est beaucoup plus couteau.

II.3.3. L'alliage fer silicium, FeSi

Ce sont les matériaux les plus utilisés dans la construction électrique. Leur utilisation prédominante réside dans le fait qu'ils présentent une perméabilité élevée, le champ coercitif diminue considérablement et par conséquent les pertes par hystérésis diminuent. La résistivité électrique augmente ce qui entraîne une réduction des pertes par courants de Foucault. Seule l'induction à saturation est influencée défavorablement par le silicium, tel que, la polarisation à saturation d'un alliage FeSi à 3,1 % est voisine de 2,035T. Avec un champ coercitif bas et une haute résistivité, le fer silicium est convenable pour les circuits excités par des courants alternatifs ou pulsés avec des fréquences étendues de centaines à plusieurs milliers d'hertz.

II.3.4.Influence du silicium sur les propriétés physiques, mécaniques et métallurgiques [8 ,9]

L'addition du silicium au fer présente des avantages décisifs :

- Le premier est d'ordre métallurgique, dés que la température dépasse $910^\circ c$ le fer pur passe de la structure α (cubique centrée) à la structure γ (cubique à faces centrées), cette transition complique énormément les traitements à température élevée. L'ajout du silicium stabilise la phase α à toute température à partir de 1 ,8 %, autorisant ainsi toute une gamme de traitements métallurgiques sans transformation de phase : laminage, affinage, recristallisation…

- La constante K_1 d'anisotropie magnéto cristalline à la température ambiante passe de $4{,}8.10^4 J \cdot m^{-3}$ pour le fer pur à $3{,}4.10^4 J \cdot m^{-3}$ pour l'alliage à 3,5 ٪ Si .Cette diminution sensible de l'anisotropie magnétocristalline du fer, rend facile la rotation des moments, ainsi que la nucléation de nouveaux domaines aux joints de grains et donc un champ coercitif réduit qui entraîne la rétrécissement du cycle d'hystérésis et ainsi la diminution des pertes par hystérésis.
- La constante de magnétostriction λ_{100} passe de -20.10^{-6} à -5.10^{-6}.
- La résistivité électrique croit rapidement par addition du silicium et un alliage contenant 3,5 ٪ d'addition est déjà 3 ou 4 fois plus résistif que le fer pur.
- L'addition du silicium entraîne un durcissement du métal, qui rend possible le laminage des tôles minces mais, les techniques classiques de métallurgie ne permettent pas de dépasser un pourcentage x de silicium de 3,5 à 4 ٪ Si. Au delà, l'alliage devient trop fragile pour subir un laminage.
- La substitution des atomes de fer porteurs de moments magnétiques avec les atomes de silicium dépourvus de moments magnétiques, appauvrit la population des moments. Ainsi, la polarisation magnétique à saturation et la température de Curie diminuent avec la concentration en élément d'alliage, passant respectivement de 2,16T à environ 2T et de 770 à $760^{\circ}c$.

La figureII.3.4 ci-dessous nous montre les effets de l'addition du silicium au fer.

Tel que :

X : Pourcentage de silicium (en masse).

K_1 : Constante d'anisotropie magnéto cristalline.

λ_{100} : Magnétostriction.

ρ : Résistivité électrique.

J_S : Polarisation à saturation.

T_C : Température de Curie

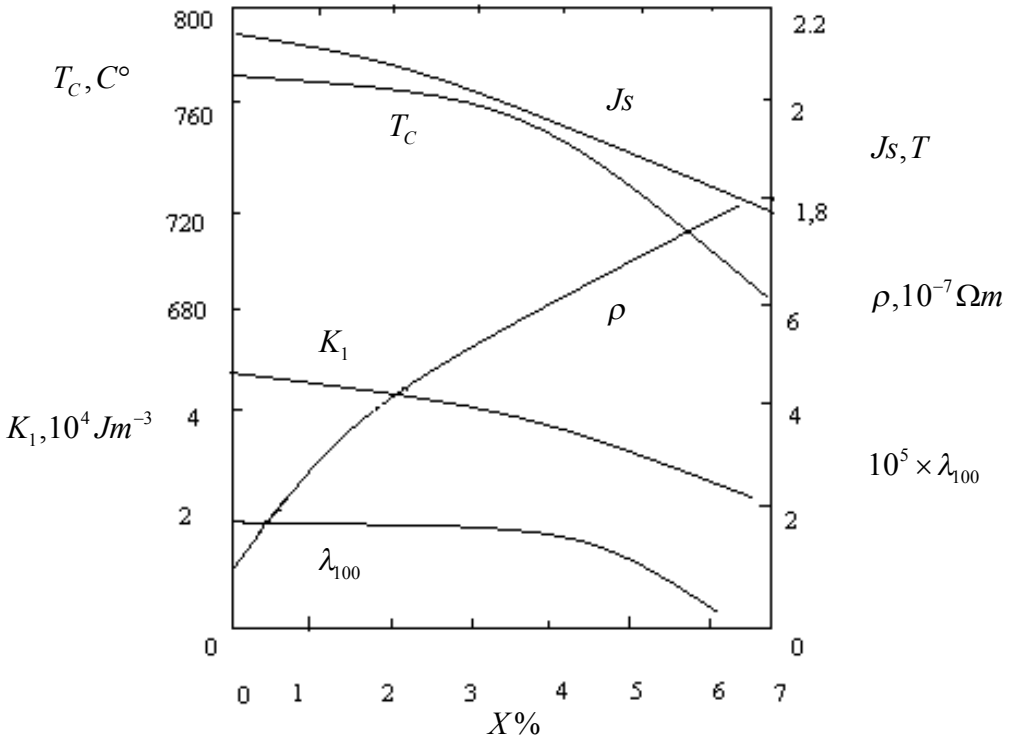


Fig. II.1. Effet de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques du fer à $20^\circ c$ ***[8]***

II. 3.5. Action des impuretés sur les propriétés magnétiques. Remèdes

a) : Impuretés contenues dans le fer

Le fer contient toujours un certain pourcentage d'impuretés diverses. Cela a un effet direct sur les propriétés magnétiques : réduction de l'induction à saturation et augmentation des pertes par hystérésis.

Les impuretés les plus néfastes sont le carbone, l'azote, le phosphore, l'oxygène et le soufre auxquelles pouvant s'ajouter d'autres éléments comme le molybdène, le manganèse,…etc.

Le plus souvent, la proportion de carbone, d'azote et d'oxygène est très importante dans le fer. Il se produit alors le phénomène chimique de précipitation c'est-à-dire la formation de molécules Fe_3C, Fe_4N ou FeO dont les dimensions sont importantes. De part leurs dimensions, les précipités empêchent le libre mouvement des parois de Bloch par un

processus d'épinglage, ce qui a pour conséquence d'augmenter les pertes par hystérésis et les échauffements du matériau lors des processus d'aimantation.

b) : Le rôle bénéfique joué par le silicium

L'ajout de quelques pourcents de silicium aux aciers magnétiques réduit considérablement l'action des impuretés. Le silicium provoque la décomposition de la cémentite Fe_3C pour former du graphite SiC qui est un carbone presque pur très bénéfique sur le plan magnétique et ayant une grande résistivité électrique.

Le silicium réduit les impuretés oxygène en formant des silicates SiO_2 moins nuisibles que les impuretés O.

Le silicium réagit aussi avec l'azote pour former des composés Si_3N moins néfastes que les nitrures Fe_4N qui sont la cause essentielle du vieillissement magnétique.

Il faut noter enfin que le silicium possède une résistivité électrique très élevée (4à 5 fois celle du fer) ce qui conduit à des pertes par courants de Foucault considérablement réduites. Malgré tous ces avantages, le silicium n'est pas magnétique, sa présence dans le fer déforme quelque peu la structure du réseau cristallin et sa présence dans le cristal équivaut à l'introduction d'un entre fer en lieu et place d'un atome de fer magnétique. Cela a pour conséquence de réduire, mais léger ment, l'induction à saturation du matériau.

II.4.Les tôles magnétiques en alliage fer silicium

Les alliages FeSi classiques se subdivisent en deux grandes catégories suivant leurs texture en grains orientés ou non :

Dans les transformateurs, le vecteur induction magnétique en chaque point garde une direction fixe et varie sinusoïdalement (sauf dans les coins). Il est alors intéressant d'utiliser la tôle à grains orientés ; dite tôle GO. Les grains cristallins auront ainsi une direction privilégiée dite direction de facile aimantation.

Dans les moteurs, au contraire, on rencontre souvent des champs tournants et la tôle GO ne pressente pas alors d'avantages déterminants, et les constructeurs utilisent alors la tôle à grains non orientés ; dite tôle NO, qui est moins chère. Ainsi les deux qualités (GO et NO) s'intéressent à deux marchés distincts entre lesquels il n'y a pas réellement concurrence.

II.4.1. Les tôles FeSi à grains non orientés (NO)

a) : Propriétés et constitution

Il existe un large éventail de qualités qui différent par :

- Le taux en silicium toujours inférieur à 3,2 % limite au delà de laquelle on ne peut plus laminer à froid [8].
- Eventuellement un taux d'aluminium voisin de 0, 3 % . [8]
- La cristallisation : d'une part, les joints de grains provoquent par effet magnétostatique l'ancrage des parois de Bloch. Il est donc préférable d'avoir des cristaux d'assez grande de taille pour diminuer l'importance des joins de grains. D'autre part, les orientations des cristaux ne sont jamais exactement au hasard. En effet, les traitements métallurgiques successifs et la présence inévitable d'impuretés conduisent la plus part du temps à une orientation préférentielle sensible des grains dans la direction de laminage. La conséquence est une anisotropie des pertes atteignant parfois 20 % [6]. A titre d'exemple on trouvera dans une tôle fer silicium courante, des impuretés aux taux suivants : $C = 0{,}005\,\%$ $S = 0{,}008\,\%$ $P = 0{,}015\,\%$ $N = 0{,}007\,\%$ $O = 0{,}010\,\%$ $M_n = 0{,}05\,\%$ … [9]

b) : Elaboration et traitements thermiques

L'élaboration s'effectue dans des usines spécifiques et sur des équipements lourds, qui travaillent à l'obtention de tous types de tôles magnétiques.

La fusion s'effectue généralement dans un four HF (haut fourneau) à induction et dans une atmosphère contrôlée. Après fusion, le matériau est coulé en lingots, qui sont usinés pour faire disparaître les irrégularités superficielles et les impuretés. On le passe ensuite au laminoir pour obtenir des tôles ou des rubans.

En général, la première partie de cette opération s'effectue à chaud mais, les étapes suivantes de la production comprenant plusieurs laminages à froid. Ce traitement laisse le matériau en bon état, et tout le long processus de fabrication ; on s'assure que le matériau n'est pas exposé à des atmosphères susceptibles de le contaminer (tableau (1)).

La réduction des pertes d'énergie en régime alternatif exige que le matériau se présente se forme de tôles aussi minces que possibles isolées électriquement les unes des autre. Les techniques modernes de laminage permettent d'obtenir une épaisseur bien calibrée et un très bon état de surface, d'où les facteurs de remplissage pouvant atteindre

0,98 [8].Le fournisseur livre généralement le matériau sous formes de bobines de plusieurs tonnes.

c) : Epaisseurs conventionnelles des tôles NO

Les épaisseurs utilisées varient de 0,7 mm pour les qualités les moins nobles contenant peu de silicium à 0,35mm pour les qualités les plus performantes. Et les épaisseurs les plus utilisées sont 0,65- 0,7 mm et 0,5 mm pour les gros moteurs (tableau (2)).

d) : Isolation des tôles NO

Dans les applications en alternatif, il est nécessaire d'assurer l'isolation des tôles empilées pour éviter les pertes excessives par courant de Foucault. Les revêtements isolants les plus courants sont les revêtements organiques minces (épaisseur ≈ 2 micromètres), ou des vernis phosphatant qui n'entravent pas la soudure des tôles quand elle est nécessaire.

e) : Utilisations

Les tôles NO sont disponibles sous deux formes nommées «Fully- process» et «semi-processs», selon que le matériau a déjà ses caractéristiques magnétiques optimales où ne les obtiendra qu'après un traitement thermique final effectué par l'utilisateur :

- **Les tôles semi finies (semi process)**

L'électroménager et l'automobile (moteurs, transformateurs, et alternateurs) sont des domaines privilégiées d'utilisation de ces tôles, sont aussi employées dans les machines tournantes de puissance inférieure à une vingtaine de KW.

- **Les tôles finies (Fully process)**

Sont employées dans trois grandes catégories d'appareillage :

- Machines tournantes (moteurs, dynamo, alternateurs), qui constituent l'utilisation principale.
- Les transformateurs de faible puissance.
- Certains dispositifs comme les contacteurs ou compteurs électriques ou l'on met à profit leurs caractéristiques quasi statiques.

