REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique



En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique Option : Réseaux Electriques

Thème

Caractérisation des tôles magnétiques utilisées dans la construction des machines électriques.

Présenté par :

Dirigé par :

Mr. Imache Mohamed

Bendif Nadia Boudissa Malika Saidani Kanza



Sommaire

Chapitre I

| Notions générales sur le magnétisme | | | | | |
|--|----|--|--|--|--|
| I.1. Définition des grandeurs magnétiques | | | | | |
| | | | | | |
| I.1.1. Champ magnétique | 3 | | | | |
| I.1.2. L'induction magnétique | 3 | | | | |
| I.1.3. Le flux d'induction magnétique | 3 | | | | |
| I.1.4. L'aimantation | 4 | | | | |
| I.1.5. La polarisation | 4 | | | | |
| I.1.6. Relation entre B, H et M | 4 | | | | |
| I.1.7. La susceptibilité magnétique | 4 | | | | |
| I.1.8. La perméabilité magnétique | 5 | | | | |
| I.1.9.Le moment magnétique atomique | 5 | | | | |
| | | | | | |
| I.2. Les différentes formes de magnétisme | 6 | | | | |
| I.2.1.Diamagnétisme | 6 | | | | |
| I.2.2.Le paramagnétisme | 6 | | | | |
| I.2.3.Le ferromagnétisme | 7 | | | | |
| | | | | | |
| I.4. Etude du ferromagnétisme | 8 | | | | |
| I.4.1.Domaines magnétiques | 8 | | | | |
| I.4.2.Origine des domaines | 8 | | | | |
| I.4.2 .1.L'énergie d'échange | 9 | | | | |
| I.4.2.2.L'énergie d'anisotropie | 9 | | | | |
| I.4.2.3.Energie magnétostatique | 9 | | | | |
| I.4.2.4. Energie magnétostrictive | 10 | | | | |
| I.4.3.Champ moléculaire | 10 | | | | |
| I.4.4. Processus d'aimantation et courbe de première aimantation | 10 | | | | |
| I.4.5.Cycle d'hystérésis | 11 | | | | |

| I.5. Les pertes magnétiques | 12 |
|---|----|
| I.5.1.Les pertes par courant de Foucault | 12 |
| I.5.2.Les pertes par hystérésis | 13 |
| I.5.2.1.Evaluation des pertes selon la formule de Steinmetz | 13 |
| I.5.2.2.Evaluation des pertes selon la formule de Richter | 13 |
| I.5.3.Les pertes additionnelles (ou par excès) | 14 |
| I.5.3.1. Modèle statique de Bertotti | 14 |
| I.5.3.2. Modèle des domaines | 14 |

Chapitre II

Les alliages magnétiques doux conventionnels

| II.1. Introduction | 16 |
|--|----|
| II.2. Matériaux pour l'électrotechnique | 16 |
| II .3.Matériaux pour l'électrotechnique et l'électronique à fréquences | |
| élevées | 17 |
| II.4. L'alliage magnétique Fe-Si | 17 |
| II.4.1.Le fer, matériau magnétique de base | 17 |
| II.4.2 L'ajout de silicium, influence sur les propriétés physiques, | |
| métallurgiques et mécaniques | 17 |
| II.5. Action des impuretés sur les propriétés magnétiques | 19 |
| II.5.1.Les impuretés et les défauts mécaniques | 19 |
| II.5.2.Influence de l'ajout de silicium sur les impuretés | 19 |
| II.6. Les différentes qualités de tôles élaborées en métallurgie | 20 |
| II.6.1.Les tôles Fe-Si à grains non orientés (NO) | 20 |
| II.6.1.1.propriétés | 20 |
| II.6.1.2.Mode de fabrication | 21 |
| II.6.1.3.caractéristiques principales | 23 |
| II.6.2 .Les tôles Fe-Si à grains orientés (GO) | 24 |
| II.6.2.1. propriétés | 24 |
| II.6.2.2. Mode de fabrication | 25 |

| II.6.2.3.Caractéristiques principales | 25 |
|---------------------------------------|----|
| II.7. Isolation des tôles Fe-Si | 26 |

| II.8.Tôles spécifiques | 26 |
|---|----|
| II.8.1.Les tôles magnétiques à haute perméabilité | 27 |
| II.8.2. les tôles Fe-Si de faible épaisseur | 27 |
| II.8.3.Les tôles Fe-Si à fort % de Si | 29 |

Chapitre III Etude expérimentale

| III.1. Introduction | 30 |
|---|----|
| III.2. Description du banc d'essai | 30 |
| III.2.1. Cadre d'Epstein | 30 |
| III.2.2. Avantages du carde d'Epstein | 33 |
| III.2.3.Caractéristiques du cadre d'Epstein utilisé | 33 |
| III.3. Echantillons étudiées | 33 |
| III.4. Mesure des pertes par la méthode d'Epstein | 35 |
| III.4.1.Montage expérimental | 36 |
| III.4.2. Mode opératoire | 37 |
| III.4.2.1. Mesure de la perméabilité magnétique | |
| 37 | |
| III.4.2.2. Visualisation du cycle d'hystérésis à l'oscilloscope | 38 |
| III.5. Résultats expérimentaux | 38 |
| | |
| III.5.1. Echantillon 1 | 38 |
| III.5.2. Echantillon 2 | 43 |
| III.5.3. Echantillon 3 | 48 |
| | |
| III.6. Evaluation des pertes spécifiques | 54 |

| III.6.1. Mesure des pertes par la méthode du wattmètre | | | | |
|--|----|--|--|--|
| | | | | |
| III.6.2. Calcul des pertes spécifiques à partir du cycle d'hystérésis | 55 | | | |
| III.7. Mesure du facteur d'anisotropie des tôles magnétiques non orientées | 56 | | | |
| Conclusion générale | 58 | | | |

Introduction générale

Le magnétisme est un phénomène physique par lequel se manifestent des forces attractives ou répulsives d'un objet sur un autre ou avec des charges électriques en mouvement.

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

Les propriétés intrinsèques d'un matériau sont la température d'ordre magnétique ou température de curie, l'aimantation spontanée et l'anisotropie magnétocristalline.

Les matériaux concernés par ces propriétés sont à base des éléments de transition Fe, Co, et Ni.

Une autre propriété essentielle est la coercitivité. Le champ coercitif représente l'intensité du champ magnétique appliqué dans la direction antiparallèle à l'aimantation et requis pour renverser celle-ci. A partir de la valeur de la coercitivité on distingue deux catégories de matériaux :

- Matériaux magnétiques durs :(grande coercitivité), destinés à la fabrication d'aimant permanant.
- Matériaux magnétiques doux : dont la propriété fondamentale est leur capacité à réagir à un champ magnétique extérieur de faible intensité.

Les matériaux doux équipent toute les machines électriques (transformateurs, moteurs). Ce choix réside dans leur efficacité à canaliser le flux magnétique.

Les matériaux doux sont utilisés dans divers types d'applications en électrotechnique et en électronique dans les domaines de l'énergie, l'information, les télécommunications... etc.

Les matériaux pour l'électrotechnique sont essentiellement des alliages fersilicium à environ 3% de silicium élaborés sous formes de tôles minces séparées par des couches isolantes.

> Tôles à grains orientés (GO) pour transformateurs.

> Tôles à grains nom orientés (NO) pour machines électriques tournantes.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire consiste précisément à mesurer les caractéristiques magnétiques (pertes et anisotropie) de quelques échantillons tôles Fer et Fe-Si (GO et NO).

Notre travail se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre rassemble les grandeurs principales du magnétisme ainsi que les relations théoriques relatives aux pertes magnétiques.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des principaux alliages magnétiques doux qui sont les alliages Fe-Co, Fe-Ni et Fe-Si. Nous nous intéressons ici particulièrement aux propriétés de l'alliage Fe-Si

Le troisième chapitre présentera le banc d'essai expérimental que nous avons utilisé pour caractériser les différents échantillons de tôles utilisées.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés les résultats auxquels nous avons abouti. On y donnera aussi les perspectives ouvertes par ce travail. Chapitre 1

Notions générales sur le magnétisme

I.1.Définition des grandeurs magnétiques

I.1.1. Champ magnétique

Un matériau de masse magnétique m, placé en un point p, subit une force F donnée par la loi de coulomb :

$$\overrightarrow{F} = \mathbf{m}.\mathbf{H}$$
(I-1)

La force F est une mesure directe du champ magnétique H dont l'unité est l'Ampère par mètre.