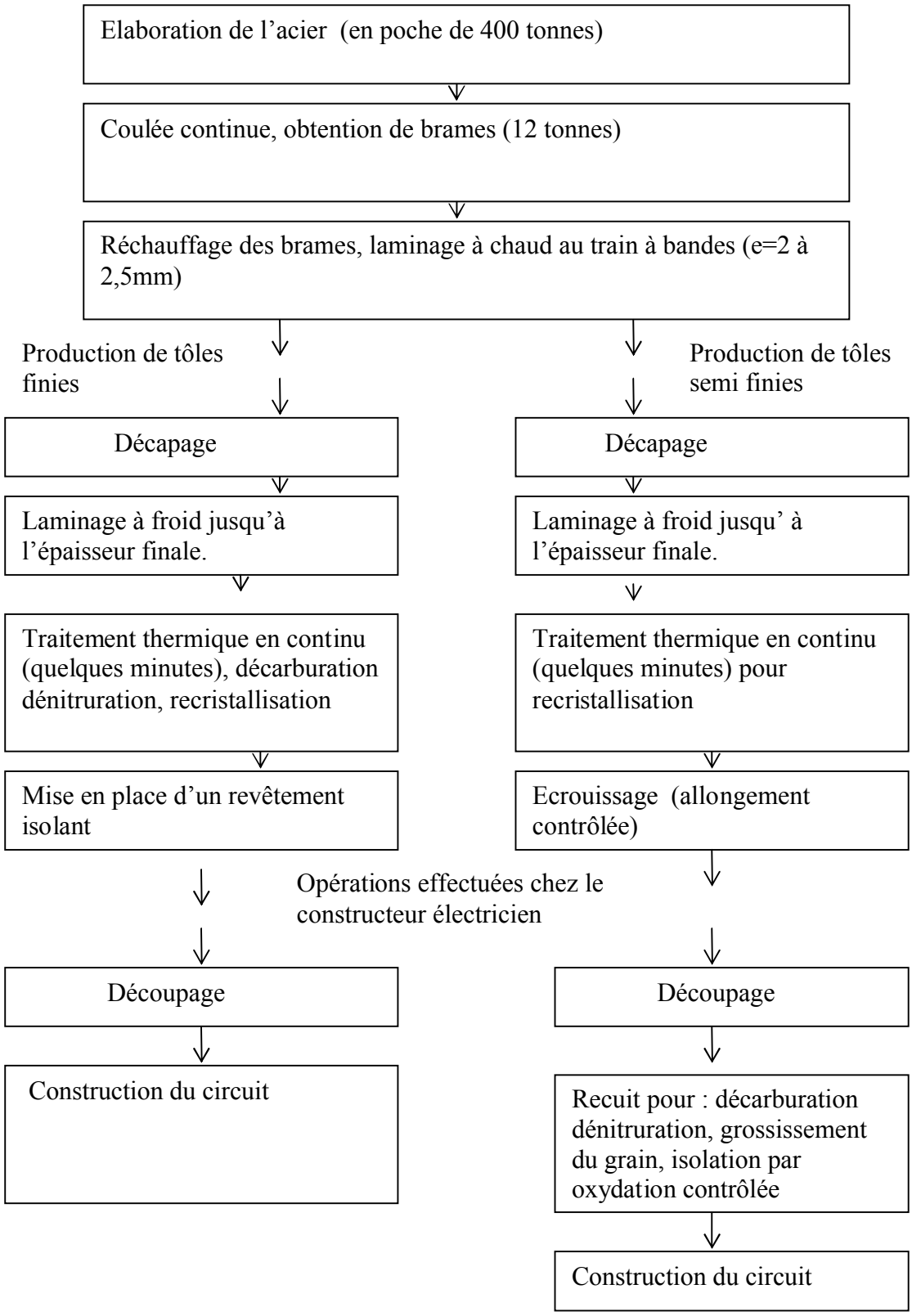


Tableau (1) : Principe de fabrication de tôles magnétiques non orientées selon les deux technologie en usage. [6]

f) : Caractéristiques magnétiques :

Le champ coercitif des tôles NO varie de 80 à 25 A m^{-1} suivant leur qualité. Du fait de la désorientation des grains, la courbe d'aimantation quasi statique (figure II.2) présente une approche à la saturation assez lente qui nécessite une énergie électrique d'excitation notable pour atteindre des niveaux d'induction élevés. Les fabricants indiquent les inductions minimales garanties à 2500, 5000 et 10000 A/m, voisines en général de 1,5, 1,6 et 1,7 Tesla.

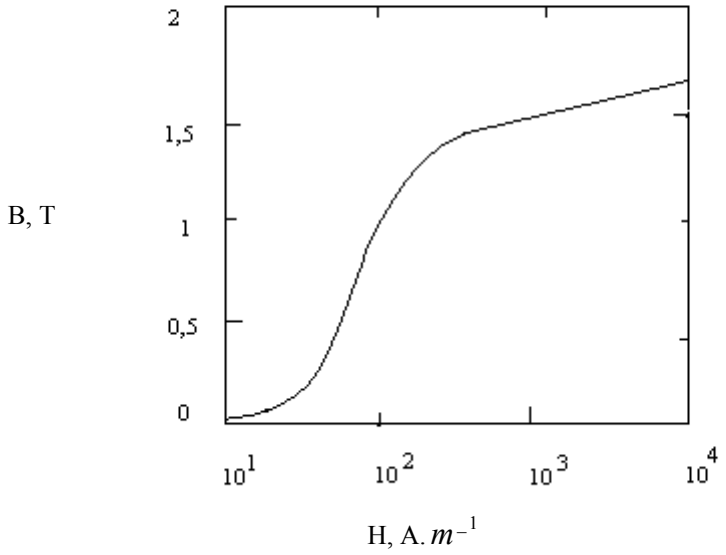


Fig. II .2. Courbe B (H) d'une tôle FeSi NO d'épaisseur 0, 35 mm [8]

Les pertes d'énergie en régime alternatif représentent la caractéristique la plus importante des tôles. Elles augmentent avec la fréquence et le niveau d'induction. Les fabricants indiquent généralement les pertes à 50HZ et 1,5T, qui atteignent une dizaine de W.K g^{-1} pour les plus basses qualités. La figure II.3, montre la croissance des pertes avec l'induction dans les tôles NO. Et le tableau (2) nous donne les caractéristiques normalisées de quelques qualités de tôles non orientées.

A titre d'exemple, les tôles «P» d'ugine SA ont des inductions minimales garanties de 1,66T, 1,75T et 1,87T à 2,5, 5 et 10 KA. m^{-1} , respectivement. Ces valeurs, jointes à des

conductivités thermiques deux fois plus élevées que celles des NO conventionnelles, en font des matériaux particulièrement adaptés à la construction des machines électriques.

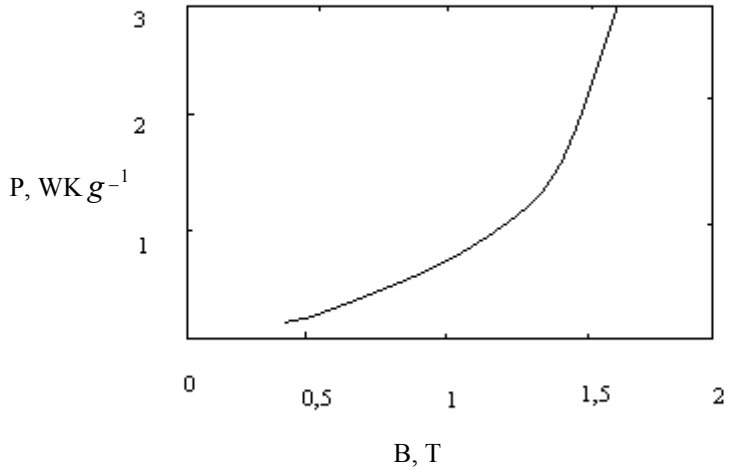


Fig. II.3. Pertes massiques à 50HZ dans une tôle FeSi NO d'épaisseurs 0,35 mm. [8]

	Epaisseur nominale (mm)	Pertes spécifiques maximales (W.K g^{-1} pour $\hat{B} = 1{,}5T$)	Induction minimale (enT) pour un champ $\hat{H}(enA.m^{-1})$			Utilisation principale	Dénomination normalisée
			2500	5000	10000		
Qualités «Fully-process»	0,35	2,50	1,49	1,60	1,71	Grosses machines tournantes	Fev25035HA Fev27050HA Fev47050HA Fev60065HA Fev80065HA
	0,50	2,70	1,49	1,6O	1,71	Grosses machines tournantes	
	0,50	4,70	1,52	1,62	1,73	Moteurs de moyenne puissance	
	0,65	6,00	1,54	1,64	1,75	Petits moteurs	
	0,65	8,00	1,58	1,68	1,76	Relais Appareillage domestique	
Qualités «Semi-process»	0,50	3,90	1,54	1,64	1,75	Moteurs de moyenne puissance	Fev390-50HE
	0,50	6,66	1,60	1,70	1,80	Petits moteurs	Fev66050HD
	0 ,65	5,20	1,55	1,65	1,76	Relais Appareillage	Fev520-65HE
	0,65	10,00	1,58	1,68	1,79	domestique	Fev10000-65HD

Tableau (2) : Caractéristiques magnétiques normalisées de quelques qualités de tôles non orientés. [6]

II.4.2. Tôles FeSi à grains orientés (GO)

a) : Propriétés et constitution

Dans ces tôles, les cristaux qui sont assez gros et ont pratiquement tous la même orientation, la dispersion moyenne autour de l'orientation idéale, qu'on appelle «texture de Goss»ou

$(110)\langle 001\rangle$ n'atteint que 7 à 8° dans les qualités courantes et 2 à 3° dans les qualités les plus performantes. [8]

Il en résulte une direction de facile aimantation parallèle à la direction de laminage très fortement privilégiée. La structure en domaine comprend de nombreuses parois de Bloch à 180° c sensiblement parallèles à la direction de laminage, ce qui entraîne des mécanismes d'aimantation facile et de faibles pertes.

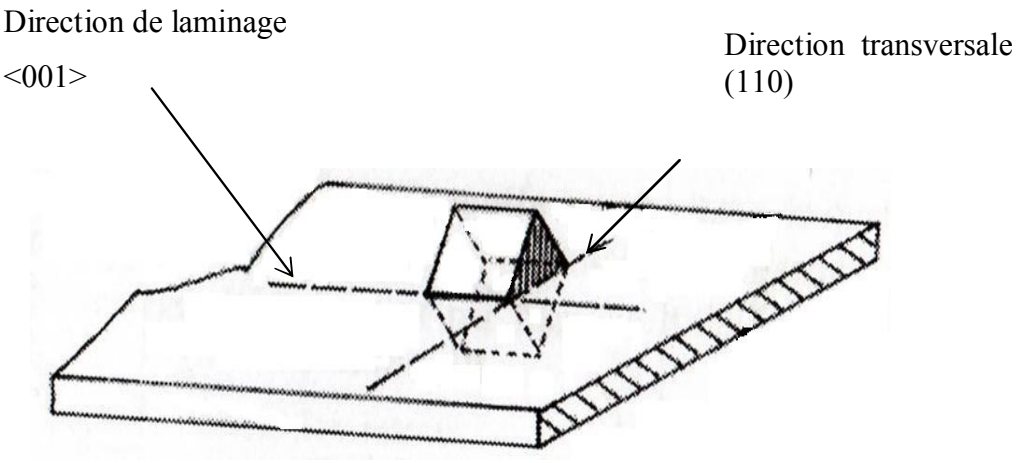


Fig.II.3.Orientation idéale des grains cristallins dans une tôle GO.

b) : Elaboration et traitements thermiques [6.7]

Ce sont des produits industriels qui bénéficient de soins extrêmes à tous les stades de leur fabrication laquelle nécessite de moyens considérables, toutes les tôles GO de fabrication industrielle mises sur le marché ont 3% du silicium, sans aluminium. Le processus de fabrication commence à partir d'une masse en fusion d'alliage à base de fer à taux d'impuretés parfaitement contrôlée (par exemple : C=0,03%, S=0 ,02%, $M_n = 0{,}08\%$, O<0,01%).

La brame subit donc un traitement thermique à haute température ($T \geq 1350^\circ c$), avant son laminage à chaud au train à bandes. L'opération de laminage à chaud est responsable de la texture primaire qui conditionne l'obtention de la recristallisation secondaire Goss.

Après cela, on procède à l'élimination des impuretés qui pourraient être néfastes à l'obtention de bonnes propriétés magnétiques en entravant le déplacement des parois. Pour cela, et afin d'obtenir la texture finale, plusieurs laminages à froid sont minutieusement appliqués.

- On élabore les tôles GO« classiques», d'épaisseurs 0,23 à 0,30mm par une coulée continue et une série de laminages et de recuits. L'étape finale est un revêtement par une solution phosphatant.
- Les tôles à haute perméabilité («Hi-B»), d'épaisseurs 0,23 à 0,30mm sont obtenues par un laminage à froid vers $250^{\circ}c$, unique mais très énergique. La tôle reçoit finalement un enduit phosphatant contenant de la silice sous forme colloïde. Au delà de sa fonction protectrice et isolante, ce revêtement joue un rôle important dans les propriétés magnétiques.

Les grandes étapes de la fabrication des tôles classiques sont représentées dans le tableau qui suit :

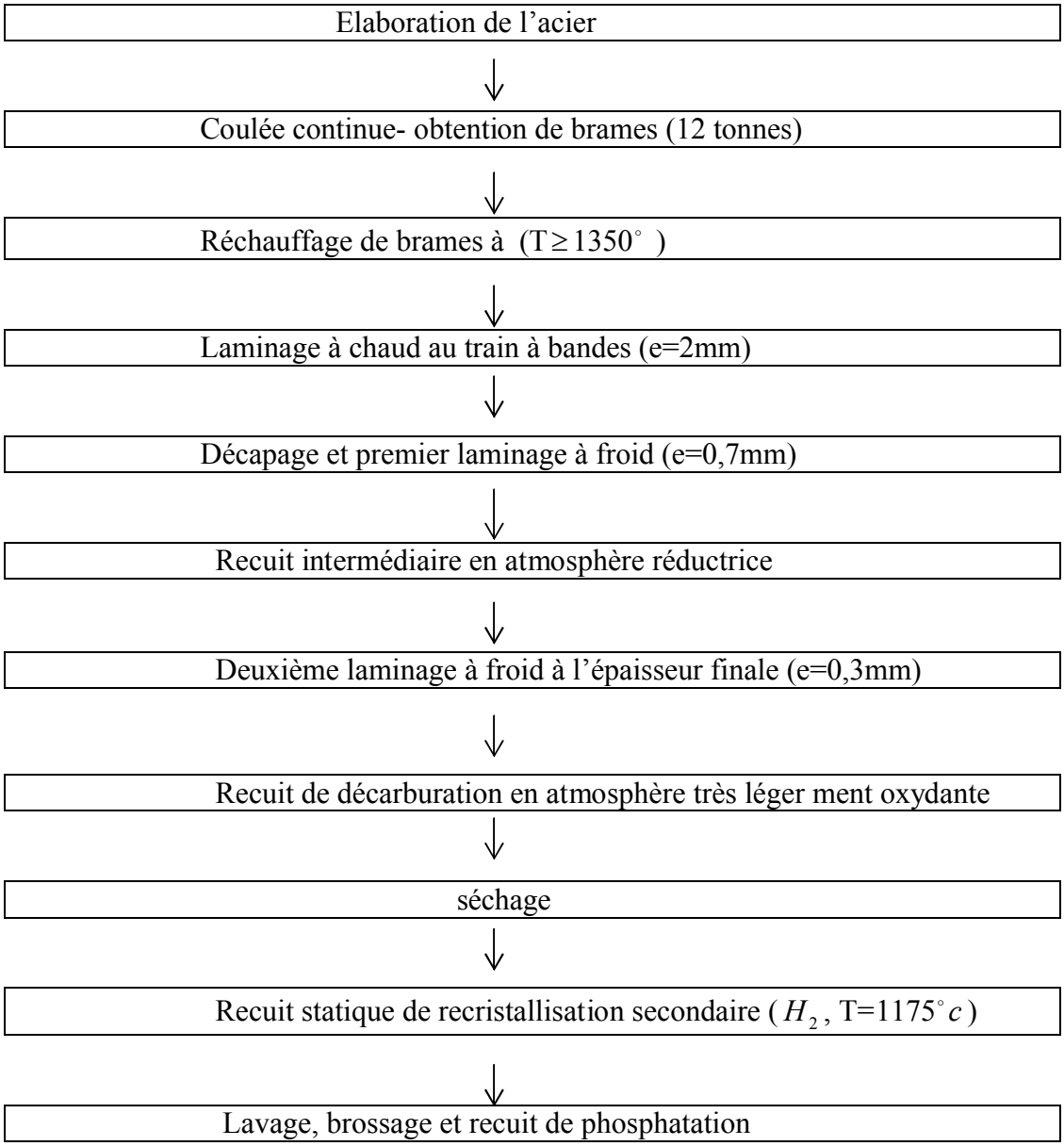


Tableau (3) : Principe de fabrication des tôles magnétiques à grains orientés classiques.[6]

c) : Utilisations et épaisseurs conventionnelles

Ces tôles sont utilisées dans les noyaux magnétiques pour transformateurs de puissance, ainsi que pour de simples noyaux de fer.

Les tôles les plus minces sont produites en Europe (e=0,23mm) ont les pertes spécifiques les plus réduites, mais l'utilisation industrielle des qualités les plus performantes comme les tôles

haute perméabilité reste relativement limité. Les tôles à grains orientés classiques d'épaisseurs 0,27 ou 0,3mm sont en pratiques les plus utilisées.

d) : Isolation des tôles GO

Les tôles à grains orientés reçoivent un revêtement minérale isolant, pour les tôles classiques, il s'agit d'un silicate de magnésie ; appelée forstérite (Mg_2SiO_4) qui a subit une phosphatation, ce revêtement est très mince (2à 5µm). Le revêtement est conçu pour résister à une température de recuit pouvant aller jusqu'à $800^\circ c$. Pour une durée de recuit supérieure à ce niveau (four à cloche) par exemple, le recuit doit s'effectuer sous une atmosphère d'azote.

Cette isolation est résistante à l'huile et n'attaque pas non plus les huiles de transformateur. En pratique, un bon revêtement entraîne une diminution de pertes.

e) : Caractéristiques magnétiques

Le champ coercitif des tôles GO vaut 5A. m^{-1} . Du fait de l'orientation presque parfaite des domaines dans la direction du champ magnétisant, les rotations du vecteur aimantation n'interviennent pratiquement pas et la courbe d'aimantation des alliages GO est beaucoup plus rapide que celle des NO. Sous un champ de 800A. m^{-1}, l'induction est déjà voisine de 1,75T pour une tôle normale et1, 85T pour une tôle à haute perméabilité (figure II.5).

Naturellement, la perméabilité diminue et les pertes augmentent vite dés que le champ n'est plus appliqué parallèlement à la direction de laminage. C'est pourquoi les tôles à grains orientés ne servent pratiquement qu'à la construction des transformateurs, et les tôles à haute perméabilité sont utilisées au dessus de 1,6T environ (figure II.6).

Le tableau (4) rapporte les caractéristiques magnétiques essentielles de quelques qualités de tôles GO.

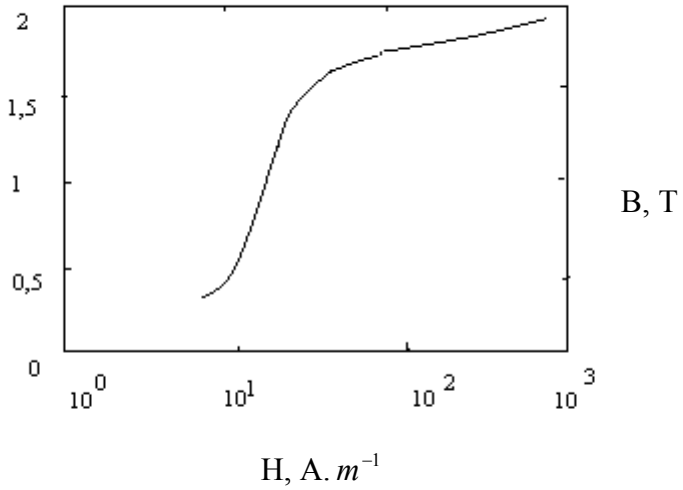


Fig.II.5. Courbe B (H) à 50 HZ pour une tôle GO«Hi -B» d'épaisseur 0,23mm [8]

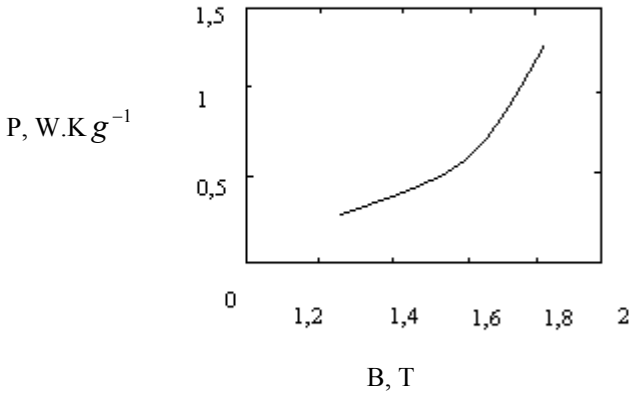


Fig.II.6. Pertes à 50HZ en fonction de l'induction dans une tôle«HiB»d'épaisseur 0, 23 mm [8]

Type de tôle	Epaisseur nominale (en mm)	Pertes spécifiques maximales $\hat{B} = 1,7T,50HZenW.Kg^{-1}$	Puissance apparente spécifique $\hat{J} = 1,7T,50HZenVA.Kg^{-1}$	Polarisation $J_{800}enT$
Tôle classiques	0,35	1,5	3	1,75
	0,30	1,25	2,7	1,84
	0,23	1,07	2,6-2,7	1,84
Tôle à haute perméabilité	0,30	1,05	1,40	1,92
	0,27	1,03	1,40	1,92
	0,23	0 ,85	1 ,40	1,90

Tableau (4) : Caractéristiques de quelques tôles GO [6]

II.5. Evolution et perspectives des alliages fer silicium

II.5.1. Les tôles FeSi de faible épaisseur

Lorsque la fréquence de travail s'accroît (ce qui est le cas de beaucoup de dispositifs d'électronique et d'électrotechnique aujourd'hui), l'utilisation de tôles trop épaisses conduirait à des pertes électromagnétiques et à des échauffements inadmissibles dans les machines. Par conséquent, le choix de l'épaisseur d'une tôle se fait en tenant compte de sa fréquence de travail. Celle -ci étant elle-même liée directement à la profondeur de peau notée δ qui constitue une donnée essentielle présidant au choix d'une épaisseur de tôle :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad [m]$$

Avec :

ρ : La résistivité électrique.

f: La fréquence.

μ : La perméabilité magnétique.

En général on choisit une épaisseur de tôle e voisine de l'épaisseur de peau δ . Cette condition permet d'avoir une répartition sensiblement uniforme de l'induction magnétique à travers l'épaisseur de la tôle.

Les tôles de faible épaisseur trouvent leurs applications dans les machines spéciales à grande vitesse (matériel embarqué) fonctionnant aux fréquences allant de 400HZ à 10KHZ.

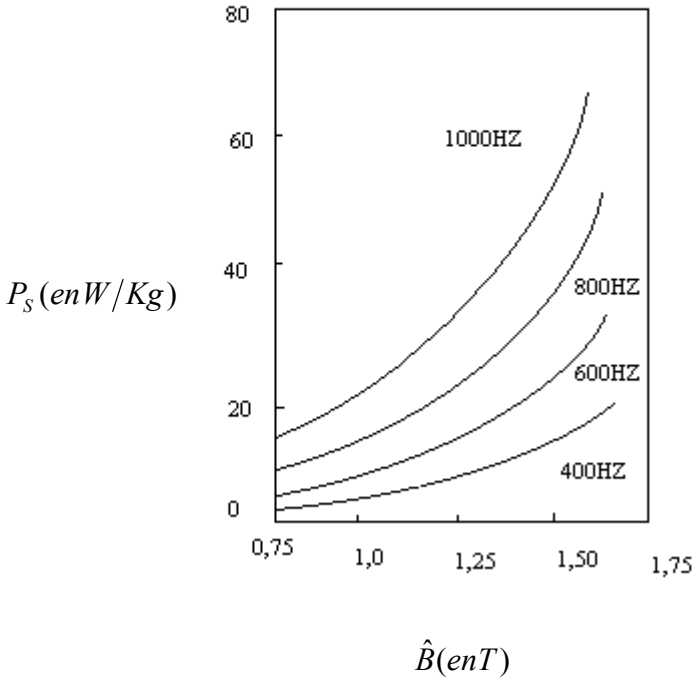


Fig. II.7. Pertes spécifiques d'une tôle FeSi mince (3% en poids, e=0 ,10mm), à grains orientés à différentes fréquences [6]

Quelques caractéristiques des tôles minces sont réunies dans le tableau (5) :

Type de tôles	Qualités à grains orientés Si=3٪	Qualités à grains non orientés Si=3,2٪
	Pertes spécifiques à 400HZ et $\hat{B}=1{,}5T(enW/Kg)$	Pertes spécifiques à 400HZ et $\hat{B}=1T(enW/Kg)$
e=0 ,05mm	19	/
e=0,10mm	15	14
e=0,15mm	16,5	15
e=0,20mm	/	15

Tableau (5) : Pertes spécifiques des tôles FeSi minces à 3٪ de Si [6]

II.5.2.Alliage à haute teneur en silicium

Des expériences ont montré que les matériaux magnétiques enrichies jusqu'à 6,5٪ de silicium présentent des caractéristiques électromagnétiques, telle que la résistivité électrique, l'anisotropie et la magnétostriction, nettement améliorées. Ce qui conduit à des pertes magnétiques diminuées de 20 à 30٪ par rapport à celles des machines conventionnelles.

Malheureusement au- delà de 3,5٪ en silicium, l'alliage FeSi présente une grande fragilité qui interdit sa mise en forme par des moyens conventionnels (laminage par exemple).

Deux nouvelles technologies sont alors utilisées pour obtenir les alliages FeSi contenant un excès de silicium :

- La solidification rapide de l'alliage Fe - 6,5٪ Si sur la jante d'une roue refroidie et tournant à grande vitesse permet d'obtenir des rubans métalliques d'épaisseurs allant de 30 à 150µm.
- Une autre voie consiste à effectuer tous les traitements métallurgiques sur un fer pur ou un alliage FeSi classique que l'on enrichit finalement en silicium.