Si le champ est produit par un circuit électrique parcouru par un courant électrique I, l'ensemble des lignes de champ créées sont enlacées par ce circuit. Le théorème d'Ampère appliqué à une ligne de longueur l est donné par la relation suivante :

$$\oint_{c} H.dl = \sum_{k=1}^{N} I_{K} = NI$$
 (I-2)

N : étant le nombre de spires du circuit.

I.1.2. 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 donné par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$$
(I-3)

B est exprimé en tesla [T];

 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m: perméabilité absolue du vide.

I.1.3. Le flux d'induction magnétique

Soit un élément de surface ds. Si on lui applique un champ d'induction magnétique B dans la région où se trouve cet élément, alors le flux magnétique traversant cet élément est donné par :

$$d\Phi = \mathbf{B}. \, \mathbf{ds} \tag{I-4}$$

On dit du vecteur \overrightarrow{B} qu'il est à flux conservatif c'est-à-dire que le flux qui sort d'un pôle entre dans le pôle opposé. Ce qui se traduit par la loi de Gauss :

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0 \tag{I-5}$$

I.1.4. L'aimantation

On appelle aimantation magnétique la valeur du moment magnétique ampérien par unité de volume de la substance magnétique.

$$\overrightarrow{M} = \frac{\Sigma \overrightarrow{m}_{\mathcal{A}}}{V}$$
(I-6)

M : aimantation, en A/m ;

 m_A : moment magnétique ampérien, en $A.m^2$;

V : volume en m^3 .

I.1.5. La polarisation

On appelle polarisation magnétique, le moment magnétique dipolaire par unité de volume de la substance magnétique. Elle s'exprime en tesla et est définie par :

$$\stackrel{\bullet}{I=} \frac{\Sigma \overline{m_{id}}}{V}$$
 (I-7)

I : polarisation exprimée en tesla (T) ;

 \vec{m}_{id} : le moment magnétique dipolaire ;

V : volume de la substance magnétique.

La polarisation et l'aimantation sont liées par :

$$\overrightarrow{I} = \mu_0 M$$
 (I-8)

I.1.6. Relation entre B, H et M

Un matériau soumis à une excitation magnétique H acquiert une aimantation M. Son induction magnétique B s'exprime alors par :

I.1.7. La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique absolue caractérise le comportement magnétique d'une substance. Elle est définie par le rapport :

$$\chi = \frac{I}{H} \qquad (H/m) \qquad (I-10)$$

La susceptibilité magnétique relative χ_r est définie par :

$$\chi_r = \frac{M}{H}$$
 (sans unité) (I-11)

I.1.8. La perméabilité magnétique

On appelle perméabilité magnétique absolue μ la grandeur :

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \chi_r \right) \tag{I-12}$$

La perméabilité magnétique relative μ_r est définie par :

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \tag{I-13}$$

Les grandeurs μ_r et χ_r sont liées par la relation suivante :

$$\mu_r = 1 + \chi_r \tag{I-14}$$

I.1.9. Le moment magnétique atomique

Le moment magnétique atomique résulte des mouvements des électrons autour du noyau atomique et qui en même temps tournent sur eux-mêmes (Figure I-1).



Figure I.1. Mouvement de l'électron dans un atome.

La rotation de l'électron autour du noyau provoque un moment magnétique orbital $M_{L,}$ qui est défini par :

$$\overrightarrow{M}_{L} = \frac{e}{m_{e}} \overrightarrow{L}_{tot}$$
(I-15)

Avec: $\vec{L}_{tot} = \sum_{i} \vec{L}_{i}$

où :

e : charge de l'électron, e = 1.6 10^{-19} C ; m_e : masse de l'électron, m_e = 9 10^{-31} kg. \overrightarrow{L}_{tot} : est le moment cinétique orbital de l'atome.

La rotation de l'électron sur lui-même provoque un moment de spin M_{S_s} qui est défini par :

$$\dot{M}_{\rm S} = \frac{\sigma}{2m_{\sigma}} \vec{S}_{\rm tot}$$
 (I-16)

Avec: $S_{tot} = \sum_{i}^{i} S_{i}$

 \vec{S}_{tot} : le moment cinétique de spin de l'atome.

Le moment magnétique résultant est la somme des deux moments :

$$\overrightarrow{M} = \overrightarrow{M_L} + \overrightarrow{M_S}$$
 (I-17)

I.2. Les différentes formes de magnétisme

I.2.1. Diamagnétisme

Le diamagnétisme est dû au mouvement orbital des électrons provoqué par le champ magnétique appliqué, ce mouvement peut être assimilé à un courant induit. En vertu de la loi de Lenz ce courant induit s'oppose au champ qui le produit, en créant une aimantation négative. La susceptibilité diamagnétique est petite, négative, de l'ordre de 10^{-5} .

I.2.2.Le paramagnétisme

Le paramagnétisme se manifeste dans certaines substances dont les couches électroniques sont incomplètes d'électrons, chaque atome de ces substances porte un moment magnétique permanent, ces moments magnétiques sont indépendants les uns des autres. La susceptibilité paramagnétique est petite mais positive comprise entre 10^{-6} et 10^{-3} .

Pour la majorité des corps paramagnétiques, la susceptibilité relative varie en raison inverse de la température. Elle obéit à la loi de Curie suivante :

$$\chi_{\rm r} = \frac{C}{T} \tag{I.18}$$

Avec :

C : constante de Curie ;

T : température absolue.

I.2.3. Le ferromagnétisme

Le ferromagnétisme se distingue des corps précédents par l'alignement de ses moments magnétiques permanents. Ces moments étant orientés parallèlement les uns aux autres par une interaction mutuelle appelée couplage ferromagnétique. Les matériaux ferromagnétiques présentent donc une polarisation spontanée. Ils ont aussi une température de Curie au dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques, leur susceptibilité suit alors la loi de Curie-Weiss.

$$\chi_r = \frac{C}{T - T_c} \tag{I-19}$$

T_c : température de Curie.



Figure I.2. Variation de l'aimantation en fonction de la température.

Dans le tableau I.1 sont indiqués quelques exemples de matériaux représentatifs ainsi que les valeurs typiques de leurs susceptibilités.

| Type de matériaux | Susceptibilité magnétique relative | Exemples |
|-------------------|-------------------------------------|---------------|
| Diamagnétique | $= -10^{-5}$ | Cu-C |
| Paramagnétique | 10 ⁻⁵ à 10 ⁻³ | Al, Pt |
| Ferrimagnétique | ≈ 3000 | FeO, MnO, ZnO |
| Ferromagnétique | 50 à 10000 | Fe, Ni, Co |

Tableau I.1 : Matériaux typiques et leurs susceptibilités

I.4. Etude du ferromagnétique

I.4.1.Domaines magnétiques

Pierre Weiss a émis en 1907 l'hypothèse qu'une substance ferromagnétique était divisée en régions spontanément aimantées à saturation. Ces régions appelées domaines magnétiques ou domaines de Weiss, sont de dimensions réduites, à l'intérieur desquelles les moments magnétiques sont alignés parallèlement les uns aux autres. Ces domaines différent par l'orientation de la polarisation magnétique de chacun d'eux, de telle sorte que l'aimantation moyenne de la substance soit nulle. Entre deux domaines, il existe une zone de transition appelée paroi de Bloch, dans laquelle l'orientation de l'aimantation change progressivement de sens (figure I.3).



Figure I.3. Structure en domaines d'un ferromagnétique.

I.4.2.Origine des domaines

L'existence des domaines s'explique par l'établissement d'un état dans lequel la somme des énergies créées par ce phénomène est minimale. L'énergie interne W_{int} associée à la structure en domaines est donnée par :

$$\mathbf{W}_{\text{int}} = \mathbf{W}_{\text{ec}} + \mathbf{W}_{\text{mt}} + \mathbf{W}_{\text{ms}} + \mathbf{W}_{\text{an}}$$

Avec :

 W_{ec} : énergie d'échange ;

W_{an}: énergie d'anisotropie magnéto-cristalline ;

W_{mt}: énergie magnétostrictive ;

W_{ms}: énergie magnétostatique.

I.4.2.1.L'énergie d'échange

On appelle énergie d'échange, l'énergie résultant de l'interaction des moments magnétiques. Elle dépend de la distance séparant ces moments ainsi que de leurs orientations relatives. Cette énergie se calcule à l'échelle atomique, par la formule :

$$W_{\text{echange}} = -\sum_{IJ} A_{ij} . S_{I} . S_{J}$$
(I-20)

 A_{ij} : intégrale d'échange caractérisant l'importance de la population d'atomes voisins. Elle décroît très vite avec la distance entre les atomes i et j ;

 $\overrightarrow{S_{I}, S_{J}}$: les moments de spins des atomes i et j ; W_{ec} est minimale quand $\overrightarrow{S_{I}//S_{J}}$.

I.4.2.2.L'énergie d'anisotropie

Cette énergie caractérise la difficulté avec laquelle pivote l'aimantation vers la direction du champ d'excitation. Pour les cristaux cubiques cette énergie s'exprime par la relation :

$$\mathbf{W}_{an} = \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}\mathbf{1} \left(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2\right) + \mathbf{K}_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots$$
(I-21)

Où : α_i sont les cosinus directeurs qui caractérisent la position de vecteur polarisation spontanée par rapport aux axes de facile aimantation ;

K_i représentent les coefficients d'anisotropie.

I.4.2.3. Energie magnétostatique

Elle résulte des interactions entre chaque moment atomique et le champ local où est placé ce moment. Ce champ local est la combinaison du champ créé par les atomes voisins et du champ magnétique extérieur.

I.4.2.4. Energie magnétostrictive

C'est une énergie élastique associée aux déformations et 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.4.3.Champ moléculaire

Si une substance magnétique est capable d'aligner les moments magnétiques atomiques parallèlement les uns aux autres, alors on admet l'existence, à l'intérieur de la substance d'un champ interne appelé champ moléculaire ou champ de Weiss. Ce champ serait proportionnel au vecteur aimantation M

$$\overset{\bullet}{H}_{w} = \lambda \overset{\bullet}{M}$$
(I-22)

 λ : constante de proportionnalité.

I.4.4. Processus d'aimantation et courbe de première aimantation

Si on applique une excitation magnétique H croissante à un corps ferromagnétique, le processus d'aimantation évolue de la façon suivante :

Etape1: sans rotations des moments, les domaines pour lesquels l'orientation de l'excitation est la plus favorable sont privilégiés et se développent au détriment de ceux dont l'orientation est opposée. Il ya déplacement des parois des domaines. C'est cette phase qui est en général la cause essentielle des pertes, pour les matériaux usuels (tôles FeSi).

Etape2 : tous les moments sont maintenant alignés dans le même sens (on n'a plus qu'un seul domaine) mais qui n'est pas celui de l'excitation.



Etape3 : l'aimantation pivote pour s'aligné parallèlement avec le champ d'excitation.

Figure I.4. Structure en domaines d'une substance au cours du processus de polarisation.

Si on relève les évolutions de B en fonction de H, cela se traduit par la courbe suivante, appelée courbe de première aimantation (on part d'un matériau désaimanté et les évolutions de H doivent être très lentes).



Figure I.5.Courbe de 1ère aimantation.

Région (1) : déplacement des parois ;

Région (2) : coude de saturation ;

Région (3) : saturation (rotation des moments).

Il faut noter que l'on n'atteint la saturation que pour des valeurs très élevées de H (courants énormes à appliquer). L'aire comprise entre la courbe de première aimantation et l'axe des ordonnées représente l'énergie volumique nécessaire pour aimanter.

I.4.5.Cycle d'hystérésis

Lorsqu'on fait varier le champ d'excitation H entre deux limites symétriques +Hm et – Hm, on obtient une courbe appelée cycle d'hystérésis à l'intérieur de laquelle on trouve la courbe de première aimantation obtenue pour une variation du champ, de la valeur nulle à la valeur Hm, après plusieurs cycles, cette courbe est pratiquement fermée et symétrique. L'aire du cycle d'hystérésis représente l'énergie dépensée, par unité de volume de matériau, pour réorienter les moments magnétiques des domaines et déplacer les parois de Bloch, au cours d'un cycle complet de variation de champ magnétique extérieur. Cette énergie se dissipe sous forme de chaleur. Le cycle d'hystérésis est la courbe de réponse des matériaux magnétiques, à travers la quelle ils gardent la mémoire de tous leurs états d'aimantation antérieurs par l'intermédiaire de domaines élémentaires.



Figure I.6.cycle d'hystérésis B(H).

Les matériaux utilisés pour l'électrotechnique aux fréquences industrielles sont de type ferromagnétique, à cause de leur susceptibilité et aimantation à saturation élevées. Cette catégorie de matériaux se divise en deux classes : les matériaux magnétiques doux et les matériaux magnétiques durs (aimants permanents).

Les matériaux magnétiques doux peuvent être aimantés à l'aide de champs magnétiques faibles. Ils sont utilisés dans les machines électriques pour concentrer le flux magnétique. Les matériaux magnétiques durs conservent leur état d'aimantation initial et sont utilisés comme source de champ magnétique dans les machines électriques.

I.5.Les pertes magnétiques

Toute variation d'induction dans un matériau magnétique, subit des pertes énergétiques dissipées sous forme de chaleur non récupérable.

I.5.1.Les pertes par courant de Foucault

Les pertes par courant de Foucault sont dues aux courants induits qui se forment dans les masses métalliques des corps ferromagnétiques soumis à des champs d'induction variable. Ces courants provoquent une dissipation d'énergie et l'échauffement des matériaux.

$$P_{\text{Foucault}} = k_f B^2 f^2$$
 (I-23)

 k_f : coefficient de Foucault ;

B : induction magnétique ;

F : fréquence.

I.5.2.Les pertes par hystérésis

Elles sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois du Bloch en mouvement durant les processus d'aimantation et de désaimantation. Ces pertes correspondent au travail nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique.

$$W = \oint H dB \tag{I-24}$$

I.5.2.1. Evaluation des pertes selon la de formule Steinmetz

Les pertes représentent la somme de deux pertes : pertes par hystérésis et par courant de Foucault et sont données par :

Pertes = K' f Bⁿ_M +
$$\frac{K e^2 f^2 B_M^2}{\rho}$$
 (I-25)

Dans la formule (I.25), la première quantité représente les pertes par hystérésis et la deuxième représente les pertes par courants de Foucault

K et K' : coefficients de Steinmetz ;

n = 2 pour les tôles Fe-si ;

n = 1,6 pour les tôles fer ordinaire ;

 ρ : résistivité électrique ;

e : épaisseur de matériau ;

 B_M : induction de crête.

I.5.2.2. Evaluation des pertes selon la formule de Richter

L'expression de la puissance perdue par hystérésis est donnée par la relation suivante :

$$P_h = b v f B_m^2 + a v f B_m = v f (b B_m^2 + aB_m)$$
 (W)

Avec : a et b des constantes qui dépendent de la nature du matériau ;

f : fréquence et v le volume.

Pour $B_m \ge 1T$: $A_h = b{B_m}^2$

Ce qui implique la réduction de la formule de Richter : $P_h = b v f B_m^{2}$

En général on peut donner ces perte sous la forme globale donnée par l'équation (I.26).

$$\mathbf{P}_{\mathrm{h}} = \mathbf{k}_{\mathrm{h}} \mathbf{f} \mathbf{B}_{\mathrm{m}}^{2} \tag{I-26}$$

Où k_h est une constante qui dépend de la nature du matériau.

I.5.3.Les pertes additionnelles (ou par excès)

I.5.3.1. Modèle statique de Bertotti

G. Bertotti a défini une nouvelle entité physique grâce auquel s'inverse l'aimantation. En plus l'état magnétique d'un matériau sera caractérisé par le nombre d'objet magnétique, participant au processus d'aimantation. Pour une induction sinusoïdale, d'amplitude B_m et la fréquence f, les pertes par excès par cycle dans une tôle de section S sont exprimées par la relation suivante :

$$P_{ex} = \frac{8.8}{m_V} \sqrt{\frac{GH_0S}{\rho}} B_m^{1.5} f^{0.5} \quad (J/Kg)$$
 (I-27)

G: coefficient de frottement de l'objet magnétique (G=0,136 dans le cas ou l'objet magnétique correspond à une paroi entière) ;

 H_0 : est équivalent à un champ coercitif caractérisant la position de l'objet magnétique à s'activer;

m_v: masse volumique de la tôle.