Le procédé consiste à mettre le matériau à traiter en contact avec un composé volatil de l'élément à déposer, à une température assez élevée pour provoquer une réaction chimique.

NKK corporation (Japon) élabore depuis 1993 des tôles NO à 6,5 ٪ de silicium d'épaisseur 0,3 à 0,05mm.

Le tableau (6) nous donne les caractéristiques normalisées pour deux échantillons NO et GO d'épaisseurs 0,2mm.

	f (hertz)	1	50	400	1000
NO	P (W.K g^{-1})	0,012	1,1	19	88
	μ_r^{max}	2300	2200	2100	2000
GO	P (W.K g^{-1})	0,006	0,55	10	40
	μ_r^{max}	8500	8000	7000	5000

Tableau (6) : Pertes massiques et perméabilité relative maximale de deux échantillons NO et GO d'épaisseurs 0,2mm [8]

III.1. Introduction

Qu'est ce qu'un matériau doux idéal ? Un matériau doux idéal est celui qui peut acquérir une polarisation magnétique de très grand module (plusieurs teslas), dans un champ d'excitation très réduit. Il possède donc une grande perméabilité et n'aurait aucune perte en fonctionnement dynamique. Malgré les progrès considérables réalisés dans la construction électrique, le matériau est loin de satisfaire cet idéal.

Les caractéristiques des matériaux magnétiques intéressent au premier lieu les constructeurs puisqu'elles déterminent les performances des machines électriques. D'ailleurs ces matériaux sont commercialisés avec des spécifiques garanties.

Les mesures pour la caractérisation des tôles magnétiques sont généralement réalisées à l'aide du dispositif le plus connu qu'est le cadre Epstein. En ce qui nous concerne, nous avons procéder au niveau du laboratoire de l'entreprise Electro- industries d'Azazga à des tests sur deux échantillons de tôles finies : tôle à grains orientés et tôle non orientés.

III.2. Banc de mesure

Ce banc de mesure est composé essentiellement de deux parties : le cadre Epstein et l'appareil Vettiner ; constituée de trois étages (ou compartiments).

III.2.1. Cadre d'Epstein

C'est un circuit fermé démontable, de forme carrée, utilisé pour caractériser les tôles magnétiques. Sa construction a été soigneusement codifiée de nombreux organismes de normalisation (CEI, AFNOR, etc.…) qui se conforment avec le CEN ; comité Européen de normalisation. Fig. III. 1.

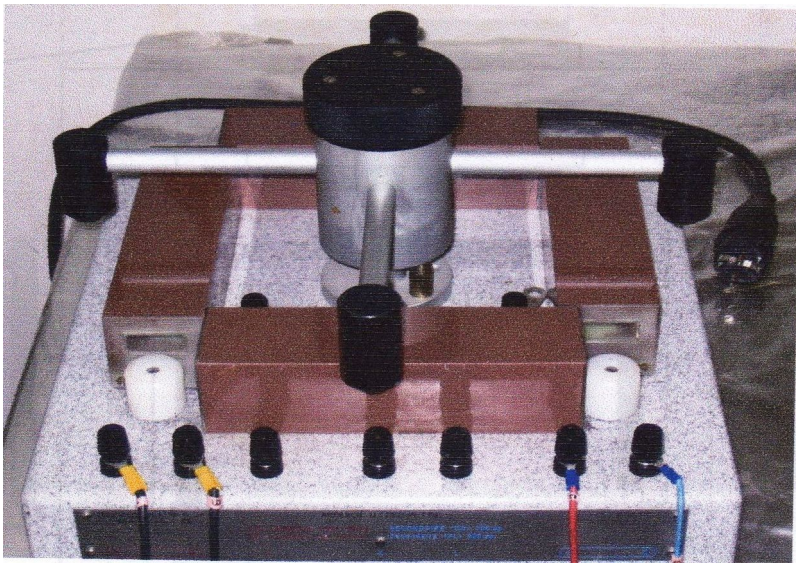


Fig.III.1 Photo du cadre Epstein

- **Constitution**

Le noyau magnétique est constitué de N bandes rectangulaires (N étant multiple de 4 et au moins égal à 16). Les dimensions recommandées pour chaque bande étant $280 \times 30 mm^2$, on utilise environ 0,5 Kg de matière par noyau magnétique. Les N bandes étant assemblées en un circuit carré, avec des joints de recouvrement (figure III.2), de telle sorte que le périmètre moyen vaut exactement 1m. Les bandes sont découpées aux cotes précises et sans bavures dans la tôle qu'il s'agit d'évaluer, soit parallèlement à la direction de laminage s'il s'agit d'une tôle à grains orientés, soit pour moitié seulement dans la direction de laminage et pour moitié dans la direction travers s'il s'agit d'une tôle ordinaire (figure III.3). [6]

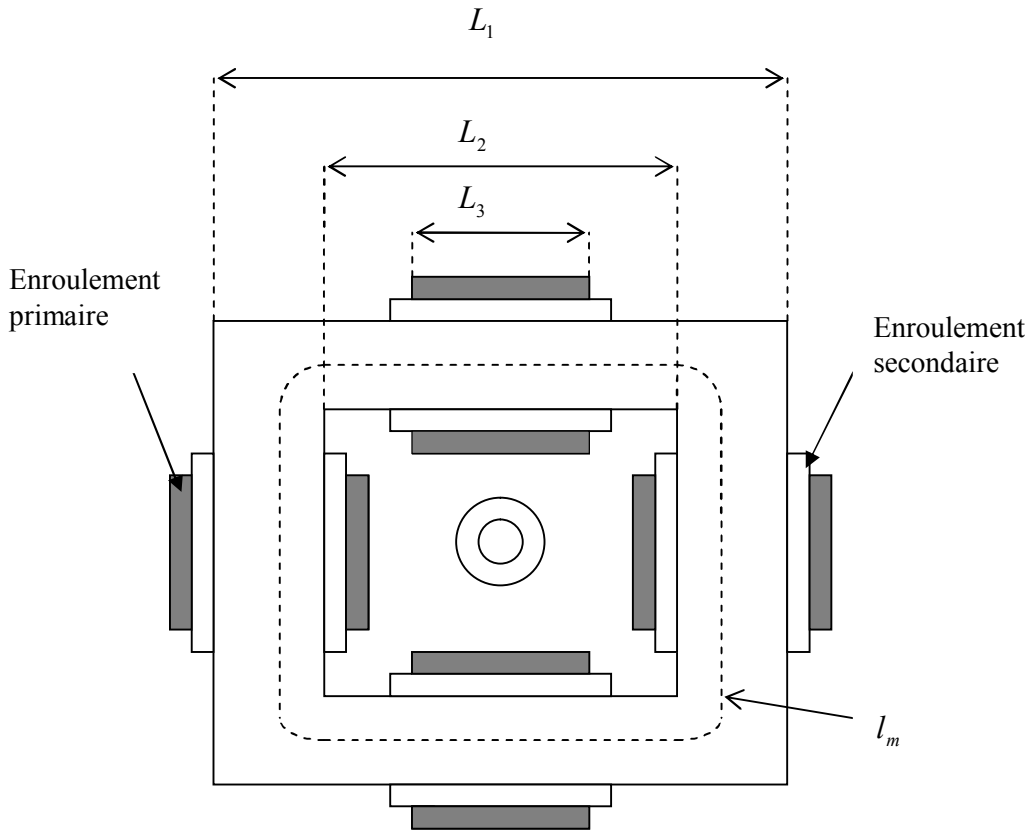


Fig.III.2.Schéma général d'un Cadre d'Epstein

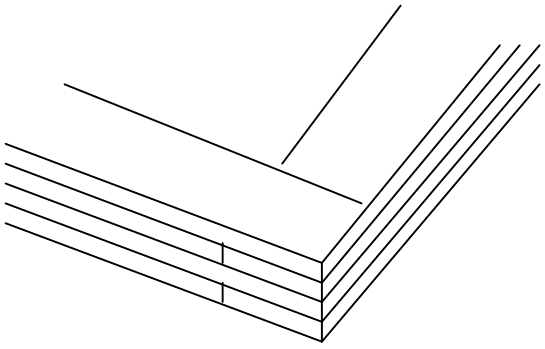


Fig. III.3. Joints à recouvrement réalisés dans un coin de circuit Epstein.

- **Principe de fonctionnement**

Le cadre d'Epstein de 25 cm qui comprend un enroulement primaire, un enroulement secondaire et l'éprouvette à tester formant le noyau constitue un transformateur à vide dont on mesure les caractéristiques magnétiques.

- Enroulement primaire (excitation) : $N_1 = 700$ spires ;
- Enroulement secondaire (mesures) : $N_2 = 700$ spires ;
- Longueur du coté extérieur du cadre : $L_1 = 280mm$;
- Longueur du coté inférieur du cadre : $L_2 = 220mm$;
- Longueur de la partie bobinée : $L_3 = 190mm$

- **Avantages et inconvénients**

- Le circuit Epstein est un dispositif normalisé son avantage primordial réside dans le fait qu'il s'agit d'un circuit démontable, facile à réaliser et utilisé pour 0.5 à 1.0 Kg de matériau.
- Dans les coins, il n'y a plus d'enroulements et une épaisseur double de matière, en plus, le passage de flux s'effectue nécessairement à travers le revêtement isolant de la tôle. Pour cela, des mesures établies pour que ce système se comporte comme un circuit fermé (homogène) ayant pour section la section moyenne d'un coté (c'est-à-dire la section de N/4 bandes) et pour longueur ce qu'on appelle, la longueur conventionnelle du circuit, l_m , établie à l_m =0,94m.
- Malgré tous les soins apportés au découpage des bandes, le cisaillage introduit des contraintes locales qui dégradent les performances magnétiques de la tôle.

III.2.2. Appareil Vettiner

Cet appareil est constituée de trois compartiments essentiels : le générateur, l'analyseur et un PC muni d'un logiciel.

III.2.2.1. Premier compartiment

Ce compartiment est simplement un générateur (50V- 40A crête), qui fait office d'alimentation pour les bobines primaires du cadre d'Epstein.

III.2.2.2. Deuxième compartiment

Représente l'analyseur qui est un organe très important, et qui joue un rôle important dans le traitement des données, est un coffret de mesures regroupant entre autre, les mesures de champ, de l'induction et des pertes. La lecture des résultas s'effectue directement sur un afficheur LCD grand format ($250 \times 38mm$).

- **Caractéristiques électriques**

Le champ **H** est déterminer à l'aide d'un ampermétre de champ mesurant le courant crête circulant dans l'enroulement primaire N_1 du capteur de mesure (cadre Epstein) grâce à l'utilisation de transducteur de précision à effet Hall. Il permet ainsi de déterminer la perméabilité relative des tôles.

L'induction magnétique **B** est déterminée à l'aide d'un voltmètre de flux intégrateur de tensions aux bornes de l'enroulement secondaire N_2 du capteur de mesure (cadre Epstein).

Les pertes totales spécifiques **Ps** sont déterminées à l'aide d'un wattmètre numérique à haute sensibilité.

Mesures de champ H :

- Sensibilités : 999.9 A/m - 9.999 KA/m - 99.99 KA/m
- Gamme de courant : 1- 4- 10- 40- 100A
- H crête = $(\hat{I} \times N) / l_m$
- l_m est la longueur du circuit magnétique
- Etalonnage : N= 700 spires, l_m =0.94m

Mesures d'induction B

- Lecture : 2.500 tesla
- Fréquence de la tension U : 20<F<2000Hz. Forme d'onde quelconque.

Mesures des pertes spécifiques

- Calibre tension : 40- 100- 400- 1000 Volts crête.
- Calibre intensité : 1- 4- 10- 40 A.
- Puissance : 0.2 à 200W.
- Affichage numérique : 2000 à 5000 points suivant les calibres

- Précision des mesures : 0.5 %

III.2.2.3. Troisième compartiment

C'est un PC, doté d'un logiciel de calcul spécialement conçu pour exécuter tous les calculs nécessaires et nous permet d'avoir les courbes des paramètres magnétiques. L'écran du PC est un moyen pour voir en temps réel l'évolution des différentes grandeurs, le clavier nous sert pour insérer les données utiles à la mesure.

Ecran de visualisation

Analyseur

Générateur

Fig.III.4.Photo de l'appareil Vettiner

III.3. Procédure de mesure

Les différents essais ont été réalisé au laboratoire de mesures de l'entreprise E.I qui a mis à notre disposition deux échantillons de tôles : tôle GO (M150-30S) destinée pour transformateur et la tôle NO (M530-50A) destinée pour moteurs avec leurs dimensions normalisées.

III.3.1. Choix des éprouvettes

Le choix s'effectue suivant l'utilisation à savoir si la tôle est destinée pour la construction d'un transformateur ou bien pour un moteur, et aussi le nombre des éprouvettes qui vont constituer le circuit magnétique selon l'épaisseur de l'échantillon.

Pour nos essais nous avons pris les échantillons de tôles comme suit :

- Echantillon A : tôle GO (M150- 30S), constitué de 36 éprouvettes.
- Echantillon B : tôle NO (M530- 50A), constitué de 32 éprouvettes, moitié découpée dans le sens de laminage et moitié dans le sens travers.
- Echantillon C : tôle NO (M530- 50A), constitué de 20 éprouvettes découpées dans le sens de laminage.
- Echantillon D : tôle NO (M530- 50A), constitué de 20 éprouvettes découpées dans le sens travers.

III. 3.2. Les principales garanties et désignations

M : acier magnétique.

530 : signifie que les pertes spécifiques maximales en W.K g^{-1} à 50HZ pour 1,5T sont 5,3.

50 : l'épaisseur minimale est 0,5 mm.

A : livrée à l'état fini.

S : tôle classique.

150 : signifie que les pertes totales spécifiques maximales à 50HZ pour : 1 ,5T sont 0,97 W.K g^{-1} et pour 1,7T sont 1 ,50W.K g^{-1} .

Anisotropie maximale des pertes en $\%$: ± 10.

III.3.3. La pesée

La pesée se fait sur une balance de précision, et la valeur indiquée représente la mesure pesée qu'on note M_P qui est donnée en gramme.

a) : Calcul de la masse active

Elle est notée M_a et donnée par la formule suivante :

$$M_a = \frac{l_m}{4l} M_P[g] \qquad [10]$$

$l_m = 0{,}94m$; est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique.

l; est la longueur mesurée d'une bande éprouvette ;

La longueur mesurée de l'éprouvette de la tôle GO est l=280 ;

La longueur mesurée de l'éprouvette de la tôle NO est l=281 ;

M_P ; est la masse pesée de l'éprouvette, en gramme ;

M_a ; est la masse active de l'éprouvette.

b) : calcul de la section active

$$A = \frac{M_P}{4l\rho}\left[cm^2\right] \qquad [10]$$

ρ **:** est la masse volumique.

Les valeurs conventionnelles de ρ sont :

$\rho = 7{,}65\, g/cm^3$ (pour la tôle GO) et $\rho = 7{,}70\, g/cm^3$ (pour la tôle NO).

Les résultats sont représentés dans le tableau ci- dessous :

	Echantillon A	Echantillon B	Echantillon C	Echantillon D
Masse pesée $M_P[g]$	673,2	1031.2	645.2	643.6
Masse active $M_a[Kg]$	0,5652	0.8623	0.5396	0.5387
Section active A [cm^2]	0,786	1.1914	0.7455	0.7443

Tableau (1) : Tableau récapitulatif des résultats.

III.3.4. Construction du circuit magnétique

Pour que le circuit soit homogène, il faut bien respecter l'empilement des tôles. Pour l'échantillon A et C, le circuit est constitué de tôles découpées dans le sens de laminage. Pour l'échantillon B, le circuit est constitué pour moitié, de tôles découpées dans le sens de

laminage et pour moitié dans le sens travers, et pour l'échantillon D, le circuit est constitué de tôles découpées dans le sens travers.

III.3.5. Introduction de données dans l'analyseur

On introduit dans l'analyseur les valeurs calculées de la masse active et de la section active, l'induction maximale, et le nombre de points de mesure. Et pour distinguer les essais, on ajoute la désignation pour chaque échantillon, et les résultats sont donnés par deux modes : le mode automatique et le mode manuel. Avant la mise en marche de l'appareil, on désaimante l'éprouvette (le circuit magnétique) par application d'un champ magnétique alternatif régulièrement décroissant.

III.3.6. Acquisition des résultats

Le mode manuel nous permet d'avoir des valeurs des pertes spécifiques P_S , pour des valeurs d'induction magnétique B et aussi des valeurs d'inductions pour des valeurs du champ magnétique H. Et le mode automatique nous permet de recevoir les résultats sous forme de tableaux et de courbes pour les grandeurs magnétiques (B, P_S, la perméabilité relative μ_r, ainsi que la puissance apparente spécifique S_S) en fonction du champ magnétique H.

III.4. Caractéristiques initiales des échantillons

III.4.1. Caractéristiques initiales de la tôle GO (M150- 30S)

Type de tôle	Epaisseur nominale (en mm)	Pertes spécifiques $\hat{B} = 1{,}5T, 50HZenW.Kg^{-1}$	Pertes spécifiques $\hat{B} = 1{,}7T, 50HZenW.Kg^{-1}$	Induction minimale B_{800} en T
M150-30S	0,3	0,8	1,5	1,8

Tableau (2) : Caractéristiques de la tôle GO (M150-30S).

Ces caractéristiques initiales sont représentées par les figures B(H), P_S (B), μ_r(H) suivantes :

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,936	5125	2,4	300,6
1,896	2077	2,245	726,4
1,856	1243	2,089	1188
1,814	733	1,919	1969
1,777	454,3	1,746	3113
1,735	283,9	1,578	4863
1,696	183,1	1,432	7371
1,656	127,6	1,304	10330
1,617	93,3	1,197	13790
1,577	72,6	1,109	17290
1,538	59	1,035	20740
1,498	50	0,9723	23840
1,459	42,6	0,9131	27250
1,418	37,1	0,8549	30420
1,38	32,2	0,8023	34100
1,341	33,5	0,7611	31850
1,301	30,2	0,714	34280
1,263	27,9	0,6687	36020
1,224	27	0,6284	36080
1,184	27,7	0,5955	34010
1,146	26,4	0,5578	34540
1,106	25,3	0,5214	34790
1,067	24,5	0,4892	34660
1,027	24,9	0,4631	32820
0,988	23,8	0,4317	33030
0,949	22,3	0,4003	33860
0,909	22,7	0,3777	31870
0,87	20,8	0,3448	33280
0,83	19,6	0,3147	33700
0,791	18,7	0,286	33660
0,752	18,1	0,2638	33060
0,713	17,5	0,2399	32420
0,673	17	0,2213	31500
0,634	16,2	0,1983	31140
0,595	15,5	0,1728	30550
0,555	14,7	0,1514	30040
0,516	14,1	0,1348	29120
0,477	13,4	0,119	28330
0,437	12,6	0,101	27600
0,398	11,9	0,0866	26610
0,358	11,1	0,0725	25670
0,319	10,2	0,0589	24890
0,28	9,4	0,047	23700
0,241	8,5	0,039	22560
0,202	7,5	0,0272	21430
0,162	6,5	0,0192	19830
0,123	5,4	0,0123	18130
0,084	4,3	0,007	15550
0,045	3,1	0,0033	11550
0,007	2	0,0008	2785
0	0,9	0	0

Tableau (3) : Rapport de mesure de la tôle GO (M150-30S

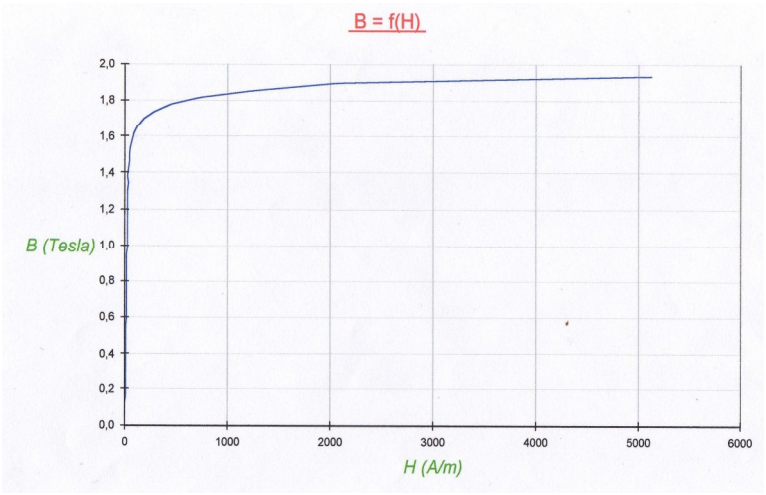


Fig.III.5. Courbe B (H) de la tôle GO (M150-30S).

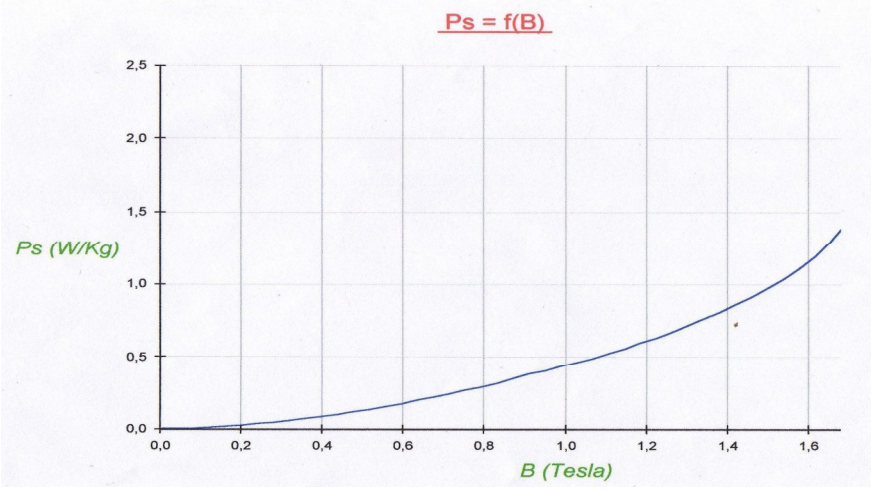


Fig.III.6.Courbe Ps (B) de la tôle GO (M150-30S).

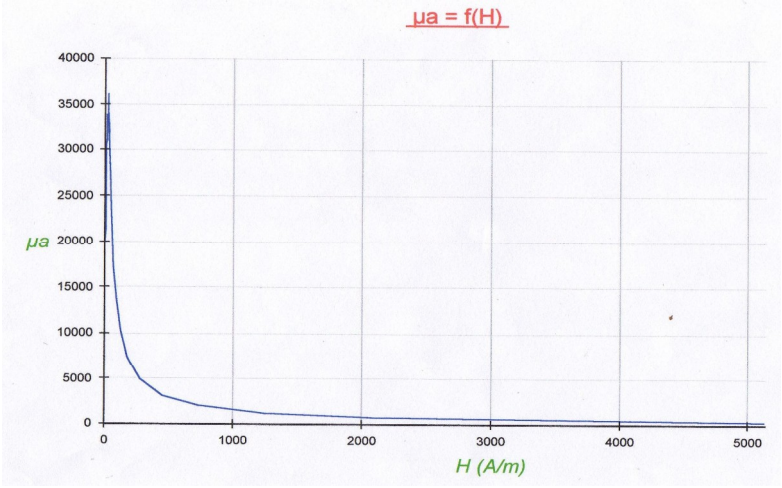


Fig.III.7.Courbe µr (H) de la tôle GO (M150-30S).

III.4.1.1. Recuit de relaxation

On introduit l'échantillon A de tôles magnétiques GO dans un four à moufle à $810^{\circ}c$ pendant 1mn. Au bout d'une minute, on ressort l'échantillon et on le laisse refroidir à la température ambiante, et on procède à la mesure des pertes spécifiques.

Les résultats obtenus après relaxation sont :

$P_{1,5} = 0,89 \ \ W.Kg^{-1}$

$P_{1,7} = 1,3 \ \ W.Kg^{-1}$

$B_{800} = 1,84T$

Le recuit de relaxation se fait seulement pour les tôles GO qui contiennent une isolation minérale, c'est un recuit de recristallisation qui permet d'éliminer les contraintes mécaniques provenant du cisaillage des tôles ce qui améliore leurs performances magnétiques. Les tôles NO contiennent une isolation organique, donc ne supportent pas le recuit de relaxation ; qui risque de les détériorer.

Les pertes magnétiques et la perméabilité magnétique avant et après recuit sont représentées respectivement dans les figures III.8 et III.9.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,819	555,7	1,82	2605
1,772	293,3	1,609	4808
1,725	171,6	1,425	7999
1,679	112,8	1,282	11840
1,633	80,9	1,168	16060
1,586	61,4	1,072	20560
1,54	49,3	0,9932	24860
1,494	42,7	0,9278	27840
1,448	35,1	0,8619	32830
1,402	33	0,8078	22810
1,357	28,1	0,7519	38430
1,31	27,2	0,7029	38330
1,264	24,8	0,6533	40560
1,218	23,6	0,6079	41070
1,171	23	0,5645	40520
1,125	22,3	0,523	40150
1,08	21,7	0,4847	39610
1,033	21,1	0,4493	38960
0,987	20,5	0,4113	38310
0,941	19,8	0,3756	37820
0,894	19,2	0,3428	37050
0,848	18,5	0,3117	36480
0,801	17,9	0,282	35610
0,756	17,2	0,2569	34980
0,709	16,5	0,23	34190
0,662	15,8	0,2022	33340
0,616	15	0,1769	32680
0,569	14,2	0,1537	31890
0,523	13,6	0,1337	30600
0,477	12,8	0,1141	29650
0,43	11,9	0,0948	28750
0,384	11,1	0,0778	27530
0,338	10,1	0,0626	26630
0,291	9,2	0,0484	25170
0,245	8,1	0,0364	24070
0,199	7,1	0,0258	22300
0,152	6	0,0168	20160
0,106	4,7	0,0097	17950
0,06	3,4	0,0046	17040
0,014	2,1	0,0012	53050
0	1,1	0	0

Tableau (4): Rapport de mesure de la tôle GO (M150-30S) après recuit.