I.5.3.2 Modèle des domaines

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

$$\eta = \frac{48}{\pi^3} \frac{2L}{e} \sum_{n \ge 1} \frac{1}{(2n-1)^3} \coth\left[(2n-1)\frac{\pi}{2} \frac{2L}{e}\right]$$
(I-28)

Si $\frac{2l}{\epsilon} < 1$ (domaine très étroit), on aura $\eta \approx 1$:Les pertes dynamiques se confondent aux pertes classiques.

Si $\frac{2l}{e} > 1$, On aura $\eta \approx 1.63$ ($\frac{2l}{e}$): les pertes dynamiques sont plus importantes que les pertes classique.



Figure I.7.structure des domaines d'une tôle en circuit fermé.

Chapitre 2

Les alliages magnétiques doux conventionnels

II.1. Introduction

Les deux critères pris en considération au niveau du matériau lors de la conception des machines électriques sont l'aimantation et les pertes magnétiques. Pour concevoir une machine électrique performante il faut disposer d'un matériau dont l'aimantation est importante pour une faible excitation et dont les pertes magnétiques sont faibles. Le matériau qui satisfait le mieux à ces critères 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. L'alliage Fe-Si appartient au groupe des matériaux magnétiques doux.

Les matériaux magnétiques doux sont définis comme ceux qui s'aimantent facilement et se désaimantent aussi facilement. Cette facilité d'aimantation signifie une perméabilité magnétique très élevée, un cycle d'hystérésis très étroit et donc un champ coercitif très réduit.

Ce sont des matériaux qui ne comportent que très peu de défauts dans leurs structures cristallines. Ils sont, de ce fait, largement utilisés dans les circuits magnétiques des transformateurs, moteurs, générateurs, disjoncteurs, relais etc.

II.2. Matériaux pour l'électrotechnique

A ce jour, le matériau le plus largement utilisé en électrotechnique est l'alliage fer-silicium élaboré sous forme de tôles minces. Celles-ci permettent dans des conditions économiques intéressantes de véhiculer des flux magnétiques importants. On les trouve à tous les niveaux de la production, du transport, de la distribution et de la transformation de l'énergie électrique. On distingue deux principales familles d'alliages qui sont destinées à des applications différentes.

La première est constituée par des tôles Fe-Si à grains orientés (GO) dont la texture dite de GOSS privilégie la direction de laminage comme direction de facile aimantation et qui sont utilisées dans les transformateurs dont lesquels le flux garde une direction fixe.

La deuxième est constituée par des tôles Fe-Si à grains non orientes (NO) destinées à la construction des machines tournantes.

II .3. Matériaux pour l'électrotechnique et l'électronique à fréquences élevées

Pour des applications à fréquences bien plus élevées que 50Hz, les alliages Fe-Si classiques ne peuvent être utilisés. Ils conduiraient à des pertes magnétiques et des échauffements inadmissibles. Il existe d'autres alliages magnétiques aux propriétés intéressantes. On peut citer les alliages fer-cobalt, les alliages fer-nickel de type permalloys (80% Ni), les poudres métalliques, les amorphes métalliques, les ferrites doux etc. Que l'on utilise sous des formes variées (massif, tôles, rubans, fils... etc.).

II.4. L'alliage magnétique Fe-Si

II.4.1. Le fer, matériau magnétique de base

Le fer pur est à priori un matériau de choix. Il possède une induction à saturation de 2,15T à la température ambiante, une température de Curie élevée 770°C et une structure cristalline de symétrie cubique. Cependant sa résistivité électrique à température ambiante est trop faible ($\approx 10^{-7} \Omega$ m). Son utilisation donnerait lieu à des pertes par courants de Foucault excessives. 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 pourcentages de silicium afin d'améliorer ses qualités.

II.4.2. Influence de silicium sur les propriétés du fer physiques, métallurgiques et mécaniques

Les alliages Fe-Si se présentent sous forme des tôles minces obtenues par laminage, empilées les unes sur les autres mais séparées par des couches isolantes. Si ce matériau constitue l'élément principal de toutes les machines électriques cela est dû à sa grande perméabilité magnétique obtenue sous champ relativement faible, ce qui conduit à des cycles d'hystérésis étroits et donc des pertes par hystérésis très réduites. De plus la présence de silicium dans le fer augmente considérablement la résistivité électrique de l'alliage ce qui implique une réduction des pertes par courants de Foucault.

D'autres avantages non négligeables sont dus à la présence de silicium dans le fer.

• Le premier est d'ordre mécanique : le Fe-Si se prête beaucoup plus facilement que le fer pur aux opérations de laminage quant il s'agit d'élaborer des tôles de faibles épaisseurs.

• Le deuxième avantage est d'ordre métallurgique. En effet, le fer pur passe de la structure α (cubique centrée) à la structure γ (cubique à faces centrées) à la température de 910°C. Cette transition complique énormément les traitements à température élevée.

La présence de silicium (à partir de $2\frac{9}{10}$) stabilise la phase α à toute température, autorisant ainsi toute une gamme de traitements métallurgiques sans transformation de phase (laminages, affinages, recristallisations etc.).

• Le troisième avantage est d'ordre électromagnétique : il s'agit de la constante k_1 d'anisotropie magnéto-cristalline à la température ambiante qui passe de 4,8.10⁴ J/m³ pour le fer pur à 3,4.10⁴ J/m³ pour l'alliage à 3,5% de Si.

• La présence de Si dans le fer présente cependant deux légers inconvénients puisque la polarisation à saturation et la température de Curie passent respectivement de 2,15 à 2T et de 770 à 760°C.

La figure (II-1) montre les effets de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques du fer.



Figure II.1. Effet de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques du fer à 20°C.

 J_{S} : polarisation à saturation ;

T_C: température de Curie ;

 ρ : résistivité électrique ;

k1: constante d'anisotropie magnéto-cristalline ;

 λ_{100} : coefficient de magnétostriction selon la direction de facile aimantation.

II.5. Action des impuretés sur les propriétés magnétiques

II.5.1. Les impuretés et les défauts mécaniques

Les aciers élaborés en métallurgie contiennent des impuretés que l'on doit supprimer ou du moins réduire. Les impuretés les plus nuisibles sont le carbone, l'azote, l'oxygène auxquelles s'ajoutent le soufre, le phosphore, le manganèse...etc. Leur présence dans le fer provoque l'apparition d'inclusions diverses sous forme de cémentite (Fe₃C), de nitrures(Fe₄N), d'oxydes de fer (FeO) et des composés(FeS). Ces dernières influent sur les caractéristiques mécaniques (allongement, résistance, dureté, ductilité et plasticité), et dégradent ainsi la perméabilité, abaissent la polarisation et freinent le déplacement des parois de Bloch, ce qui produit des échauffements et des pertes par hystérésis.



Figure .II.2. Impuretés dans le réseau cristallin du fer.

II.5.2.Influence de l'ajout de silicium sur les impuretés

Le silicium réagit chimiquement sur toute oxyde présent dans le fer, il réduit les impuretés oxygène et forme des silicates SiO_2 , le silicium provoque aussi la décomposition de la cémentite Fe₃C pour former du graphite SiC, qui est un carbone



Figure .II.3. Influence des concentrations de carbone et de silicium sur les pertes par hystérésis.

presque pur, le silicium réagit aussi avec l'azote pour former des composés Si $_3N$ moins nuisibles que les nitrures Fe₄N qui sont la cause essentielle du vieillissement magnétique.

II.6. Les différentes qualités de tôles élaborées en métallurgie

Les alliages fer silicium se divisent en deux grandes catégories suivant leur texture en grains orientés ou non.

II.6.1.Les tôles Fe Si à grains non orientés (NO)

II.6.1.1.propriétés

Il existe un large éventail de qualités qui diffèrent par :

• La teneur en silicium toujours inférieure à 3,5% limite au-delà de laquelle on ne peut plus laminer à froid.

• Le taux d'aluminium voisin de 0,3%.

• La teneur en impuretés (montant, nature, forme physique), qui traduit surtout les possibilités de l'aciérie, pour les qualités les plus performantes il faut pousser très loin l'épuration de la fonte.

• 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 joints de grains. D'autre part, les orientations des cristaux ne sont jamais exactement au hasard, à cause des opérations successives de laminage et de recuit.



Figure . II.4. Laminage à chaud des brames de métal.

II.6.1.2.Mode de fabrication [1]

Le mode de fabrication des tôles fer-silicium à grains non orientés est représenté sur le diagramme II.1.



II.6.1.3.caractéristiques principales [1]

Les principales caractéristiques des tôles à grains non orientées utilisées dans la construction des machines électriques sont consignées dans le tableau II.1.

| Tableau | II.1. | Caractéristiques | magnétiques | normalisées | de | quelques | qualités | de |
|------------|-------|------------------|-------------|-------------|----|----------|----------|----|
| tôles à gi | rains | non orientés. | | | | | | |

| | Epaisseur | Pertes | induction minimale | | | Utilisation | Dénomination |
|----------|-----------|-------------------|----------------------|------|-------|--------------|--------------|
| | nominale | spécifiques | (en T) pour un champ | | | principale | normalisée |
| | (mm) | maximales | $H (en A.m^{-1})$ | | | | |
| | | W.kg ⁺ | 2500 | 5000 | 10000 | | |
| | | pour | 2500 | 5000 | 10000 | | |
| | | (B=1,5T) | | 1 10 | | | |
| | 0,35 | 2,50 | 1,49 | 1,60 | 1,71 | grosses | Fev250-35 |
| | | | | | | machines | HA |
| | 0.50 | • = 0 | | 1 10 | | tournantes | |
| | 0,50 | 2,70 | 1,49 | 1,60 | 1,71 | grosses | Fev270- |
| | | | | | | machines | 50HA |
| Qualités | | | | | | tournantes | |
| fully- | 0,50 | 4,70 | 1,52 | 1,62 | 1,73 | moteurs de | Fev470- |
| process | | | | | | moyenne | 50HA |
| | | | | | | puissance | |
| | | | | | | petits | Fev600- |
| | 0,65 | 6,00 | 1,54 | 1,64 | 1,75 | moteurs | 65HA |
| | | | | | | relais | |
| | 0,65 | 8,00 | 1,58 | 1,68 | 1,76 | appareillage | |
| | | | | | | domestique | Fev800- |
| | | | | | | | 65HA |
| | 0,50 | 3,90 | 1,54 | 1,64 | 1,75 | moteurs de | Fev390-50HE |
| | | | | | | moyenne | |
| | | | | | | puissance | |
| Qualités | 0,50 | 6,60 | 1,60 | 1,70 | 1,80 | petits | Fev660- |
| semi- | | | | | | moteurs | 50HD |
| process | 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 |

II.6.2 .Les tôles Fe-Si à grains orientés (GO)

II.6.2.1. propriétés

- Elles possèdent une légère texture qui dépend aussi des impuretés qui jouent un rôle déterminant dans les processus de recristallisation.
- Dans ces tôles, les cristaux qui sont très gros et bien visibles ont pratiquement tous les mêmes orientations.
- La structure en domaines comprend de nombreuses parois de Bloch à 180° sensiblement parallèles à la direction de laminage ce qui entraîne des mécanismes d'aimantation facile et de faibles pertes.
- Toutes les tôles GO, sur le marché, quelque soit le fabriquant ont la même composition : du fer 3 à 3,2% de Si et le moins possible d'impuretés résiduelles.
- Avec moins de silicium, on aurait une résistivité plus faible et par conséquent de moins bonnes performances magnétiques.



Figure II.5. Direction idéale des grains cristallins dans une tôle GO.

II.6.2.2. Mode de fabrication [1]

Le mode de fabrication des tôles à grains orientés est représenté sur le diagramme II.2.



Diagramme II.2. Principe de fabrication de tôles magnétiques à grain orientés classiques.

II.6.2.3.Caractéristiques principales

Les principales caractéristiques magnétiques de quelques qualités de tôles à grains orientés qui différent par leurs épaisseurs, et l'acuité de leurs textures respectives sont consignées dans le tableau II2. Pour une épaisseur donnée, toute amélioration de la texture entraine une diminution sensible des pertes spécifiques et

une très légère amélioration de la polarisation J_{800} obtenue dans un champ d'excitation alternatif d'amplitude 800A/m qui sont données dans le tableau suivant [1]:

| | Epaisseur | Pertes | Puissance | Polarisation |
|---------------|--------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | nominale (en | spécifiques | apparente | J ₈₀₀ (en T) |
| | mm) | J=1,7T, 50Hz (en | spécifique | |
| | | W/Kg) | J=1,7T, 50Hz | |
| | | | (en VA/Kg) | |
| | 0,35 | 1,50 | 3,00 | 1,75 |
| Tôles | 0,30 | 1,25 | 2,70 | 1,84 |
| classiques | 0,23 | 1,07 | 2,60-2,70 | 1,84 |
| | 0,30 | 1,05 | 1,40 | 1,92 |
| Tôles à haute | 0,27 | 1,03 | 1,40 | 1,92 |
| perméabilité | 0,23 | 0,85 | 1,40 | 1,90 |

Tableau II.2. Caractéristiques de quelques tôles fer-silicium à grains orientés.

II.7. Isolation des tôles Fe-Si

Le revêtement isolant que reçoivent les tôles magnétiques à grains orientés conventionnelles provient de l'industrie des résines synthétiques. Ce sont des silicates de magnésium de 2 à 5 μ m d'épaisseurs élaborés dans l'industrie chimique.

Ces revêtements sont conçus pour résister à des températures de recuit pouvant aller jusqu'à 800 °C ainsi qu'aux huiles minérales chaudes des transformateurs.

L'isolation des tôles à grains non orientés s'effectue le plus souvent à l'aide d'oxyde de fer (Fe_2O_3), dans un four à haute température et sous atmosphère protectrice.
II.8. Tôles spécifiques

Il existe de nouveaux besoins en construction électriques, parmi ces besoins essentiels ; une grande aimantation sous un champ faible et la réduction des pertes, pour cela on a introduit de nouvelles technologies qui nous permettent d'avoir des tôles plus performantes.

II.8.1. Les tôles magnétiques à haute perméabilité

Les tôles magnétiques à haute perméabilité peuvent atteindre des inductions de prés de 2T sous un champ d'excitation de 800A/m et des pertes massiques sensiblement égales a 1W/kg pour des inductions de travail, de 1,7T.

Ces remarquables résultats sont dus à des procédés d'élaboration plus délicats et plus coûteux.

Ces techniques de perfection sont dues notamment à l'addition de nouveaux éléments d'alliage, comme l'aluminium, le cuivre ou l'étain ou le traitement par faisceau laser de la surface de la tôle.

A titre indicatif: pour une tôle de 0,30mm d'épaisseur, le constructeur garantit (norme CE, 404-8-7) : des pertes maximales de 1,05W/ kg sous une induction de 1,7T et une induction minimale de 1,92 T sous un champ de 800A/m.

II.8.2. les tôles Fe-Si de faible épaisseur [6]

Lorsque la fréquence de travail s'accroît (ce qui est le cas de beaucoup de dispositifs d'électronique et de l'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'épaisseur de tôle.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \,\mu \,\mathrm{f}}} \qquad (\mathrm{m}) \qquad (\mathrm{II-1})$$

 ρ : résistivité électrique ;

 μ : perméabilité magnétique ;

f : fréquence.

En général on choisit une épaisseur de tôle "e" voisine de l'épaisseur de peau, cette condition permet d'avoir une répartition sensiblement uniforme de l'induction magnétique à travers l'épaisseur de la tôle. Les tôles à faible épaisseur trouvent leurs applications dans les machines spéciales à grande vitesse fonctionnant aux fréquences allant de 400Hz à 10kHz. Les pertes spécifiques de ces tôles dépendent de la fréquence. Elles évoluent comme l'indique la figure II.6 qui représente les pertes en fonction de l'induction magnétique pour différentes fréquences.



Figure .II.6.Pertes spécifiques d'une tôle Fe-Si GO de 0,1mm d'épaisseur [1].

Les valeurs des pertes spécifiques pour quelques épaisseurs sont consignées dans le tableau II.3.

| Epaisseur | tôles Fe-Si GO | tôles Fe-Si NO | |
|-----------|-----------------------|------------------------------|--|
| en : mm | | | |
| | Pertes spécifiques en | Pertes spécifiques en W/Kg à | |
| | W/Kg à 400Hz et | 400Hz et B=1T | |
| | B=1,5T | | |
| e=0,10 | 15 | 14 | |
| e=0 15 | 16,5 | 15 | |
| e=0,20 | / | 15 | |

Tableau II.3. Pertes spécifiques des tôles minces à 400Hz [1].

II.8.3.Les tôles Fe-Si à fort % de Si [6]

On sait depuis longtemps qu'une teneur en silicium voisine de 6,5 % optimise les caractéristiques électromagnétiques de l'alliage Fe-Si. Cette composition correspond en effet à l'annulation de la magnétostriction, tandis que la résistivité et l'anisotropie magnéto-cristalline évoluent aussi de façon favorable, passant respectivement de 10^{-7} à 7. 10^{-7} Ω .m et de 4,8. 10^4 à 2. 10^4 J.m ⁻³. Ce qui conduit à des pertes magnétiques diminuées de 20 à 30 % par rapport à celle des machines conventionnelles. Un autre avantage est la réduction des effets de vieillissement. Mais au dessous de 3,5 % Si, l'alliage Fe-Si présente une fragilité qui interdit sa mise en forme par des moyens conventionnels (laminage par exemple). Deux nouvelles technologies sont alors utilisées pour obtenir des alliages Fe-Si contenant un excès de silicium.

• La solidification rapide de l'alliage sur la jante d'une roue froide tournant à grande vitesse, elle procure directement des rubans métalliques de faibles épaisseurs qui s'avèrent être très flexibles.

• L'enrichissement en silicium de tôles magnétiques industrielles Fe à 3 % Si, à partir d'un dépôt chimique en phase vapeur, ce qui préserve la géométrie et la texture initiales.

Chapitre 3

Etude expérimentale

III.1. Introduction

Toute variation d'induction dans un matériau magnétique induit, à l'intérieur de celui-ci, une dissipation d'énergie qui apparait le plus souvent sous forme de chaleur et n'est généralement pas récupérable. Cette dissipation est décrite grossièrement par : les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault.

Dans ce chapitre, nous présentons le banc d'essai expérimental nous permettant de mesurer les pertes magnétiques dans quelques échantillons de tôles Fer et Fe-Si (GO et NO). Le banc d'essai nous permet également le calcul et la représentation des caractéristiques magnétiques des tôles; à savoir l'induction magnétique B, le champ magnétique H et la constante d'anisotropie. L'élément principal du banc d'essai est un circuit magnétique appelé cadre d'Epstein.

III.2. Description du banc d'essai

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 par de nombreux organismes de normalisation CEN (Comité Européen de Normalisation). Il se compose de quatre éléments bobinés constituant un noyau magnétique ; ce dernier comprend N bandes rectangulaires. Le nombre N étant multiple de 4, il est au moins égal à 16. Les dimensions recommandées pour chaque bande étant 280×30 mm². On utilise environ 0,5 kg de matière par noyau magnétique. Une inductance mutuelle à été ajustée au centre du cadre afin de compenser le flux dans l'air. Les enroulements sont répartis uniformément sur une seule couche pour limiter le flux de fuite. Des bornes d'alimentation (primaire) et de mesure (secondaire) sont raccordées à leurs extrémités.

L'enroulement d'alimentation est bobiné à l'extérieur, est connecté en série avec l'enroulement primaire de l'inductance mutuelle alors que l'enroulement de mesure est bobiné à l'intérieur est connecté en opposition avec l'enroulement secondaire de la bobine de compensation.

L'enroulement primaire constitué de N_1 spires, parcouru par le courant I_1 , permet de définir le champ magnétique H(t) par l'utilisation du théorème d'Ampère donné par :

$$H(t) = \frac{N_{\pm}}{L_{may}} I_{1}(t)$$
(III-1)

L'enroulement secondaire constitué de N_2 spires, permet de déduire l'induction B(t) qui est obtenue en intégrant la tension $V_2(t)$:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int V_2(t) dt \qquad (III-2)$$

Des sabots isolants permettent un bon positionnement des tôles dans les angles. Les tôles doivent être insérées dans les éléments selon la méthode du joint à double recouvrement. Le cadre d'Epstein utilisé est représenté sur la photo 1.



Figure.III.1. Photo du cadre d'Epstein utilisé.



Figure III.1. Schéma général d'un cadre d'Epstein.



Figure III.2. Disposition des tôles en joints à double recouvrement.

III.2.2. Avantages du carde d'Epstein [1]

L'avantage primordial du circuit Epstein 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 outre le passage du flux d'induction d'une bande à ses voisines 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 côté (c'est- à-dire la section de N/4 bandes) et pour longueur, la longueur conventionnelle du circuit $l_m=0.95$ m.

III.2.3.Caractéristiques du cadre d'Epstein utilisé

Dans notre travail, le cadre Epstein utilisé, est un cadre normalisé, de type PHYWE, et possédant les caractéristiques suivantes :

- Enroulement primaire (excitation) $N_1 = 700$ spires ;
- Enroulement secondaire (mesures) $N_2 = 700$ spires ;
- Longueur du côté extérieur du cadre $L_{1=}280 \text{ mm}$;
- Longueur du côté intérieur du cadre $L_2 = 220 \text{ mm}$;
- Longueur de la partie bobinée $L_{3=}$ 190 mm ;
- Longueur moyenne du circuit magnétique $l_{m=}$ 0,95 m.

III.3.Echantillons étudiées

Nous avons utilisé dans cette étude trois échantillons de tôles

- Tôles Fer-Silicium à grains orientés (Fe-Si) fournies par l'Entreprise Nationale Electro-Industries d'Azazga;
- 2) Tôles à grains non orientés (Fe-Si) fournies par la compagnie étrangère Allemande, Phywe ;
- Tôles à grains non orientés (Fe) fournies par la compagnie étrangère Allemande, Phywe.

Les grandeurs caractérisant ces échantillons sont regroupées dans les tableaux suivants III.1, III.2 et III.3.

| Type de matériau | Fe-Si |
|--|----------------------|
| | (GO) |
| Nombre de tôles | 48 |
| | |
| Longueur d'une tôle L (mm) | 280 |
| Largeur d'une tôle l (mm) | 30 |
| Epaisseur d'une tôle (mm) | 0.3 |
| Masse de l'échantillon m(Kg) | 0,885 |
| Section droite d'un coté du cadre $S(m^2)$ | 108.10 ⁻⁶ |
| Masse volumique (Kg /dm ³) | 7.314 |
| Volume V (m ³) | 121.10-6 |

Tableau III.1. Propriétés de l'échantillon Fe-Si à GO.

Tableau III.2. Propriétés de l'échantillon Fe-Si à NO.

| Type de matériau | Fe-Si |
|--|----------------------|
| | (NO) |
| Nombre de tôles | 32 |
| Longueur d'une tôle L (mm) | 280 |
| Largeur d'une tôle l (mm) | 30 |
| Epaisseur d'une tôle (mm) | 0.5 |
| Masse de l'échantillon m (Kg) | 1.01 |
| Section droite d'un coté du cadre $S(m^2)$ | 120.10 ⁻⁶ |
| Masse volumique (Kg /dm ³) | 7.69 |
| Volume V (m ³) | 134.10 ⁻⁶ |

| Type de matériau | Fer |
|--|----------------------|
| Nombre de tôles | 32 |
| Longueur d'une tôle L (mm) | 280 |
| Largeur d'une tôle l (mm) | 30 |
| Epaisseur d'une tôle (mm) | 0.5 |
| Masse de l'échantillon m(Kg) | 1.044 |
| Section droite d'un coté du cadre $S(m^2)$ | 120.10 ⁻⁶ |
| Masse volumique (Kg /dm ³) | 7.81 |
| Volume V (m ³) | 134.10-6 |

Tableau III.3. Propriétés de l'échantillon Fe à NO.

III.4. Mesure des pertes par la méthode d'Epstein

La méthode d'Epstein nous donne une mesure directe des pertes magnétiques totales à l'aide d'un wattmètre et indirecte on calculant la surface du cycle d'hystérésis et cela pour une induction donnée. Après la réalisation de la mesure par les deux méthodes on fait la comparaison entre les valeurs obtenues.

Pour nos essais nous avons utilisé les échantillons suivants :

Echantillon 1 : 48 tôles Fe-Si à grains orientés (GO).

Echantillon 2 : 32 tôles Fe-Si à grains non orientés (NO), moitié découpées dans le sens transversale et moitié dans le sens longitudinal.

Echantillon 3 : 32 tôles en fer (Fe), moitié découpées dans le sens transversal et moitié découpées dans le sens longitudinale.

III.4.1.Montage expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la Photo 2.



Photo 2 : Dispositif expérimental.

Le montage expérimental est constitué de l'appareillage suivant :

- Un transformateur d'isolement et un auto-transformateur ;
- Cadre d'Epstein ;
- Un voltmètre numérique ;
- Deus rhéostats de 10Ω et 5A chacun ;
- Un wattmètre électrodynamique ;
- Un ampèremètre ferromagnétique;
- Un voltmètre magnétoélectrique;
- Un oscilloscope à mémoire de type HAMEG HM 1507-2.
- Un micro-ordinateur avec le logiciel SP 107.

• Un circuit intégrateur RC avec $R = 200 \text{ k}\Omega$ et $C = 1.04 \mu F$.

Le schéma synoptique du dispositif expérimental est représenté sur la figure III.3.



Figure III.3. Schéma synoptique du Dispositif expérimental.

III.4.2. Mode opératoire

III.4.2.1. Mesure de la perméabilité magnétique

On fait varier le courant. Pour chaque valeur du courant on relève la valeur de la tension indiquée par le voltmètre. Les valeurs de B et H sont déduites à partir des relations suivantes :

$$B_{max} = Veff \frac{\sqrt{2}}{N_z \omega S}$$
(III.3)

$$\mathbf{H} = \mathbf{I} \quad \frac{N_1}{l_m} \tag{III.4}$$

Avec S : la section droite ;

 R_H : la résistance du rhéostat ; $R_H = 20\Omega$;

 l_m : longueur moyenne du circuit magnétique ; $l_m = 0.95m$

La valeur de la perméabilité relative est obtenue à partir de la relation :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \tag{III.5}$$

III.4.2.2. Visualisation du cycle d'hystérésis à l'oscilloscope

Pour visualiser le cycle d'hystérésis à l'oscilloscope, la tension aux bornes du rhéostat, proportionnelle au champ magnétique H, (figure III.3) est envoyée sur le canal X de l'oscilloscope. La tension aux bornes de la capacité de l'intégrateur (RC), proportionnelle à l'induction magnétique B est envoyée sur le canal Y de l'oscilloscope. Le cycle d'hystérésis est obtenu en éliminant la base des temps de l'oscilloscope. Le cycle est envoyé vers un micro-ordinateur en utilisant le logiciel SP 107.

III.5. Résultats expérimentaux

III.5.1. Echantillon 1

On remplit le cadre d'Epstein avec 48 tôles à raison de 12 tôles par côté. Sur les figures III.4 à III.8, nous avons représenté la forme du courant et de la tension ainsi que les cycles d'hystérésis pour des inductions magnétiques de 1.5 T et 1.7 T. La perméabilité relative en fonction du champ magnétique a également été tracée.

Nous remarquons une déformation du courant à l'induction de 1.5 T. Cette déformation devient plus accentuée pour l'induction de 1.7 T. La tension se déforme également pour une induction de 1.7 T alors cette déformation est minime à 1.5 T.



Figure III.4. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1.5 tesla pour les tôles Fe-Si GO.



Figure III.5. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1.7 tesla pour les tôles Fe-Si GO.



Figure III.6. Cycle d'hystérésis pour une induction maximale de 1.5 tesla des tôles Fe-Si GO.

Aire du cycle 147.51 joules/mètre cube (B x H) Soit 147.51 x 50 = 7375.50 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.3 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x \ 48 = 121 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 7375.50 \ x \ 121 \ 10^{-6} = 0,892 \ W$



Figure III.7. Cycle d'hystérésis pour une induction maximale de 1.7 tesla des tôles Fe-Si GO.

Aire du cycle 195.06 joules/mètre cube (B x H) Soit 195.06 x 50 = 9753 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.3 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x 48 = 121 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 9753 \ x \ 121 \ 10^{-6} = 1.18 \ W$



Figure III.8. Perméabilité relative en fonction du champ excitateur pour les tôles Fe-Si GO)

La perméabilité relative augmente rapidement et passe par un maximum de 43996,28353 correspondant à un champ magnétique de 18.64211 A/m. Au-delà, la perméabilité diminue pour atteindre une valeur de 388,39013 à un champ de 4001,05263A/m.

III.5.2. Echantillon 2

On remplit le cadre d'Epstein avec 32 tôles et cela de façon alternée longitudinale-transversale à raison de 8 tôles par côté. Nous représentons sur les figures III.9 à III.12, les formes du courant et de la tension ainsi que les cycles d'hystérésis pour 1 T et 1.5 T. La perméabilité relative est représentée sur la figure III.13.



Figure III.9. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1 tesla pour les tôles Fe-Si NO.

Pour une induction magnétique de 1 T, la forme de la tension est presque sinusoïdale tandis que le courant présente une déformation sensible. Pour une induction de 1.5 T, la tension et le courant sont déformés. Notons que la déformation est plus accentuée dans ce deuxième cas.



Figure III.10. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1.5 tesla pour les tôles Fe-Si NO.



Figure III.11.Cycle d'hystérésis pour une induction maximale de 1.0 tesla des tôles Fe-Si NO.

Aire du cycle 258,92 joules/mètre cube (B x H) Soit 258,92 x 50 = 12946,42 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.5 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x \ 32 = 134.4 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 12946,42 \ x \ 134.4 \ 10^{-6} = 1,74 \ W$



Figure III.12. Cycle d'hystérésis pour une induction maximale de 1.5 tesla des tôles Fe-Si NO.

Aire du cycle 535.71 joules/mètre cube (B x H) Soit 535,71 x 50 = 26785,71 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.5 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x \ 32 = 134.4 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 26785 \ ,71 \ x \ 134.4 \ 10^{-6} = 3.6 \ W$



Figure III.13. Perméabilité relative en fonction du champ excitateur pour les tôles Fe-Si NO.

La perméabilité relative augmente jusqu'à 8729.94 pour un champ d'excitation de 88.121A/m puis elle diminue pour atteindre une valeur de 450.65 correspondant à un champ de 2984.04A /m.

III.5.3. Echantillon 3 :

Comme pour l'échantillon 2, le cadre est rempli de 32 tôles de manière alternée avec 8 tôles sur chaque côté du cadre. Sur les figures III.14 à III.17, nous représentons les formes du courant et de la tension ainsi que les cycles d'hystérésis pour des inductions magnétiques de 1 et 1.5 T. La perméabilité relative en fonction du champ magnétique est représentée sur la figure III.18.



Figure III.14. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1.0 tesla pour les tôles en fer.

Comme pour les cas précédents (tôles Fe-Si GO et tôles Fe-Si NO), la forme de la tension est quasi sinusoïdale avec un courant déformé pour une induction de 1 T. Pour l'induction maximale égale à 1.5 T par contre, la tension et le courant présentent une déformation. Cette dernière étant plus marquée pour le courant.



Figure III.15. Formes de la tension et du courant magnétisant à 1.5 tesla pour les tôles fer NO.



Figure III.16.Cycle d'hystérésis pour une induction maximum de 1.0 tesla des tôles de fer NO.

Aire du cycle 263.4 joules/mètre cube (B x H) Soit 263.4 x 50 = 13169,64 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.5 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x \ 32 = 134.4 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 13169,64 \ x \ 134.4 \ 10^{-6} = 1,77 \ W$



Figure III.17. Cycle d'hystérésis pour une induction maximum de 1.5 tesla des tôles de fer NO.

Aire du cycle 576.1 joules/mètre cube (B x H) Soit 576.1 x 50 = 28805,97 watts/mètre cube Volume total d'acier magnétique pour les 48 tôles étudiées : $V=0.5 \ 10^{-6} x \ 30 \ 10^{-6} x \ 28 \ 10^{-2} x \ 32 = 134.4 \ 10^{-6} \ m^3$ Ce qui correspond à des pertes réelles données par : $P = 28805,97 \ x \ 134.4 \ 10^{-6} = 3,86 \ W$



Figure III.18. Perméabilité relative en fonction du champ excitateur pour les tôles Fer NO.

Sous un champ de 139,36842 A/m la perméabilité relative est maximale et elle vaut 5299,0086. Elle diminue jusqu'à une valeur de 236,82356 sous un champ de 6031,57895 A/m.



Figure III.19.Perméabilités relatives de quelques échantillons de tôles.

On remarque que la perméabilité des tôles à grains orientés est très importante devant celle des tôles à grains non orientés, et cela est dû à l'aimantation rapide des tôles à grains orientés sous un champ très faible.

III.6. Evaluation des pertes spécifiques

III.6.1. Mesure des pertes par la méthode du wattmètre

Pour une valeur donnée de l'induction magnétique B, on règle la tension V_y aux bornes de la capacité du circuit intégrateur de façon à obtenir V_y de la façon suivante :

$$V_{y} = \frac{1}{C\omega} I = \frac{1}{C\omega} \frac{e}{Z}$$
(III.6)

$$V_{Y} = \frac{1}{C\omega} \frac{N_{2} S \omega B_{max}}{\sqrt{R^{2} + \frac{1}{C^{2} \omega^{2}}}}$$
(III.7)

$$V_{Y} = \frac{1}{c} \frac{N_{2}SB_{max}}{\sqrt{R^{2} + \frac{1}{C^{2}\omega^{2}}}}$$
(III.8)

Avec : C= 1.04 $.10^{-6}$ F ; R = 2.10⁻⁵ Ω ; S : Section droite de chaque échantillon.

Une fois que nous avons fixé la valeur V_y voulue, le wattmètre mesure les pertes totales exprimées en watts. En divisant les pertes par la masse des tôles, nous obtenons les pertes spécifiques exprimées en watts par kilogramme.

Les valeurs obtenues pour chaque échantillon sont indiqués dans le tableau suivant :

| Tableau III.5 : | : Pertes mesurées a | u wattmètre pour | les différents | échantillons |
|-----------------|---------------------|------------------|----------------|--------------|
| | | | | |

| Type de tôles | Induction | Puissance mesurée | Pertes spécifiques |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|
| | (T) | (W) | (W/Kg) |
| Fer-Silicium | 1,5 | 0,84 | 0,95 |
| GO | 1,7 | 1,40 | 1,58 |
| Fer-Silicium | 1,0 | 1,42 | 1,41 |
| NO | 1,5 | 3,30 | 3,27 |
| Fer | 1,0 | 1,75 | 1,68 |
| (sans silicium) | 1,5 | 3,64 | 3,49 |

III.6.2. Calcul des pertes spécifiques à partir du cycle d'hystérésis

La surface du cycle nous donne les pertes exprimées en joules par unité de volume. En multipliant ces pertes par la fréquence f, nous aurons les pertes en watts par unité de volume. En multipliant ces dernières par le volume de l'échantillon, nous obtenons les pertes en watts.

Les valeurs des pertes, obtenus à partir du cycle d'hystérésis sont regroupés dans le tableau suivant III.6.

| Type de tôles | Induction | Puissance mesurée | Pertes spécifiques |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|
| | (T) | (W) | (W/Kg) |
| Fer-Silicium | 1.5 | 0.892 | 1.01 |
| GO | 1.7 | 1.18 | 1.33 |
| Fer-Silicium | 1.0 | 1.74 | 1.72 |
| NO | 1.5 | 3.60 | 3.56 |
| Fer | 1.0 | 1.77 | 1.70 |
| (sans silicium) | 1.5 | 3.86 | 3.70 |

Tableau.III.6. Les valeurs des pertes obtenues à partir du cycle d'hystérésis

Nous pouvons conclure que les valeurs des pertes spécifiques mesurées avec le wattmètre sont en bon accord avec celles déterminées à partir du cycle d'hystérésis.

III.7. Mesure du facteur d'anisotropie des tôles magnétiques non orientées

Les tôles laminées à froid présentent une caractéristique spécifique liée à leur anisotropie magnétique. Cette anisotrope caractérise leur aptitude plus au moins marquée à s'aimanter dans une direction déterminée. La direction de laminage constitue la direction de facile aimantation, elle est caractérisée par des pertes magnétiques réduites en comparaison des pertes correspondant à la direction transversale du laminage.

Pour caractériser cette anisotropie, on utilise un facteur spécifique appelé "facteur d'anisotropie".

La méthode pratique de mesure consiste (norme allemande DIN) à :

- 1) remplir le cadre d'Epstein de tôles découpées dans le sens de laminage (SL) ;
- 2) Relever les pertes magnétiques P_{SL} ;
- Refaire la même expérience en utilisant des tôles découpées dans le sens transversal du laminage (ST) et noter les pertes P_{ST}.

Le facteur d'anisotropie F_{an} se détermine en utilisant la formule pratique :

$$F_{an} = \frac{P_{ST} - P_{SL}}{P_{ST} + P_{SL}} \times 100 \quad \text{exprimé en\%}$$
(III.9)

Les mesures que nous avons effectuées ont conduit aux résultats suivants :

- Premier échantillon :

tôles Fe-Si à grains non orientés de 0,5mm d'épaisseur :

$$F_{an} = \frac{P_{ST} - P_{SL}}{P_{ST} + P_{SL}} \times 100 = \frac{2.2 - 1.8}{2.2 + 1.8} \times 100 = 10 \%$$
$$F_{an} = 10 \%$$

- Deuxième échantillon :

tôles de fer à grains non orientés de 0,5mm d'épaisseur :

$$F_{an} = \frac{P_{ST} - P_{SL}}{P_{ST} + P_{SL}} = \frac{2.3 - 2}{2.3 + 2} \times 100 = 7 \%$$
$$F_{an} = 7 \%$$

Les valeurs trouvées sont conformes aux normes qui fixent à 20% la limite supérieure du facteur d'anisotropie à ne pas dépasser.

Conclusion générale

La demande des constructeurs électriciens s'oriente essentiellement vers des matériaux ayant de bonnes performances telles une grande perméabilité, une induction magnétique élevée sous un champ faible et moins de pertes magnétiques. L'élaboration de ce projet de fin d'études nous a permis de comprendre certains phénomènes magnétiques comme l'induction et l'aimantation. Pour cela nous avons effectué des expériences sur trois échantillons de tôles. L'étude expérimentale à montré que :

Les pertes par hystérésis augmentent avec l'induction maximale. Elles dépendent des caractéristiques et de type des tôles à grains orientés ou non orientés.

La perméabilité croît également avec l'orientation privilégiée des grains, comme nous le remarquons sur les tôles Fe-Si à grains orientés ; elle atteint une valeur de 44000 Cette valeur est seulement de 8700 pour les tôles Fe-Si grains non orientés.

Les valeurs de la constante d'anisotropie sont acceptables puisque qu'elles se conforment à la norme qui fixe à 20% la limite à ne pas dépasser.

Pour poursuivre cette étude en vue d'une meilleure caractérisation des matériaux ferromagnétiques doux, il serait plus intéressant d'étudier le vieillissement thermique.

Références bibliographiques

[1] Pierre Brissonneau,

«Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique», Editions Hermès, Paris 1997.

[2] P. Robert,

«Matériaux de l'électrotechnique», Editions Dunod, Paris, 1979.

[3] Gérard Lacroux,

«Les aimants permanents», Editions Lavoisier, Paris, 1989.

[4] J.L. Dalmasso,

«Cours d'électrotechnique; 2 traitement de l'énergie électrique», Technique supérieure, France, 1984.

[5] Afef Kedous-Lebouc,

«Matériaux magnétiques en génie électrique 2», Editions Lavoisier, Paris, 2006.

[6] J.L. Porteseil, O.Geoffroy,

«Les matériaux doux pour l'électrotechnique basse fréquence», Presse universitaire de Grenoble 1999.

[7] Appareils vittiner SA,

Mesures magnétiques,

Equipement de mesures à l'aide du cadre d'EPSTEIN 18 bis, rue Pierre Simard. 69007 LYON, France.