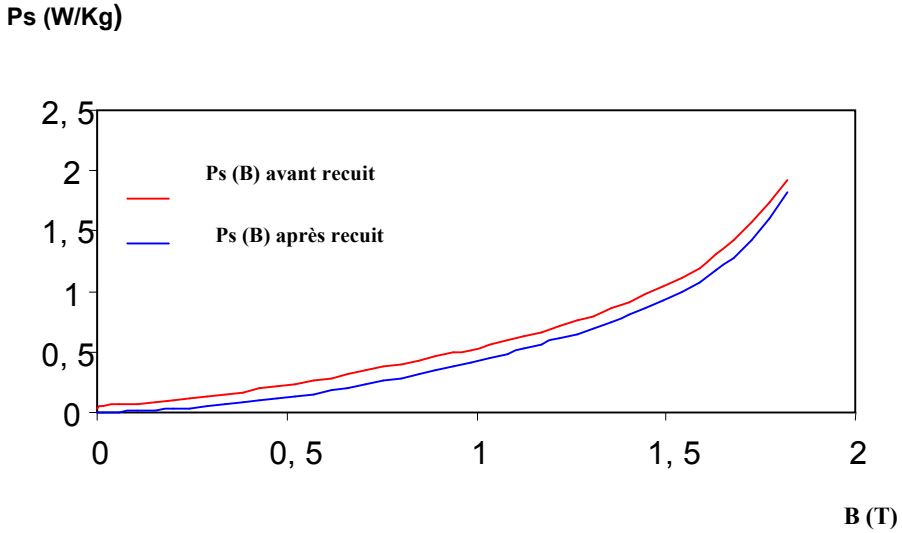


Fig.III.8.Courbes Ps (B) de la tôle GO (M150-30S) avant et après recuit.

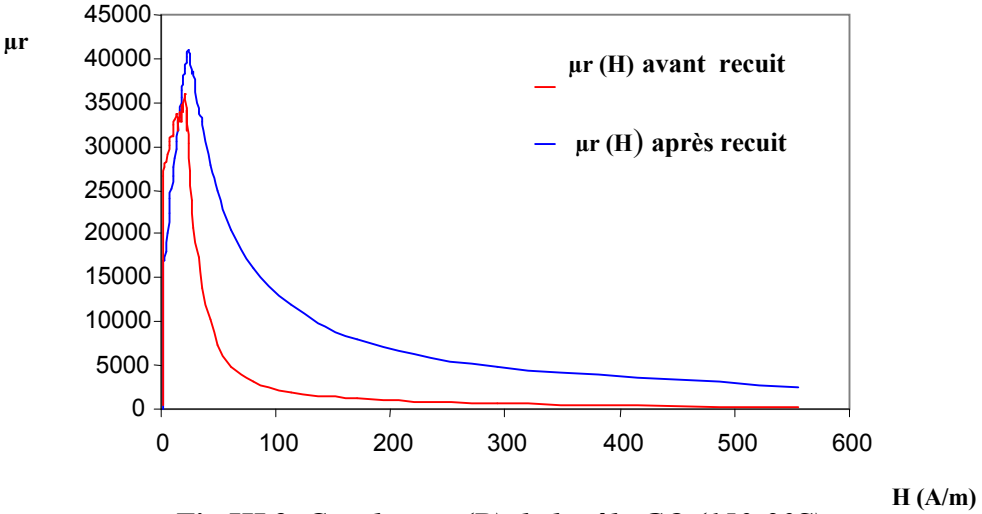


Fig.III.9. Courbes µr (B) de la tôle GO (150-30S) avant et après recuit.

III.4.2. Caractéristiques initiales de la tôle NO (M 530- 50A)

Qualité de tôle	Epaisseur nominale (en mm)	Pertes spécifiques maximales $W.Kg^{-1}$ pour $\hat{B} = 1T$	Pertes spécifiques maximales (en $W.Kg^{-1}$) pour $\hat{B} = 1{,}5T$	Induction minimale (enT) pour champ $\hat{H}$ en A. m^{-1}		
				2500	5000	10000
Echantillon B	0,5	1,60	3,19	1,84	1,93	2
Echantillon C	0,5	1 ,90	4,18	1,6	1,69	1 ,78
Echantillon D	0,5	2,26	4,78	1,55	1,63	1,75

Tableau (5) : Caractéristiques de la tôle NO (M530- 50A).

Ces caractéristiques initiales sont représentées par les courbes B(H), P_S (B), μ_r (H) suivantes :

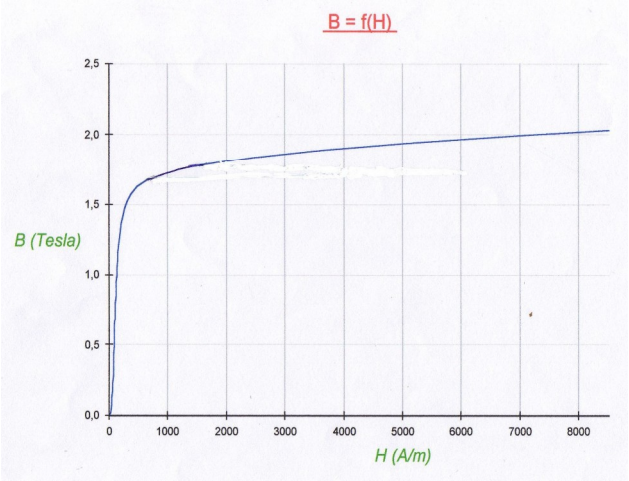


Fig.III.10.Courbes B (H) de la tôle NO (530-50A).

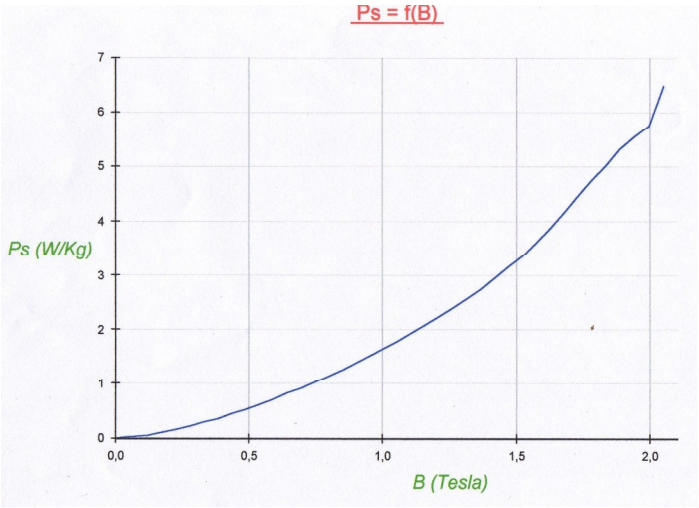


Fig.III.11.Courbes Ps (B) de la tôle NO (M530-50A).

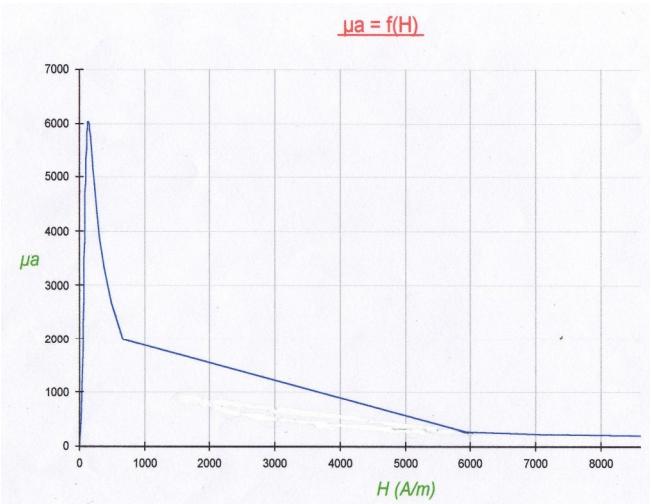


Fig.III.12.Courbes μr (H) de la tôle NO (M530-50A).

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
2,052	9550	6,48	171
1,9996	7050	5,75	225,3
1,94	5152	5,54	299,7
1,886	3592	5,32	417,8
1,833	2415	5,013	604
1,779	1555	4,74	910,4
1,729	900	4,45	1330
1,677	671,4	4,144	1988
1,624	483	3,864	2676
1,573	375,4	3,605	3334
1,521	310,6	3,37	3897
1,468	265,6	3,149	4398
1,416	235,3	2,947	4789
1,364	211,3	2,75	5137
1,313	193,6	2,571	5397
1,261	178,3	2,399	5628
1,209	166,3	2,235	5785
1,157	155,8	2,077	5910
1,105	147	1,929	5982
1,054	139,1	1,783	6030
1,002	132,3	1,644	6027
0,95	126,1	1,512	5995
0,898	120,5	1,382	5930
0,847	115,6	1,26	5831
0,795	111	1,139	5699
0,744	106,6	1,06	5554
0,692	102,6	0,916	5367
0,64	98,5	0,8121	5171
0,588	94,6	0,7109	4946
0,537	90,8	0,6161	4706
0,485	87	0,5244	4436
0,433	83,3	0,4394	4136
0,381	79,4	0,3585	3819
0,33	75,3	0,2839	3487
0,278	71	0,2149	3116
0,227	66,1	0,1538	2733
0,174	60,4	0,0999	2292
0,123	53,4	0,0564	1833
0,071	43,5	0,0242	1299
0,019	28,6	0,0057	528,7
0	1,8	0	0

Tableau (6) : Rapport de mesure de la tôle (M53-50A).

III.4.2.1. Mesure de l'anisotropie

Les tôles laminées à froid présente une caractéristique intéressante liée à leur anisotropie magnétique, cette anisotropie caractérise leur aptitude plus au moins marquée à s'aimanter

dans une direction déterminée. La direction de laminage constitue la direction de facile aimantation, caractérisée par des pertes réduites, par rapport à l'aimantation dans la direction perpendiculaire.

Cette qualité de tôles est supposée isotrope. Les différents laminages qu'elle subit lui donnent une certaine anisotropie. Pour caractériser cette anisotropie, on utilise un facteur spécifique ; appelé facteur d'anisotropie et pour le déterminer ; on mesure les pertes pour une configuration utilisant des tôles découpées dans le sens de laminage« P_{SL} », puis on mesure les pertes pour une configuration utilisant des tôles découpées dans le sens transversal « P_{ST} » et ainsi on calcule le taux d'anisotropie F_a :

$$F_a = \frac{P_{ST} - P_{SL}}{P_{ST} + P_{SL}} \times 100 \text{ ; exprimé en (\%).}$$

Pour la tôle NO que nous avons :

$P_{ST} = 4{,}78 \ \text{W.K}\,g^{-1}$ et $P_{SL} = 4{,}18 \ \text{W.K}\,g^{-1}$; ce qui correspond à un taux d'anisotropie : $F_a \approx 6{,}7\,\%$

Le taux d'anisotropie calculé est inférieur à $10\,\%$ (le taux d'anisotropie caractérisant ce type de tôles), donc on peut conclure que la tôle NO (M530-50A) est de bonne qualité.

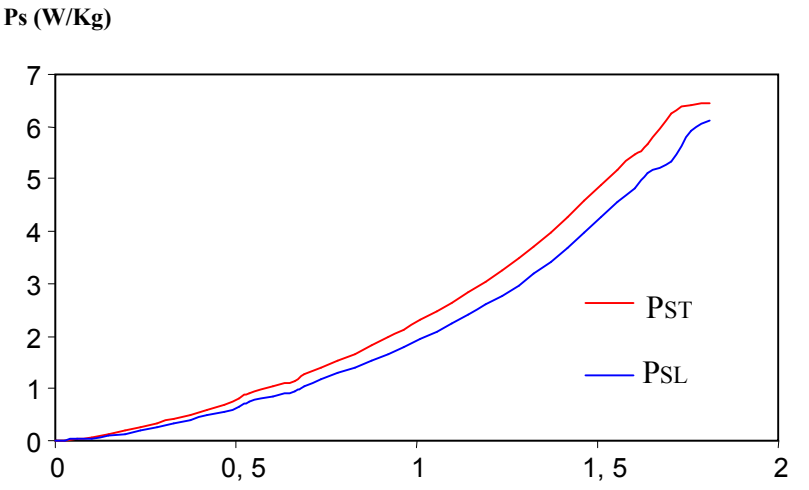


Fig.III.13.Courbes Ps (B) de la tôle NO (M530-50A) mesurées dans le sens de laminage et dans le sens transversal.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,796	10000	6,110	142,9
1,743	7370	5,930	188,2
1,693	5244	5,330	256,9
1,644	3609	5,110	362,5
1,596	2311	4,822	549,6
1,549	1416	4,557	870,5
1,501	877	4,267	1362
1,456	550,8	3,958	2104
1,410	375,9	3,682	2985
1,365	280,2	3,426	3877
1,319	220,4	3,191	4762
1,274	184	2,967	5510
1,229	158,3	2,777	6178
1,184	140,9	2,594	6687
1,139	126,2	2,420	7182
1,093	116,9	2,255	7440
1,048	108,2	2,099	7708
1,003	101,4	1,949	7871
0,958	99,1	1,804	7693
0,912	94,1	1,666	7712
0,869	92,8	1,538	7452
0,824	92,5	1,412	7089
0,779	88,3	1,289	7020
0,687	82	1,057	6667
0,642	80,8	0,9494	6323
0,597	77,6	0,8488	6122
0,552	75,5	0,7444	5818
0,507	72,3	0,648	5580
0,462	68,9	0,5593	5336
0,417	66,5	0,4747	4990
0,372	64	0,3945	4625
0,327	61,7	0,3207	4217
0,282	59,3	0,2533	3784
0,236	56,7	0,1906	3312
0,192	53,8	0,1339	2840
0,147	50,1	0,08480	2335
0,101	44,5	0,04570	1806
0,056	36,2	0,01920	1231
0,016	23	0,004000	553,6
0	1,1	0	0

Tableau (7) : Rapport de mesure de la tôle NO (M530-50A) découpées dans le sens de laminage.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,809	13900	6,45	103,6
1,757	10720	6,42	130,4
1,703	7920	6,25	171,1
1,753	5720	5,66	230
1,604	4007	5,47	318,5
1,557	2655	5,167	466,7
1,509	1699	4,888	706,8
1,462	1090	4,583	1067
1,416	744	4,278	10515
1,372	556,3	3,978	10963
1,326	448	3,714	20355
1,281	377,6	3,473	2700
1,235	329,5	3,248	2983
1,190	295,5	3,036	3205
1,144	268,4	2,838	3392
1,099	247,3	2,647	3536
1,055	230	2,472	3650
1,009	214,9	2,298	3736
0,964	201,1	2,132	3800
0,919	190,3	1,975	3843
0,873	180,3	1,820	3853
0,828	171,5	1,675	3842
0,782	163,1	1,534	3815
0,737	155,4	1,398	3774
0,691	148,4	1,269	3705
0,684	141,9	1,147	3628
0,602	135,6	1,027	3533
0,536	129,6	0,9133	3414
0,510	123,6	0,8034	3284
0,466	118,5	0,6989	3120
0,42	112,7	0,5988	2966
0,375	107,2	0,5038	2784
0,329	102,2	0,4139	2562
0,284	96,6	0,3302	2340
0,238	90,8	0,2526	2086
0,193	84,7	0,1819	1813
0,148	78	0,1208	1510
0,103	69,8	0,06830	1174
0,058	59	0,02910	782,3
0,030	39,9	0,006600	598,3
0,00	1,8	0	0

Tableau (8) : Rapport de mesure de la tôle GO (M530-50A) découpées dans le sens transversal.

III.5. Le vieillissement des tôles

Les essais de vieillissement des tôles (M150-30S) et (M530-50A) qu'a pu mettre à notre disposition le laboratoire de mesures de l'entreprise E.I sont : le vieillissement pendant vingt quatre heures et le vieillissement pendant sept jours à 225 ° c.

III.5.1. Essai de vieillissement pendant vingt quatre heures (24h)

On introduit l'échantillon A (après recuit de relaxation) et l'échantillon B, dans un four à moufle à $225^{\circ} c$ pendant 24h. Au bout de vingt quatre heures, on ressort les deux échantillons et on les laisse refroidir à la température ambiante, et on procède à la mesure des pertes spécifiques et de l'induction magnétiques.

a) : pour l'échantillon A

Après vingt quatre heures de vieillissement on obtient :

$P_{1,5} = 0,89 \ W.Kg^{-1}$

$P_{1,7} = 1,32 \ W.Kg^{-1}$

$B_{800} = 1,84T$

b) : pour l'échantillon B

Après vingt quatre heures de vieillissement on refait la pesée des tôles NO et on obtient :

$M_a = 0,8619Kg$ A= 1,1908 cm^2

$P_1 = 2,59$ W.K g^{-1} $B_{2,5} = 1,83T$

$P_{1,5} = 4,98 \ W.Kg^{-1}$ $B_5 = 1,93T$

$B_{10} = 2,06T$

2,5, 5 et 10 sont les champs magnétiques en KA. m^{-1} .

III.5.2.Essai de vieillissement pendant sept jours

De même, on introduit l'échantillon A (avec recuit) et l'échantillon B dans un four à moufle à $225^{\circ} c$ pendant sept jours. Au bout de sept jours, on ressort les deux échantillons et on les laisse refroidir à la température ambiante et on mesure de nouveau les pertes spécifiques et l'induction magnétique.

a) : pour l'échantillon A

$P_{1,5} = 0,9$ W.K g^{-1}

$P_{1,7} = 1,34$ W.K g^{-1}

$B_{800} = 1,84T$

b) : pour l'échantillon B

Après sept jours de vieillissement, on refait la pesée des tôles et on obtient :

$M_a = 0,8623Kg$ A=1,1913 cm^2

$P_1 = 2,64\ W.Kg^{-1}$ $B_{2,5} = 1,83T$

$P_{1,5} = 5,06\ W.Kg^{-1}$ $B_5 = 1,93T$

$B_{10} = 2,06T$

2,5, 5 et 10 sont les champs magnétiques en KA. m^{-1}.

III.6. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont donnés sous forme de tableaux et des courbes, sur les tableaux on peut lire les valeurs de l'induction magnétique et de la perméabilité relative en fonction du champ d'excitation, ainsi que les valeurs des pertes spécifiques en fonction de l'induction.

Les courbes obtenues : B (H), μ (H), et P_S (B) nous donnent les caractéristiques et les propriétés magnétiques des deux types de tôles GO et NO :

Pour la courbe de première aimantation, on voit que l'application d'un champ magnétique régulièrement croissant provoque l'apparition d'une induction magnétique croissante jusqu'à une valeur maximale qui correspond à l'état de saturation. Cette courbe est caractérisée par trois régions :

- Une région linéaire où les champs sont faibles.
- Une région non linéaire de champs moyens.
- Une région dite proche de saturation où les champs sont forts.

Pour la courbe de la perméabilité relative, on peut distinguer deux régions ; une région linéaire proportionnelle au champ d'excitation et croissante jusqu'à une valeur maximale, et une région non linéaire décroissante d'une manière exponentielle.

Pour la courbe des pertes spécifiques, la variation est donnée en fonction de l'induction, elle suit une loi parabolique, ce qui confirme la théorie (les pertes spécifiques à une fréquence fixe sont proportionnelles au carré de l'induction).

III.6.1. Interprétation des résultats obtenus avant et après vieillissement

Le tableau (3) qui suit représente les caractéristiques magnétiques des tôles (M150-30S) et (M530-50A) avant et après vieillissement :

Caractéristiques magnétiques	Avant vieillissement	Vieillissement pendant 24h	Vieillissement pendant 7jours
$P_{S1,7}(W.Kg^{-1})$ M150- 30S	1,3	1,32	1,34
$P_{S1,5}(W.Kg^{-1})$ M530- 50A	3,19	4,98	5,06
Perméabilité relative maximale (M150-30S)	41070	41240	37640
Perméabilité relative maximale (M530- 50A)	6030	4103	3975

Tableau (9) : Caractéristiques magnétiques des tôles GO et NO avant et après vieillissement.

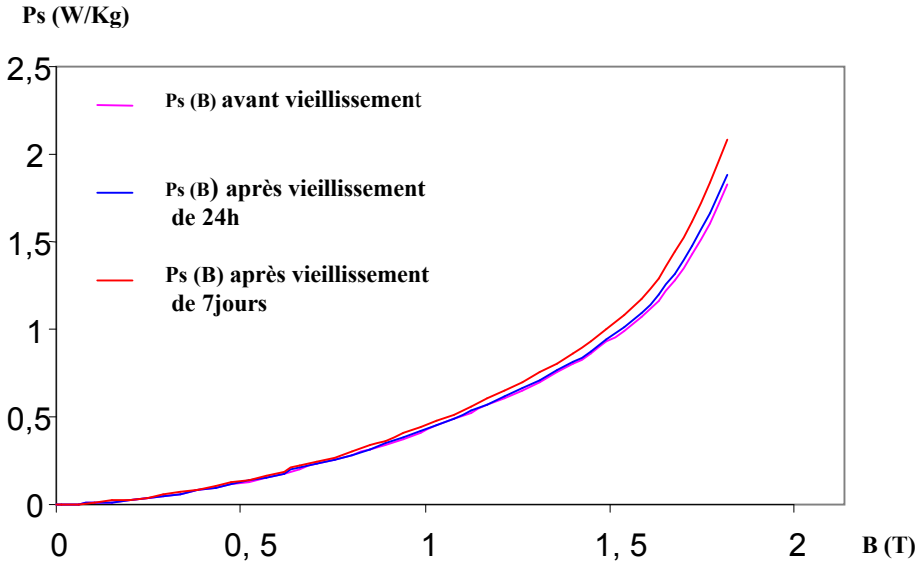


Fig.III.14.Courbes Ps (B) de la tôle GO (M150-30S) avant vieillissement, après 24h de vieillissement et après 7jours de vieillissement.

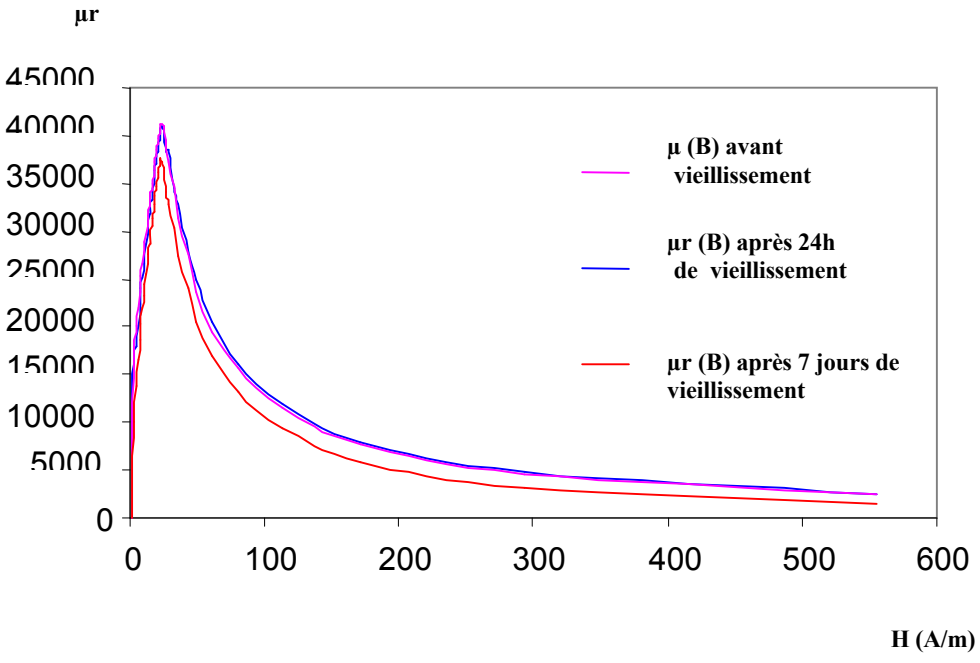


Fig.III.15.Courbes µr (B) de la tôle GO (M150-30S) avant vieillissement, après vieillissement de 24h et après vieillissement de 7jours.

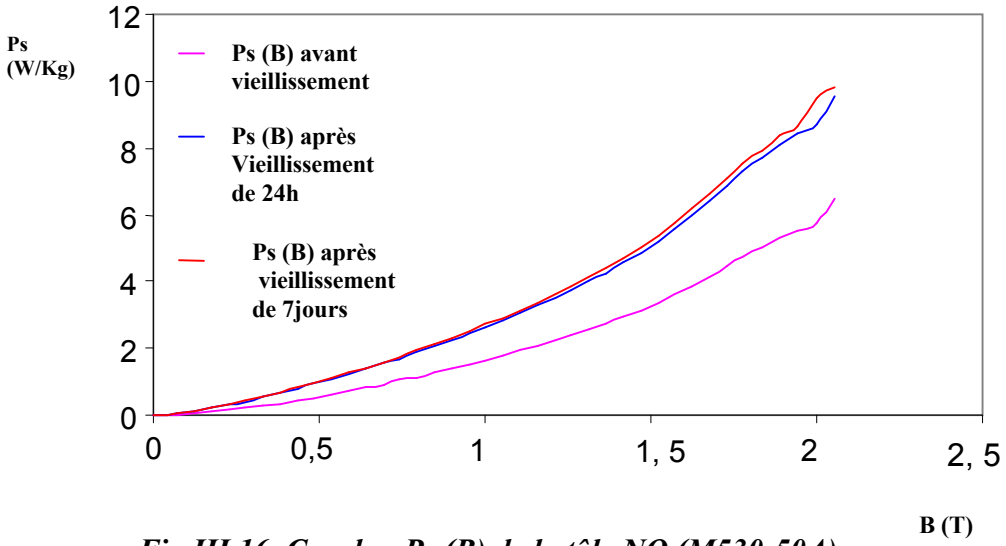


Fig.III.16. Courbes Ps (B) de la tôle NO (M530-50A) avant vieillissement, après vieillissement de 24h et après vieillissement de 7jours.

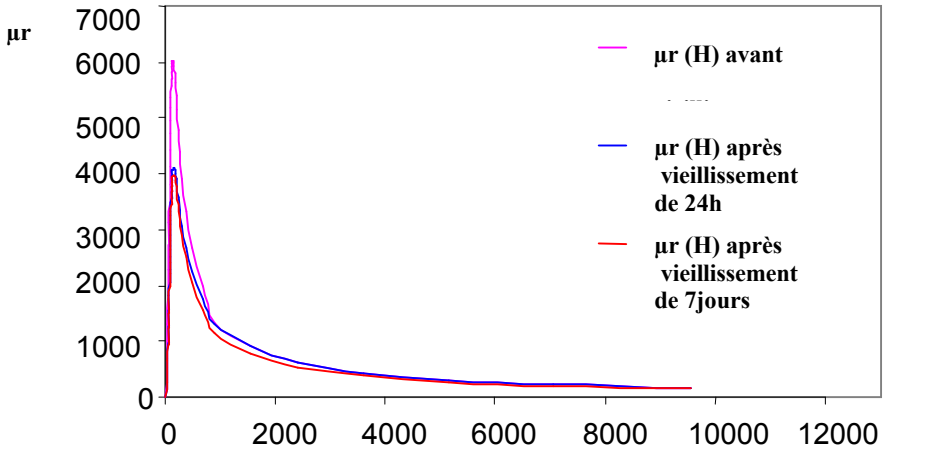


Fig.III.17.Courbes µr (H) de la tôle NO (M530-50A) avant vieillissement, après 24h de vieillissement et après 7jours de vieillissement.

Et comparant les pertes spécifiques et la perméabilité maximale pour ces tôles, avant et après vieillissement, on remarque une augmentation légère de pertes pendant vingt quatre heures de vieillissement, mais pendant une semaine de vieillissement, on peut dire que les pertes sont stables puisque ces tôles n'ont pas continuer de vieillir, de plus les pertes spécifiques obtenues ne dépassent pas les pertes spécifiques normalisées pour les deux types de tôles qui sont : 1,5 W.K g^{-1} pour la (M150- 30S) et 5,3 W.K g^{-1} pour la (530- 50A). De même pour leur la perméabilité relative maximale des deux types de tôles ; on remarque qu'une légère diminution par rapport à la valeur maximale obtenue avant vieillissement.

Avec la tôle GO, on obtient une induction magnétique à saturation de grand module dans un champ d'excitation très réduit et possède une grande perméabilité, ce qui confirme que cette tôle qui possède une bonne texture et une épaisseur réduite qu'elle est plus performante que la tôle NO. A part que, la tôle GO est destinée pour transformateurs et la tôle NO pour moteurs.

III.6.2. Conclusion

Les pertes du circuit magnétique des machines tournantes sont en général plus élevées que les pertes qu'on calcule à partir des caractéristiques de la tôle mesurées au cadre Epstein, ce dernier n'est pas représentatif de ce qui se passe réellement dans une machine tournante. Pour déterminer les pertes réelles, il faut tenir compte de plusieurs facteurs :

- Les contraintes résiduelles après découpage, la pression de serrage des paquets de tôles, une isolation imparfaite entre tôles.
- L'anisotropie des tôles, c'est-à-dire les différences des propriétés entre les directions parallèles et perpendiculaires à la direction de laminage, tel que la variation de l'induction due à l'anisotropie est à l'origine de courants parasites qui entraînent des pertes.
- Dans une partie importante du stator d'une machine tournante, on trouve des champs magnétiques tournants, qui ont leur origine les dents. Dans les transformateurs triphasés la polarisation magnétique ne reste alignée parallèle à la direction de laminage que dans les trois colonnes, les deux culasses de fermeture de flux sont soumises une polarisation magnétique inhomogène.

Le vieillissement sous une température de $225c^{\circ}$ pendant vingt quatre heures et pendant sept jours ne représente pas un vieillissement réel. Pour tester les caractéristiques et les performances des tôles, il faut les soumettre aux conditions réelles, c'est-à-dire qu'on aimante

et on désaimante le circuit magnétique de tôles sous un champ alternatif et aux températures variables pendant plusieurs années.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,82	585,6	1,882	2473
1,773	310,3	1,668	4547
1,725	177,3	1,476	7742
1,679	115,7	1,0324	11550
1,633	831	1,199	15640
1,587	64,6	1,096	19550
1,54	51,6	1,013	23750
1,495	43	0,9412	27670
1,448	36,8	0,8765	31310
1,402	32,2	0,8182	34650
1,356	28,9	0,7645	37340
1,309	26,3	0,7123	39610
1,263	24,5	0,6636	41020
1,218	23,5	0,6174	41240
1,171	22,6	0,5721	41230
1,125	22	0,5304	40690
1,079	21,4	0,49	40120
1,032	20,7	0,4509	39670
0,986	20,1	0,4147	39040
0,94	19,4	0,3802	38560
0,893	18,8	0,3467	37800
0,847	18,1	0,3145	37240
0,802	17,5	0,2843	36470
0,756	16,8	0,2561	35810
0,709	16,1	0,2292	35040
0,662	15,3	0,2036	34430
0,617	14,6	0,1799	33630
0,569	13,9	0,1569	32580
0,523	13,2	0,1353	31530
0,477	12,4	0,1155	30610
0,43	11,5	0,0964	29750
0,384	10,6	0,0794	28830
0,339	9,7	0,0638	27810
0,291	8,7	0,0495	26620
0,245	7,7	0,0371	25320
0,199	6,7	0,0263	23640
0,152	5,5	0,0171	21990
0,106	4,2	0,0099	20080
0,06	2,9	0,0046	16460
0,014	1,5	0,0012	7427
0	6	0	0

Tableau (10) : Rapport de mesure de la tôle GO (M150-30) après recuit et vieillissement de 24h.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
2,046	9230	9,57	176,4
1,992	6902	8,69	229,7
1,937	5058	8,42	304,7
1,882	3559	8,12	420,8
1,829	2407	7,69	604,7
1,776	1569	7,29	900,8
1,724	1,062	6,85	1292
1,672	753	6,4	1767
1,621	573,5	5,953	2249
1,569	465,2	5,555	2684
1,518	396,6	5,195	3046
1,466	348,8	4,865	3345
1,414	313,5	4,558	3589
1,363	287,2	4,268	3777
1,312	266,9	4,003	3912
1,26	250,2	3,749	4007
1,209	235,8	3,505	4080
1,157	224,6	3,274	4099
1,106	214,5	3,054	4103
1,054	205,6	2,836	4079
1,002	197,7	2,63	4033
0,95	190,4	2,43	3971
0,899	184,2	2,241	3884
0,848	178,2	2,058	3787
0,795	172,5	1,877	3667
0,743	166,9	1,702	3543
0,691	161,9	1,536	3396
0,64	156,8	1,376	3248
0,588	151,9	1,218	3080
0,536	147,5	1,066	2898
0,484	142,3	0,9234	2707
0,433	137,6	0,7874	2504
0,381	132,6	0,6554	2286
0,329	127,3	0,5305	2057
0,278	121,8	0,4147	1816
0,226	115,6	0,3076	1556
0,174	108	0,2086	1282
0,122	98,3	0,1228	987,6
0,071	83,8	0,0553	674,2
0,019	57,7	0,0121	262
0	0,5	0	0

Tableau (11) : Rapport de mesure de la tôle NO (M530-50A) après 24h de vieillissement.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
1,852	957	2,076	1540
1,805	448,9	1,838	3200
1,756	238,8	1,615	5852
1,709	145,3	1,439	9360
1,661	100,3	1,293	13180
1,614	75,6	1,173	16990
1,568	60,6	1,077	20590
1,521	50,4	0,9973	24020
1,475	42,9	0,9267	27360
1,427	37,3	0,8619	30440
1,381	33,5	0,8044	32800
1,334	31,1	0,7511	34130
1,286	28	0,6976	36550
1,239	26,4	0,6492	37350
1,192	25,2	0,6026	37640
1,146	24,4	0,5587	37380
1,099	23,7	0,5155	36900
1,052	23,1	0,4757	36240
1,005	22,5	0,44	35540
0,957	21,9	0,4038	34770
0,911	21,1	0,3661	34360
0,863	10,4	0,3329	33660
0,816	19,7	0,3005	32960
0,769	19,1	0,2713	32040
0,722	18,3	0,2424	31400
0,674	17,6	0,2155	30470
0,627	16,8	0,1906	29700
0,58	16,1	0,1681	28670
0,533	15,4	0,1444	27540
0,485	14,5	0,1223	26620
0,439	13,7	0,1031	25500
0,392	12,7	0,0853	24560
0,344	11,8	0,0684	23200
0,297	10,8	0,0534	21880
0,25	9,8	0,04	20300
0,203	8,7	0,0286	18570
0,155	7,5	0,0187	16450
0,108	6,2	0,0109	13860
0,061	4,8	0,0051	10110
0,014	3,7	0,0014	3011
0	2,6	0,001	0

Tableau (12) : Rapport de mesure de la tôle GO (150-30S) après recuit et 7 jours de vieillissement.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	µr
2,066	10270	9,82	160,1
2,01	7860	9,49	203,5
1,955	5625	8,66	276,6
1,9	4022	8,37	375,9
1,846	2736	7,94	536,9
1,792	1826	7,54	781
1,74	1212	7,1	1142
1,687	852	6,63	1576
1,636	631,1	6,175	2063
1,583	501,6	5,757	2511
1,531	422,2	5,375	2886
1,479	368,4	5,028	3195
1,427	330,2	4,709	3439
1,375	301,5	4,412	3629
1,323	278,9	4,131	3775
1,271	260,6	3,866	3881
1,219	245,9	3,617	3945
1,167	233,7	3,374	3974
1,114	223	3,145	3975
1,063	213,8	2,925	3957
1,011	205,6	2,712	3913
0,959	198,1	2,508	3852
0,907	191,2	2,311	3775
0,855	184,9	2,121	3680
0,802	179,1	1,934	3563
0,75	173,5	1,755	3440
0,698	168	1,582	3306
0,646	163	1,417	3154
0,593	158	1,258	2987
0,541	153,1	1,102	2812
0,489	148,1	0,9539	2628
0,436	143,1	0,8105	2425
0,384	138	0,6752	2214
0,332	132,6	0,5477	1992
0,28	127	0,4275	1754
0,228	120,7	0,3165	1503
0,276	112,9	0,2154	1241
0,123	102,8	0,1265	952,1
0,071	87,8	0,0564	643,5
0,019	60,5	0,012	249,9
0	2,5	0	0

Tableau (13) : Rapport de mesure de la tôle NO (530-50A) après 7jours de vieillissement.

Conclusion générale :

L'élaboration de tôles magnétiques aux qualités toujours améliorées demeure le souci majeur de l'ingénieur électrotechnicien, c'est-à-dire la recherche d'une aimantation facile caractérisée par une induction élevée obtenue en champ faible avec des pertes réduites. Des progrès sont constamment réalisés dans le but de la compréhension du processus physique d'aimantation et des techniques d'élaboration en métallurgie de plus en plus perfectionnées et soignées.

La demande des constructeurs électriciens s'oriente essentiellement vers des tôles ayant une bonne perméabilité et une induction crête élevée, car plus les dimensions de la machine sont réduites, plus les pertes sont difficiles à évacuer. Les producteurs doivent donc soigner le rendement de la machine, d'autant plus qu'elle est de grande puissance, non seulement puisque l'énergie perdue coûte cher, mais aussi parce que l'échauffement qu'en résulte entraîne un vieillissement accéléré de toute la machine, en particulier de ses isolants, cela peut aller jusqu'à la destruction de l'équipement.

Bibliographie

[1] **P. Robert,**
«Matériaux de l'électrotechnique»,
Edition Dunod, Paris 1979.

[2] **Mr. M. Imache,**
«Etude de la technologie et des caractéristiques de l'alliage magnétique fer silicium»,
Mémoire de majester, UMMTO, 2001.

[3] **C. Kittel,**
« Introduction à la physique de l'état solide»,
Edition Dunod, Paris, 1972.

[4] **J-L. Dalmasso,**
«Cours d'électrotechnique»,
2, traitement de l'énergie électrique
Technique supérieure, France, 1984.

[5] **G.Berttoti,**
«General properties of power losses in soft ferromagnetic materials»,
IEEE Trans. On Magn, Vol.24, N°1 pp 621-630,1988.

[6] **Pierre Brissonneau,**
«Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechniques»
Edition Hermès, Paris 1997.

[7] «Informations générales sur les tôles magnétiques à grains orientés»
Document d'entreprise commerciale ; THYSSEN GRILLO FUNKE, Edition 1980.

[8] **J.L. Porteseil, O. Geoffroy,**
«Les matériaux doux pour l'électrotechnique basse fréquence»
Presse universitaire de Grenoble 1999.

[9] **P. Brissonneau,**
«Matériaux magnétiques pour l'électrotechnique»
Ecole nationale supérieure d'ingénieurs électriciens de Grenoble 1984- 1985.

[10] **Document des références normatives européenne de l'entreprise E.N.E.L,**
«Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein»