

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire

de fin d'études

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

Thème

**Effet de la contrainte thermique sur les
caractéristiques des tôles Fe-Si utilisées dans les
circuits magnétiques des machines électriques.**

Proposé et dirigé par :

M^{me} : F. Bitam-Megherbi

Etudié par :

M^{elle} G. Leghlid

Promotion 2010

Remerciements

Remerciements

Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique m'a fait confiance en me proposant le travail, objet du présent mémoire. Elle n'a eu de cesse de me prodiguer de précieux conseils durant toute la période de réalisation du travail. Je lui en suis reconnaissante et tiens à lui exprimer ici mes vifs remerciements.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma mère et mon père
- Mes neveux : Liza, Kamel, Mouhand-Salah et Dyhia
- Ma sœur Safia
- Ma sœur Nora et son époux larbi
- Mon frère Salah et sa femme Zahra
- La mémoire de ma sœur Chafia
- Toute la famille
- Tous mes amis (es)

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre I : Notions générales sur le magnétisme

I.1. Définitions générales	3
I.1.1. Le champ magnétique d'excitation	3
I.1.2. L'induction magnétique	3
I.1.3. Le flux d'induction magnétique	3
I.1.4. La perméabilité magnétique	4
I.2. Le magnétisme à l'échelle de l'atome	4
I.2.1. Le moment magnétique orbital	4
I.2.2. Le moment magnétique de Spin	5
I.2.3. L'unité de moment magnétique : le magnéton de Bohr	5
I.3. Classification sommaire des matériaux magnétiques	6
I.3.1. Classification	6
I.3.1.1. Les matériaux diamagnétiques	6
I.3.1.2. Les matériaux paramagnétiques	6
I.3.1.3. Les matériaux ferromagnétiques	7
I.3.2. Aimantation, polarisation et susceptibilité magnétiques	7
I.3.2.1. Définition de l'aimantation	7
I.3.2.2. Définition de la polarisation	8
I.3.2.3. Définition de la susceptibilité	8
I.3.2.4. Relation entre champ magnétique, induction magnétique et aimantation magnétique	8

Chapitre II : Théorie du ferromagnétisme

II.1. Introduction	9
II.1.1. Structure en domaines de Weiss dans un monocristal ferromagnétique	9
II.1.2. Les parois de Bloch	9
II.1.3. Energie interne d'un cristal ferromagnétique	10
II.1.3.1. Energie d'anisotropie	10
II.1.3.2. Energie magnétostatique	11
II.1.3.3. Energie d'échange	11
II.1.3.4. Energie magnétostrictive	11
II.2. Processus d'aimantation	11
II.2.1. Courbe de 1 ^{ère} aimantation	11
II.2.2. Cycle d'hystérésis	12
II.3. Les pertes magnétiques	13
II.3.1. Les pertes par hystérésis	13
II.3.1.1. Formule de Steinmetz	14
II.3.1.2. Formule de Richter	14
II.3.2. Les pertes par courants de Foucault ou courants induits	15
II.3.3. Les pertes supplémentaires (ou additionnelles)	17
II.3.3.1. Modèle statistique de Bertotti	18
II.3.3.2. Modèle des domaines	18

Chapitre III : Les matériaux magnétiques en alliages Fer- Silicium

III.1. L'alliage fer- nickel	20
III.2. L'alliage fer- cobalt	21
III.3. L'alliage fer- silicium	21
III.3.1. Le fer, matériaux magnétique de base	21
III.3.2. Effets des impuretés sur les propriétés magnétiques	22
III.3.3. Influence du silicium sur les propriétés physiques, mécaniques, métallurgiques et magnétiques	22
III.3.4. Le vieillissement magnétique	23
III.4. Elaboration des tôles magnétiques fer- silicium en métallurgie	25
III.4.1. Les tôles fer-silicium à grains non orientés (NO)	25
III.4.1.1. Procédé de fabrication	25
III.4.1.2. Propriétés	26
III.4.1.3. Principales caractéristiques normalisées	27
III.4.1.4. Produits finis ; semi-fini ; épaisseurs conventionnelles	27
III.4.1.5. Isolation des tôles	28
III.4.1.6. Utilisation	28
III.4.2. Les tôles fer-silicium à grains orientés (GO)	29
III.4.2.1. Elaboration	29
III.4.2.2. Propriétés	30
III.4.2.3. Utilisation	30
III.4.2.4. Epaisseurs conventionnelles et caractéristiques selon EURONORM	31
III.4.2.5. Isolation	32
III.4.3. Tôles spécifiques	32
III.4.3.1. Les tôles fer-silicium de faibles épaisseurs	32

III.4.3.2. Les tôles fer-silicium à haute perméabilité	33
III.4.3.3. Les tôles fer-silicium à % de silicium $\text{Si} \geq 6 \%$	34
III.4.3.4. Les tôles fer-silicium « Hi-B »	34

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1. Cadre d'Epstein	35
IV.1.1. Description du cadre d'Epstein	35
IV.1.2. Caractéristiques du cadre d'Epstein utilisé	37
IV.2. Echantillons étudiés	37
IV.3. Mesure de la perméabilité relative en continu	38
IV.3.1. Tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal du laminage	40
IV.3.2. Tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens transversal du laminage	41
IV.3.3. Tôles Fe-Si à grains orientés	42
IV.4. Mesure de la perméabilité relative en alternatif	43
IV.5. Forme du courant et de l'induction magnétique	46
IV.5.1. Forme de l'induction magnétique	47
IV.5.1.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal	47
IV.5.1.2 Tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal	51
IV.5.1.3. Tôles à grains orientés	53
IV.5.2. Forme du courant	56
IV.5.2.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal	56
IV.5.2.2 Tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal	60
IV.5.2.3. Tôles à grains orientés	62

IV.6. Mesures des pertes magnétiques	65
IV.6.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal	66
IV.6.2 Tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal	67
IV.6.3. Tôles à grains orientés	68
IV.7. Cycles d'hystérésis	69
IV.7.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal	70
IV.7.2. Tôles à grains orientés	71
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	76

Introduction générale

Le matériau de base dans une machine électrique est incontestablement le matériau magnétique. Une machine électrique performante est celle qui développe une grande énergie volumique, un meilleur rendement et de faibles pertes. Pour satisfaire ces exigences le circuit magnétique doit posséder une grande perméabilité magnétique, atteindre de grandes inductions et présenter des cycles d'hystérésis très minces. A ce jour, le matériau magnétique qui répond le mieux à ces critères est l'alliage fer-silicium à 2 ou 3 % de silicium. Cet alliage peut atteindre des inductions proches de 2 teslas, des perméabilités relatives de 60000 ou même 80000 et des pertes magnétiques pouvant descendre jusqu'à moins de 1W/kg. L'alliage Fe-Si élaboré en métallurgie se présente sous forme de tôles minces ($\leq 1\text{mm}$) à grains orientés ou non orientés, isolées électriquement les unes des autres.

Les propriétés magnétiques des tôles utilisées dans la construction des machines électriques sont influencées par la température [1-2]. C'est ainsi que l'objectif de notre travail est l'étude de l'influence de la température sur les propriétés magnétiques des tôles fer-silicium utilisées dans la construction des transformateurs et des machines électriques tournantes.

Le travail présenté dans ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Le premier chapitre est un rappel des notions générales essentielles de magnétisme.

Le deuxième chapitre rappelle les lois générales et les hypothèses du ferromagnétisme.

Le troisième chapitre concerne les propriétés des alliages ferromagnétiques doux comme le fer-cobalt, le fer-nickel et plus encore le fer-silicium.

La quatrième partie sera consacrée aux mesures magnétiques effectuées sur quelques échantillons de tôles Fe-Si à grains orientés et non orientés.

Les tôles à grains orientés étudiées sont destinées à équiper les circuits magnétiques des transformateurs soumis à l'action d'un champ alternatif sinusoïdal d'axe fixe. Les tôles à grains non orientés, quant à elles sont découpées dans le sens longitudinal et dans le sens transversal du laminage. Les tôles longitudinales sont destinées à équiper les circuits magnétiques des moteurs et générateurs soumis à l'action d'un champ tournant.

Les échantillons soumis aux mesures contiennent des lots vierges de toute aimantation c'est-à-dire n'ayant subi aucun essai ou traitement initial ainsi que des lots portant

trace d'aimantation et ayant subi des vieillissements thermiques de plusieurs heures sous 225°C. Nous terminons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés les résultats essentiels de notre étude. Nous y donnerons également les perspectives ouvertes par notre étude.

Chapitre I

Notions générales sur le magnétisme

I.1. Définitions générales

I.1.1. Le champ magnétique d'excitation

Le champ magnétique $\vec{H}$ est une propriété que nous pouvons mettre en évidence en plaçant en un point p quelconque une masse magnétique m, qui subit une force $\vec{F}$ donnée par la loi de Coulomb :

$$\vec{F} = m \cdot \vec{H} \quad (I-1)$$

La force $\vec{F}$ est une mesure directe du champ magnétique $\vec{H}$ dont l'unité est l'ampère par mètre (A/m).

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

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

N : est 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, l'induction magnétique B en un point aux environs de ce fil est donnée par :

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

Avec :

B : l'induction magnétique exprimée en Tesla (T),

μ_0 : la perméabilité magnétique du vide, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m).

I.1.3. Le flux d'induction magnétique

Soit un élément de surface $d\vec{S}$. Si on applique un champ d'induction magnétique $\vec{B}$ dans la région où se trouve cet élément, alors le flux magnétique traversant cet élément est donné par :

$$d\varphi = \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (I-4)$$

On dit du vecteur $\vec{B}$ 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 :

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (I-5)$$

I.1.4. La perméabilité magnétique

Tout corps placé dans une région où règne un champ magnétique, aura tendance à s'aimanter de façon intrinsèque. Cette tendance à s'aimanter est une caractéristique des corps magnétiques et on l'appelle la perméabilité magnétique. Elle caractérise la capacité du corps à canaliser un flux magnétique.

La perméabilité magnétique relative μ_r mesure l'aptitude magnétique d'un matériau par rapport à celle du vide. Mathématiquement, la perméabilité relative est donnée par la relation suivante :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (I-6)$$

I.2. Le magnétisme à l'échelle de l'atome

Le moment magnétique d'un atome provient du mouvement orbital de ses électrons autour du noyau. Le moment magnétique de l'atome est la somme de deux moments : le moment magnétique orbital et le moment magnétique de spin.

I.2.1. Le moment magnétique orbital

L'origine de ce moment est établie en s'appuyant sur le modèle du courant ampérien. Il est défini par :

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S} \quad (I-7)$$

Le module de ce moment ampérien est donné par :

$$m = I \cdot S \quad (I-8)$$

Où :

m : s'exprime en $(A \cdot m^2)$ ou (J/T) ,

I : courant électrique en (A) ,

S : surface de l'ellipse en (m^2) .

Pour un électron gravitant autour du noyau sur une orbite supposée circulaire (figure I.1), le moment ampérien s'appelle moment magnétique orbital noté :

$$m_l = \frac{-e.v.r}{2} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

$|e|$: la charge de l'électron, $|e| = 1,6.10^{-19} \text{ Cb}$,

v : la vitesse linéaire en (m/s),

r : le rayon vecteur en (m).

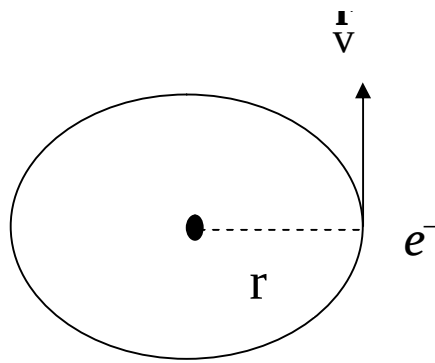


Figure I.1 : Mouvement de l'électron dans un atome.

I.2.2. Le moment magnétique de spin

Tout électron possède un moment cinétique de spin. A ce moment cinétique de spin est associé un moment magnétique de spin, ayant pour expression :

$$\mathbf{m}_s = \frac{g.e}{2.m_e} \cdot \mathbf{S} \quad (\text{I-10})$$

Avec :

g : le facteur de Landé,

m_e : la masse de l'électron, $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

I.2.3. L'unité de moment magnétique : le magnéton de Bohr :

Le magnéton de Bohr noté m_B est la valeur du moment magnétique orbital de l'électron qui se trouve sur la première orbite de Bohr. $m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$. C'est l'unité du moment magnétique.

I.3. Classification sommaire des matériaux magnétiques

I.3.1. Classification

I.3.1.1. Les matériaux diamagnétiques

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative négative, de faible amplitude. Le diamagnétisme est dû à un mouvement orbital des électrons provoqué par le champ magnétique appliqué. Ce mouvement peut être assimilé à un courant microscopique dont le comportement serait comparable à celui d'un courant induit dans un solénoïde. En vertu de la loi de Lenz, le courant induit s'oppose au champ qui le produit, ce qui est en accord avec le fait que χ_r est négative. Les gaz rares, certains métaux, la plupart des métalloïdes et un grand nombre de composés organiques ont une susceptibilité relative de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} .

I.3.1.2. Les matériaux paramagnétiques

Le paramagnétisme se manifeste dans certaines substances ayant leurs sous-couches électroniques incomplètes d'électrons. Chaque atome de ces substances porte alors un moment magnétique permanent. Les moments magnétiques des différents atomes sont indépendants les uns des autres. Ils sont orientés d'une façon aléatoire en raison de l'agitation thermique, ce qui explique le fait qu'il n'y a pas d'aimantation paramagnétique au niveau macroscopique.

Sous l'action d'un champ magnétique extérieur, les moments ont tendance à s'orienter dans la direction du champ. Une aimantation apparaît et est dirigée dans le sens du champ appliqué. La susceptibilité magnétique est petite mais positive. Elle est inversement proportionnelle à la température et elle obéit à la loi de Curie suivante :

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

Avec :

C : constante de Curie,

T : température absolue en degré Kelvin (K).

Sont paramagnétiques la plupart des gaz, certains métaux, en particulier les métaux alcalins, quelques sels et les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques lorsqu'ils sont chauffés au-dessus de leur température de Curie.

I.3.1.3. Les matériaux ferromagnétiques

Le ferromagnétisme est le type de magnétisme résultant de l'alignement de moments magnétiques permanents, ces moments étant orientés parallèlement les uns aux autres par une interaction mutuelle appelée couplage ferromagnétique (figure I.2). Les matériaux ferromagnétiques ont une température de Curie, au-dessus de laquelle ils deviennent paramagnétiques, leur susceptibilité suit alors la loi de Curie-Weiss :

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

Où :

T_c : température de Curie.

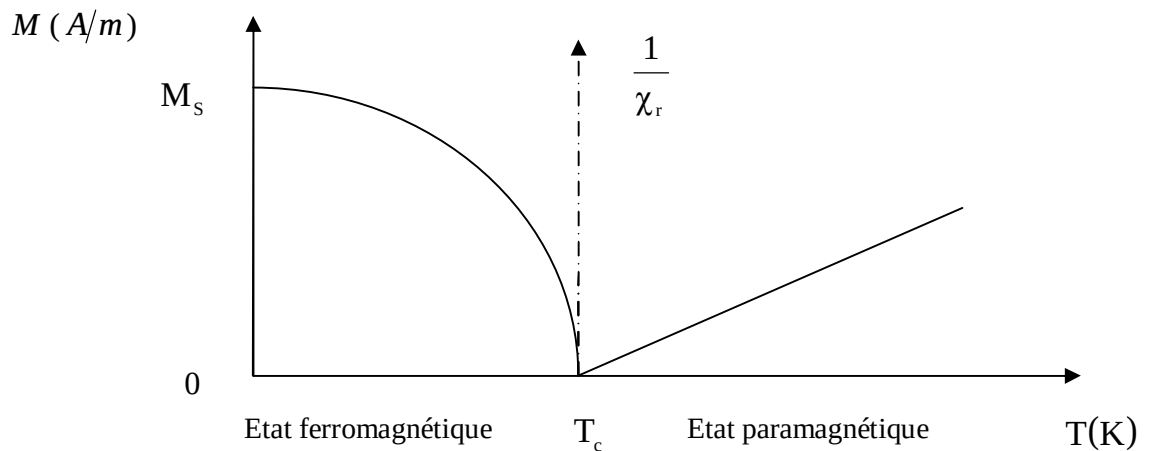


Figure I.2 : Variation de l'aimantation en fonction de la température [6].

I.3.2. Aimantation, polarisation et susceptibilité magnétiques

I.3.2.1. Définition de l'aimantation

Un corps est aimanté si dans un volume donné de ce corps, la somme des moments magnétiques atomiques est différente de zéro.

On appelle aimantation magnétique, la valeur du moment magnétique ampérien par unité de volume de la substance magnétique. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{M} = \frac{\sum \mathbf{m}_{iA}}{V} \quad (\text{I-13})$$

M : aimantation en (A/m),

m_{iA} : moment magnétique ampérien en (A.m²),

V : volume en (m³).

I.3.2.2. Définition de la polarisation

On appelle polarisation magnétique, le moment magnétique dipolaire par unité de volume de la substance magnétique. Elle est définie par :

$$\mathbf{J} = \frac{\sum \mathbf{m}_{id}}{V} \quad (\text{I-14})$$

$\mathbf{J}$: polarisation en (T) ou (Wb/m²),

$\mathbf{m}_{id}$: le moment magnétique dipolaire en (Wb.m),

V : volume de la substance magnétique.

I.3.2.3. Définition de la susceptibilité

On appelle susceptibilité magnétique absolue χ , le rapport :

$$\chi = \frac{J}{H} \quad (\text{H/m}) \quad (\text{I-15})$$

La susceptibilité magnétique relative χ_r est définie par :

$$\chi_r = \frac{M}{H} \quad (\text{sans unité}) \quad (\text{I-16})$$

H : champ magnétique en (A/m).

La susceptibilité magnétique renseigne sur le taux d'aimantation du matériau.

I.3.2.4. Relation entre champ magnétique, induction magnétique et aimantation magnétique

Dans les matériaux ferromagnétique, les grandeurs $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{M}$ et $\mathbf{J}$ sont liées par :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} \quad (\text{I-17})$$

Chapitre II

Théorie du ferromagnétisme

II.1. Introduction

II.1.1. Structure en domaines de Weiss dans un monocristal ferromagnétique

Les substances ferromagnétiques se distinguent des corps paramagnétiques par leur propriété de posséder une aimantation permanente spontanée en l'absence de champ magnétique extérieur.

Les propriétés ferromagnétiques se déterminent par un comportement collectif des moments magnétiques. L'expérience montre que les moments magnétiques des matériaux ferromagnétiques sont regroupés et alignés parallèlement les uns par rapport aux autres dans de petits volumes ou régions du corps, appelés domaines magnétiques élémentaires. 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 diffèrent par l'orientation de la polarisation magnétique J de chacun d'eux. Chaque domaine est séparé d'un voisin par une zone de transition appelée paroi de Bloch (figure II.1).

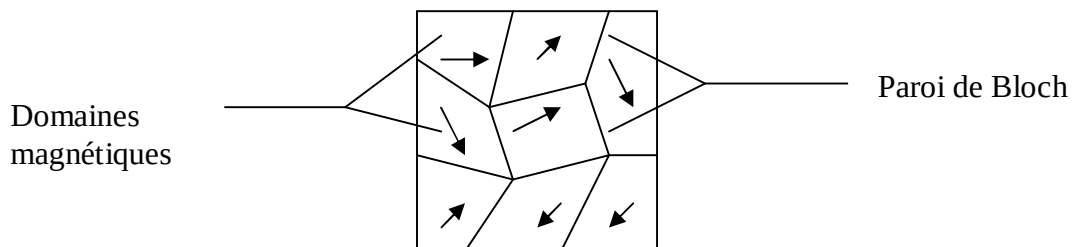


Figure II.1 : Structure en domaines d'un ferromagnétique [6].

II.1.2. Les parois de Bloch

Les parois de Bloch sont les régions de transition entre deux domaines adjacents. Les moments magnétiques ne passent pas brutalement de l'orientation qui les caractérise dans le domaine 1 à l'orientation qui les caractérise dans le domaine 2 voisin. Ceci est représenté sur la figure II.2 (a). Il existe toujours une transition graduelle comme celle indiquée sur la figure II.2 (b) qu'on appelle paroi de Bloch.

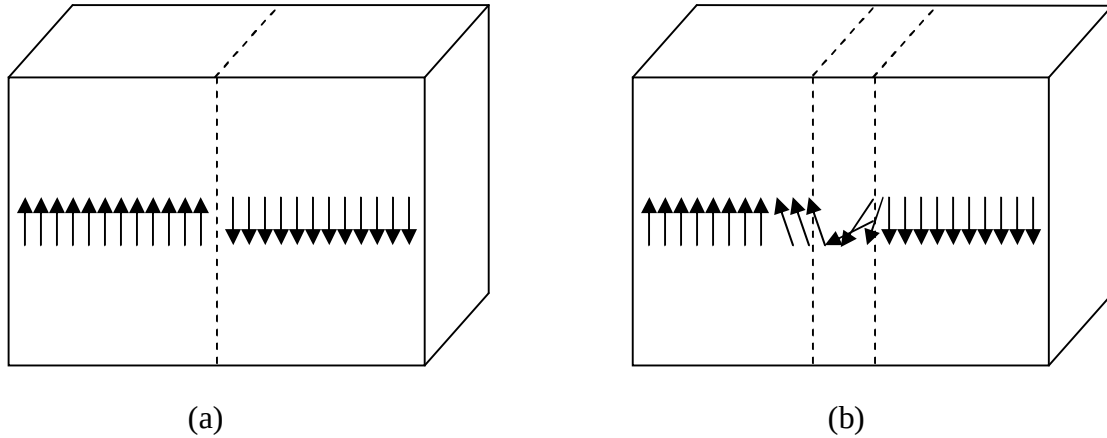


Figure II.2 : Transition entre deux domaines à 180°, a) la transition est brutale ;
b) la transition est progressive. On dit qu'il existe une paroi de Bloch [4].

II.1.3. Energie interne d'un cristal ferromagnétique

L'énergie interne associée à la structure des domaines, w_{in} , comprend 4 termes :

$$w_{in} = w_{an} + w_{ms} + w_{ec} + w_{mt} \quad (II-1)$$

Avec :

w_{an} : énergie d'anisotropie,

w_{ms} : énergie magnétostatique,

w_{ec} : énergie d'échange,

w_{mt} : énergie magnétostrictive.

II.1.3.1. Energie 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 maximale.

II.1.3.2. Energie magnétostatique w_{ms}

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.

II.1.3.3. Energie d'échange w_{ec}

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 passe par un minimum lorsque ces moments sont parallèles.

II.1.3.4. Energie magnétostrictive

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.

II.2. Processus d'aimantation**II.2.1. Courbe de première aimantation**

Un matériau ferromagnétique est initialement démagnétisé (pas d'aimantation). On lui applique un champ magnétique extérieur croissant régulièrement et on obtient le diagramme $B(H)$, appelé courbe de première aimantation représentée à la figure II.3.

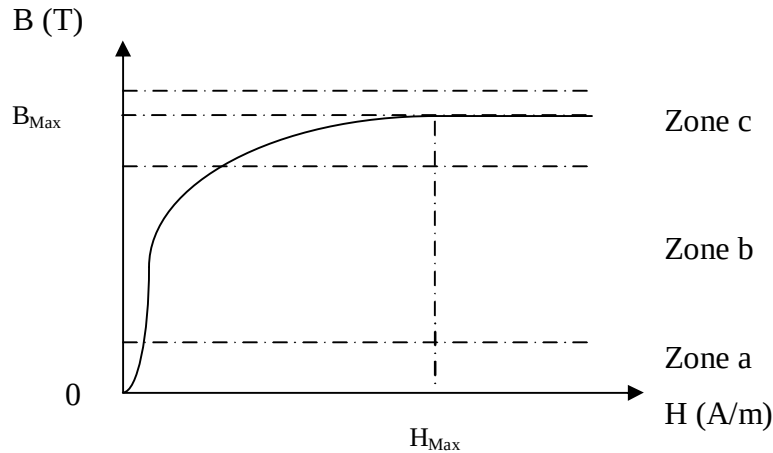


Figure II.3 : Courbe de première aimantation [7].

Zone a : région des champs faibles ou domaine de l'aimantation initiale,

Zone b : région de champs intermédiaires, plage d'aimantation moyenne,

Zone c : région de champs forts, zone de saturation.

II.2.2. Cycle d'hystérésis

Si on fait décroître le champ H , après avoir parcouru la courbe de première aimantation jusqu'à la saturation, l'induction B décroît de manière lente pour atteindre une induction rémanente B_r pour $H = 0$. Cette induction rémanente ne peut être réduite à une induction nulle qu'en appliquant un champ coercitif H_c de sens inverse ; H_c est le champ nécessaire pour annuler l'aimantation. Si on continue la variation de H à $-H_{Max}$ puis à $+H_{Max}$, on obtient une courbe fermée appelée cycle d'hystérésis (figure II.4).

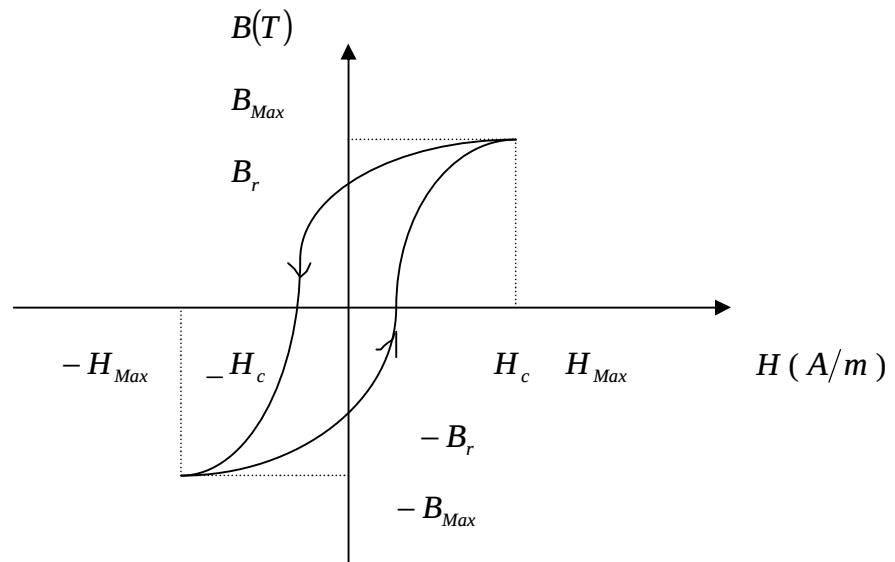


Figure II.4 : Cycle d'hystérésis [7].

II.3. Les pertes magnétiques

Toute variation de l'induction dans un matériau magnétique implique une dissipation d'énergie à l'intérieur de celui-ci. Cette énergie apparaît le plus souvent sous forme de chaleur non récupérable d'où l'expression de pertes magnétique pour désigner le phénomène.

Les pertes magnétiques peuvent être divisées en 3 parties :

II.3.1. Les pertes par hystérésis

Lorsqu'un milieu ferromagnétique subit des cycles répétés, on observe un échauffement de ce milieu. Sous l'action de l'excitation ayant tantôt un sens tantôt un sens contraire, l'orientation des moments magnétiques entraîne un phénomène semblable à celui des frottements mécaniques, ces frottements au sein de la substance provoquent un dégagement de chaleur, et ce sont eux qui retardent les variations de l'induction B par rapport aux variations du champ magnétique H . L'existence d'une induction rémanente et d'un champ coercitif expliquent le phénomène d'hystérésis.

Dans les machines électriques, l'énergie transformée en chaleur par hystérésis est une énergie perdue, on parle de pertes par hystérésis. Pour rendre ces pertes aussi faibles que possible, la solution est d'utiliser des matériaux présentant, pour une valeur

donnée de l'induction maximale B_{Max} , un cycle de surface relativement faible. Ces matériaux sont dits matériaux doux.

Les pertes par hystérésis correspondent au travail nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique.

$$w_h = \oint_c H \cdot dB \quad (II.2)$$

L'évaluation de ces dernières, s'appuie sur les deux formules suivantes :

II.3.1.1. Formule de Steinmetz

Cette formule s'exprime par [5] :

$$P_h = V \cdot h \cdot f \cdot B_{Max}^a \quad (w) \quad (II-3)$$

Avec :

V : le volume du matériau,

f : la fréquence,

h et a sont des coefficients qui dépendent de la nature du matériau et qui sont généralement donnés par le fabricant ou à défaut déterminés expérimentalement.

II.3.1.2. Formule de Richter [8]

L'expression de la puissance perdue par hystérésis est donnée par la formule de Richter ci-dessous :

$$P_h = a \cdot V \cdot f \cdot B_{Max} + b \cdot V \cdot f \cdot B_{Max}^2 = V \cdot f \cdot (a B_{Max} + b B_{Max}^2) \quad (w) \quad (II-4)$$

Où :

a, b : constantes qui dépendent de la nature du matériau.

Pour des fortes valeurs de l'induction ($B_m \geq 1T$), la formule de Richter se réduit pratiquement à :

$$P_h = b \cdot V \cdot f \cdot B_{Max}^2 \quad (II-5)$$

En général ces pertes sont données par :

$$P_h = K \cdot f \cdot B_{Max}^2 \quad (II-6)$$

Avec :

K : coefficient de Steinmetz ($5.10^4 < K < 4.10^2$). Il dépend de la nature du matériau et varie selon le pourcentage de silicium.

II.3.2. Les pertes par courants de Foucault ou courants induits

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices du courant électrique. En présence d'un flux variable, ils sont le siège de courants induits qui circulent dans la masse même de ces matériaux. L'effet Joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur appelée pertes classiques par courants induits.

• Quantification des pertes par courants de Foucault [9]

On considère une tôle de longueur L , de largeur l et d'épaisseur e_1 , soumise à un champ d'induction uniforme : $B = B_{Max} \cdot \cos(w.t)$. On peut décomposer cette tôle en circuits élémentaires tel que celui hachuré sur la figure II.5.

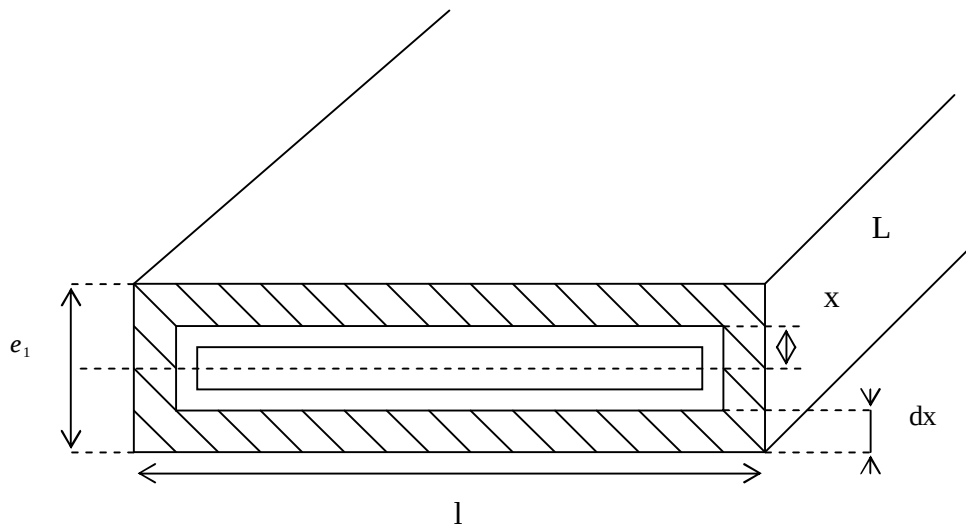


Figure II.5 : Représentation d'un circuit élémentaire d'une tôle.

Le circuit schématisé (figure II.5), de résistivité r , de longueur $2.l$ et de section $L.dx$, présente une résistance :

$$r = \frac{2.l.r}{L.dx} \quad (II-7)$$

Cette spire embrasse un flux :

$$f = BS_{sp} \quad (II-8)$$

Avec :

$$B = B_{Max} \cdot \cos(w.t) \quad (II-9)$$

$$S_{sp} = 2.x.l \quad (II-10)$$

Donc :

$$f = 2.x.l.B_{Max} \cdot \cos(w.t) \quad (II-11)$$

La loi de Lenz nous donne :

$$e = \frac{df}{dt} = 2.x.l.B_{Max} \cdot w \cdot \sin(w.t) \quad (II-12)$$

e : étant la force électromotrice induite dans la spire élémentaire, sa valeur efficace est :

$$E = \sqrt{2}.x.l.B_{Max} \cdot w \quad (II-13)$$

$$E = \sqrt{8}.x.l.B_{Max}p \cdot f \quad (II-14)$$

Si on néglige l'inductance de cette spire, l'intensité du courant qui la traverse a pour valeur efficace :

$$I = \frac{E}{r} = \frac{\sqrt{8}.x.l.B_{Max}p \cdot f \cdot L \cdot dx}{2.l.r} \quad (II-15)$$

$$I = \frac{\sqrt{2}.B_{Max}p \cdot f \cdot L}{r} \cdot x \cdot dx \quad (II-16)$$

Et la puissance dissipée par effet Joule dans cette spire élémentaire sera :

$$dP_{cF} = r.I^2 = E.I = \frac{4.l.B_{Max}^2 p^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot x^2}{r} \cdot dx \quad (II-17)$$

Quant à la puissance dissipée dans la tôle, est obtenue, en intégrant l'expression (II-17) sur l'intervalle $\left[0, \frac{e_1}{2}\right]$ de x :

$$P_{cF} = \int dP_{cF} = \int_0^{\frac{e_1}{2}} \frac{4.l.B_{Max}^2 p^2 \cdot f^2 \cdot L}{r} \cdot x^2 \cdot dx \quad (II-18)$$

$$P_{cF} = \frac{4.l.B_{Max}^2 p^2 \cdot f^2 \cdot L}{r} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{\frac{e_1}{2}} \quad (II-19)$$

$$P_{cF} = \frac{4.l.B_{Max}^2 p^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot e_1^3}{24.r} \quad (II-20)$$

On sait que : $lLe_1 = V$; le volume de la tôle.

La puissance cherchée devient :

$$P_{cF} = \frac{p^2 \cdot V \cdot e_1^2}{6 \cdot r} \cdot f^2 \cdot B_{Max}^2 \quad (II-21)$$

La puissance correspondant aux courants induits s'exprime alors comme l'indique la formule ci-après :

$$P_{cF} = K_1 \cdot V \cdot f^2 \cdot e_1^2 \cdot B_{Max}^2 \quad (w) \quad (II-22)$$

$$\text{Avec : } K_1 = \frac{p^2}{6 \cdot r}$$

II.3.3. Les pertes supplémentaires (ou additionnelles)

Les pertes supplémentaires peuvent être considérées comme étant la somme de deux grandeurs :

- Les pertes résiduelles ou anormales dues au fait que l'induction magnétique B n'est pas sinusoïdale ;
- Les pertes par trainage ou retard au processus d'aimantation, dues au retard de l'induction magnétique B par rapport au champ magnétique H à l'aimantation.

On définit aussi les pertes dynamiques qui sont les pertes totales auxquelles on fait soustraire les pertes par hystérésis :

$$P_{dyn} = P_t - P_h \quad (II-23)$$

La relation liant les pertes dynamiques P_{dyn} aux pertes par courants de Foucault dépend de la forme de l'induction : Si l'induction est sinusoïdale :

$$P_{dyn} = h \cdot P_{cF} \quad (II-24)$$

Si l'induction est non sinusoïdale :

$$P_{dyn} = h \cdot \left(\frac{F}{F_s} \right)^2 \cdot P_{cF} \quad (II-25)$$

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

F_s : facteur de forme de l'induction sinusoïdale,

h : coefficient d'anomalie des pertes.

• Evaluation des pertes supplémentaires

Plusieurs modèles ont été élaborés pour tenter de prédéterminer les pertes supplémentaires, les plus importants sont [8] :

II.3.3.1. Modèle statistique de Bertotti

En abordant d'une façon statistique le processus d'aimantation dynamique et les pertes supplémentaires qui s'en suivent, Bertotti a fini par introduire une nouvelle entité physique : l'objet magnétique (OM) grâce auquel s'inverse l'aimantation, ainsi l'état magnétique d'un matériau sera caractérisé par le nombre d'OM participant au processus de l'aimantation. Pour une induction sinusoïdale de fréquence f et de valeur de crête B_{Max} de l'induction, les pertes additionnelles par cycle dans une tôle de section S sont exprimées par la relation suivante :

$$P_{sup} = \frac{8,8}{M_v} \sqrt{\frac{G \cdot H_0 \cdot S}{r}} \cdot B_{Max}^{1,5} \cdot f^{0,5} , \quad [\text{J/kg}] \quad (\text{II-26})$$

Où :

G : est un coefficient de frottement de l'OM,

$G=0,136$ dans le cas où l'OM correspond à une paroi,

H_0 : est équivalent à un champ coercitif,

M_v : est la masse volumique de la tôle.

II.3.3.2. Modèle des domaines

Dans ce modèle, PRY et BEAN supposent une tôle d'épaisseur e des domaines à 180° en forme de barres de largeur $2.l$, séparées par des parois planes perpendiculaires aux faces de la tôle.

Le coefficient d'anomalie des pertes h est alors associé par les auteurs au rapport $\frac{2.l}{e}$.

$$h = \frac{48}{p^3} \cdot \frac{2.L}{e} \cdot \sum_{n \geq 1} \frac{1}{(2.n-1)^3} \cdot \coth \left[(2.n-1) \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{2.L}{e} \right] \quad (\text{II-27})$$

Cas particulier :

- Si $\frac{2.l}{e} \ll 1$ (domaines très étroits), $h \approx 1$: les pertes dynamiques se confondent avec les pertes par courants de Foucault.
- Si $\frac{2.l}{e} > 1$, $h \approx 1,63 \left(\frac{2.l}{e} \right)$: les pertes dynamiques sont plus importantes que les pertes par courants de Foucault.

Chapitre III

Les matériaux magnétiques en alliages Fer-silicium

En électrotechnique, les alliages magnétiques sont divisés en deux grandes catégories : Les matériaux magnétiques durs et les matériaux magnétiques doux.

Les matériaux magnétiques durs sont ceux possédant une énergie d'anisotropie magnétocristalline élevée comparée à celle des autres matériaux définis comme doux. Les matériaux durs présentent un cycle d'hystérésis très large ce qui se traduit par une induction rémanente et un champ coercitif importants. Cette catégorie de matériaux trouve ses applications dans la fabrication des aimants permanents où l'on peut citer comme exemples : Les alnico (alliage d'aluminium, de nickel et de cobalt), l'alliage SmCo (samarium-cobalt) ou les NdFeB (neodyme-fer-bore).

Par opposition à cette catégorie d'alliages, on désigne les matériaux à cycle d'hystérésis étroit par le terme de matériaux magnétiques doux. C'est le cas du fer dont le champ coercitif est de quelques ampères par mètre tandis que l'induction rémanente dépasse le tesla.

Les matériaux magnétiques doux trouvent leurs application en régime alternatif, c'est-à-dire dans les moteurs, générateurs et transformateurs.

• Les principaux groupes d'alliages magnétiques doux utilisés en électrotechnique

Le matériau magnétique 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. Ces matériaux présentent des perméabilités magnétiques très grandes et des cycles d'hystérésis de surfaces très réduite. Dans les autres domaines de l'électricité où les fréquences d'utilisation sont plus élevées, on utilise d'autre matériaux magnétiques doux comme les alliages fer-nickel et fer-cobalt.

III.1. L'alliage fer-nickel

Ces propriétés magnétiques varient en fonction du pourcentage de nickel dans le fer, qui varie entre 30 et 80 %. C'est dans cette plage que l'alliage est très malléable, ce qui permet des laminages jusqu'à de très faibles épaisseurs (jusqu'à $\approx 10 \text{ mm}$).

Le fer-nickel à 80 % Ni ou permalloy peut atteindre une perméabilité magnétique maximale de 90000 et un champ coercitif de quelques ampères par mètre. Tandis que le fer-nickel à 50 % Ni peut conduire à une induction à saturation de 1.2 à 1.4 T.

III.2. L'alliage fer-cobalt

Le pourcentage de cobalt peut varier entre 30 et 50 %. L'induction à saturation peut atteindre 2,2 T et une température de Curie de 1084 K. En revanche, l'alliage fer-cobalt présente plusieurs inconvénients qui le confinent à des applications particulières. Son anisotropie et sa magnétostriction sont nettement plus fortes que celles du fer-nickel. Et enfin le cobalt est un métal rare et cher.

III.3. L'alliage fer-silicium

C'est l'alliage le plus largement utilisé dans la construction électrique. Son intérêt réside dans le fait qu'il présente une perméabilité magnétique élevée et un champ coercitif faible ce qui conduit à des pertes par hystérésis très réduites. En outre la résistivité électrique de l'alliage est bien supérieure à celle du fer ce qui entraîne une réduction des pertes par courants de Foucault.

L'alliage fer-silicium est le matériau le plus indiqué pour tous les circuits excités en courant alternatif allant des basses fréquences jusqu'à des centaines voire des milliers de hertz.

III.3.1. Le fer, matériau magnétique de base

Le fer est un métal malléable et ductile. Il a un numéro atomique $Z = 26$ et une masse atomique de 55,85 g, une densité volumique de $7,80 \text{ kg/dm}^3$ et une température de fusion de 1500°C . Sa résistivité électrique vaut $10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ à température ambiante. Ce métal existe en abondance dans la croûte terrestre.

Le fer industriel ou fer technique contient beaucoup d'impuretés et cela a un effet direct sur les propriétés magnétiques : les pertes par hystérésis augmentent et l'induction à saturation diminue. Les impuretés les plus néfastes sont : le carbone, l'azote, le phosphore, l'oxygène et le soufre.

Le fer est à priori un matériau de choix. Il possède en effet une polarisation à saturation de 2,16 T à la température ambiante, une température de Curie élevée (1043 K) et une structure cristalline de symétrie cubique.

III.3.2. Effets des impuretés sur les propriétés magnétiques

La présence des impuretés abaisse la polarisation et dégrade la perméabilité. De plus, le fer pur n'est pas malléable d'où la difficulté de laminage. La solubilité de la plupart des éléments d'impuretés dans le fer est généralement faible, ce qui provoque l'apparition d'inclusions diverses sous forme de carbures, de nitrures, d'oxydes de fer (Fe_3C , Fe_4N , FeO). Ces inclusions freinent le mouvement de déplacement des parois de Bloch, ce qui se traduit par une augmentation des pertes par hystérésis et des échauffements du matériau. Enfin, la précipitation des nitrures provoque également une baisse lente de la perméabilité appelée : vieillissement magnétique.

III.3.3. Influence du silicium sur les propriétés physiques, mécaniques, métallurgiques et magnétiques

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

- Le premier est d'ordre métallurgique. 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. 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 : laminages, affinages, recristallisation.
- La constante K_1 d'anisotropie magnétocristalline à la température ambiante passe de $4,8.10^4 J.m^{-3}$ pour le fer pur à $3,4.10^4 J.m^{-3}$ pour l'alliage à 3,5 % Si [10] ;
- La constante de magnétostriction I_{100} passe de 20.10^{-6} à 5.10^{-6} environ [10] ;
- La résistivité croît rapidement par l'addition du silicium au fer.

Un alliage contenant 3,5 % de silicium est déjà 3 ou 4 fois plus résistif que le fer pur, ce qui réduit dans le même rapport les pertes par courants de Foucault ;

- La polarisation à saturation et la température de Curie ne sont pas trop dégradées, passant respectivement de 2,16 T à environ 2 T et de 771 à 760°C.
- Les techniques classiques de métallurgie ne permettent pas de dépasser un pourcentage de silicium de 3,5 à 4 % . Au-delà, l'alliage devient trop fragile pour subir un laminage. La figure III.1 nous montre les effets de l'addition du silicium au fer.

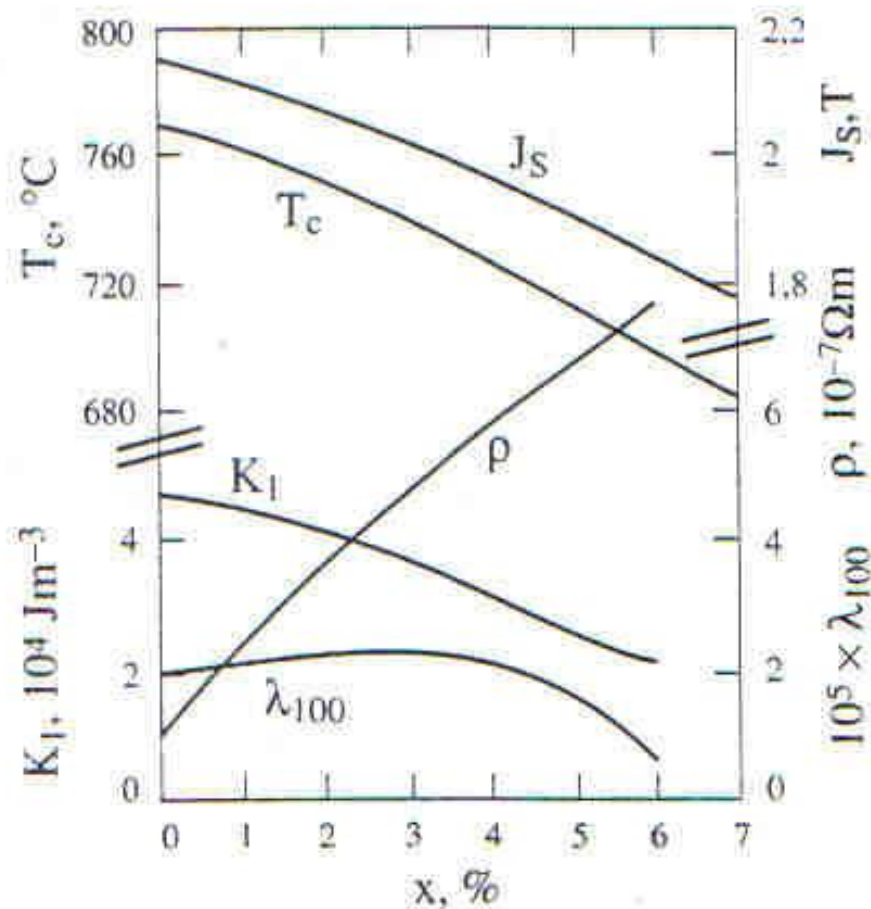


Figure III.1 : Effets de l'addition de silicium sur les propriétés électromagnétiques du fer à 20°C [11].

Avec :

x : pourcentage de silicium (en masse),

K_1 : constante d'anisotropie magnétocristalline,

λ_{100} : magnétostriction,

ρ : résistivité électrique,

J_s : polarisation à saturation ;

T_c : température de Curie.

III.3.4. Le vieillissement magnétique

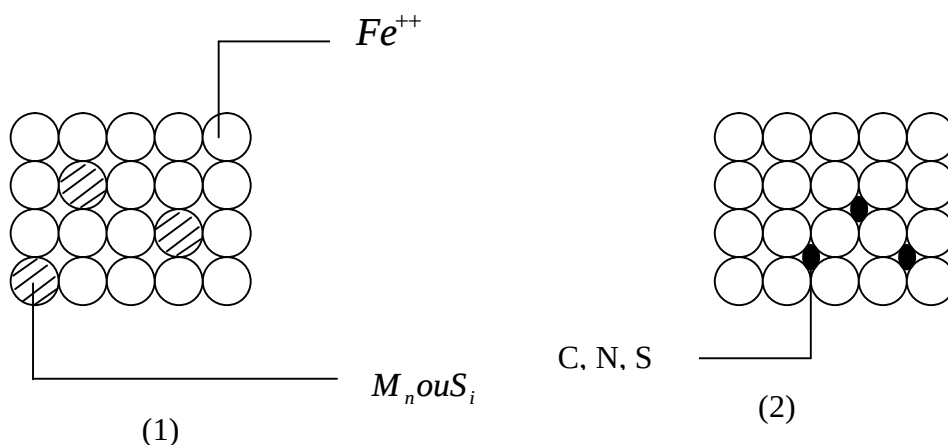
Les performances magnétiques d'un matériau, au bout de 10, 20 ou 30 années de fonctionnement ne sont plus celles qu'il possédait lors de son élaboration en métallurgie.

Le temps influe négativement sur les caractéristiques magnétiques, celles-ci se dégradent progressivement durant les différentes étapes du fonctionnement du matériau. C'est la température qui joue un rôle important dans ce processus.

Les modifications inhérentes à ce phénomène que l'on appelle vieillissement magnétique, se traduisent par une augmentation permanente des pertes. Ce processus de dégradation est la conséquence de l'échauffement des tôles magnétiques ainsi que des alternances d'aimantation et de désaimantation.

Les échauffements du matériau durant les fonctionnements normaux favorisent l'accumulation des impuretés C, O, N. La diffusion de l'azote forme des inclusions Fe_4N (nitrures) qui s'accroissent avec le temps, rendant les processus de dégradation irréversibles.

• Localisation des impuretés dans le réseau cristallin du fer



Les impuretés agissent en :

- (1) : Se substituant à des atomes du corps de base (fer), ce qui provoque la distorsion du réseau cristallin.
- (2) : Formant des précipités Fe_4N , Fe_3C , FeO ou en se fixant dans les interstices du réseau, ce qui accrochera les parois de Bloch et entraînera des efforts locaux importants.

• Rôle bénéfique joué par le silicium

Le silicium joue le rôle d'inhibiteur de ces processus en décomposant la cémentite Fe_3C et les oxydes FeO mais surtout en favorisant la formation de composés Si_3N moins nuisibles que Fe_4N [13].

III.4. Elaboration des tôles magnétiques fer-silicium en métallurgie

Les alliages fer silicium classiques se subdivisent en deux grandes catégories suivant leurs textures en grains orientés ou non.

Dans les transformateurs, le vecteur induction magnétique en chaque point garde une direction fixe et varie de manière sinusoïdale (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 présente 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 de concurrence.

III.4.1. Les tôles fer- silicium à grains non orientés (NO)**III.4.1.1. Procédé de fabrication**

Les opérations successives menant aux produits utilisés sont indiquées sur le tableau III.2.

Tableau III.2 : Principe de fabrication des tôles magnétiques non orientées selon les deux technologies en usage [11].

Elaboration ↓ Coulée continue ↓ Brame ↓ Laminage à chaud ↓ Décapage		
	Production de tôles finies	Production de tôles semi-finies
Opérations effectuées dans l'usine sidérurgique	- Laminage à froid : épaisseur finale + e - Traitement thermique + - Ecrouissage : épaisseur finale - Conditionnement	- Laminage à froid : épaisseur finale - Traitement thermique - Conditionnement
Opérations effectuées chez l'utilisateur	- Découpage - Recuit - Utilisation	- Découpage - Utilisation

III.4.1.2 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 laminier à froid [10].
- Le taux d'aluminium voisin de 0,3 % [10].
- 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 taille pour diminuer l'importance des joints 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 plupart du temps à une orientation préférentielle sensible des grains dans la direction de laminage. La conséquence est une anisotropie des pertes atteignant parfois 20 % [4].

III.4.1.3. Principales caractéristiques normalisée

Les principales caractéristiques des tôles à grains non orientés utilisées dans la construction des machines électriques sont consignées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Caractéristiques magnétiques normalisées de quelques qualités de tôles non orientées [4].

	Epaisseur nominale (mm)	Pertes spécifiques (W/kg) pour $B_{Max}=1,5T$	Induction minimale (en T) pour un champ (en A/m)			Utilisation principale	Dénomination normalisée
			2500	5000	10000		
Qualités "Fully-process"	0,35	2,50	1,49	1,60	1,71	grosses machines tournantes	FeV250-35HA
	0,50	2,70	1,49	1,60	1,71	grosses machines tournantes	FeV270-50HA
	0,50	4,70	1,52	1,62	1,73	moteurs de moyenne puissance	FeV470-50HA
	0,65	6,00	1,54	1,64	1,75	petits moteurs	FeV600-65HA
	0,65	8,00	1,58	1,68	1,76	relais appareillage domestique	FeV800-65HA
Qualités "Semi-process "	0,50	3,90	1,54	1,64	1,75	moteurs de moyenne puissance	FeV390-50HE
	0,50	6,60	1,6	1,70	1,80	petits moteurs	FeV660-50HD
	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	FeV1000-65HD

III.4.1.4. Produits finis ; semi-fini ; épaisseur conventionnelles

• Produits finis

On appelle produit fini ou tôle livrée après recuit final (fully-process), un matériau qui possède toutes ses caractéristiques magnétiques à l'état de livraison par le

sidérurgiste. Il n'est donc pas nécessaire de faire un traitement thermique après découpage chez l'utilisateur.

- **Produits semi-finis**

On appelle produit semi-fini ou tôle livrée à l'état semi-fini (semi-process), une tôle qui ne possède pas encore ses propriétés magnétiques garanties à l'état de livraison par le sidérurgiste. Après découpage, elle doit subir un traitement thermique.

- **Épaisseurs conventionnelles [4]**

Les épaisseurs utilisées varient de 0,7 mm pour les qualités les moins nobles contenant peu de silicium jusqu'à 0,35 mm pour les qualités les plus performantes. Les épaisseurs les plus utilisées en France sont 0,5 mm et 0,65 mm pour les gros moteurs.

III.4.1.5. Isolation des tôles

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

III.4.1.6 Utilisation

Les tôles NO sont disponibles sous deux formes nommées "fully-process" et "semi-process", selon que le matériau a déjà ses caractéristiques magnétiques optimales ou ne les obtiendra qu'après un traitement thermique final effectué par l'utilisateur. On emploie les tôles "fully-process" dans trois grandes catégories d'appareillages :

- Les machines tournantes (moteurs, dynamos, alternateurs) qui constituent l'utilisation principale ;
- Les transformateurs de faible puissance ;
- Certains dispositifs comme les contacteurs ou compteurs électriques, où l'on met à profit leurs caractéristiques quasi-statiques. L'électroménager et l'automobile (moteurs, transformateurs, alternateurs) sont des domaines privilégiés d'utilisation des tôles "semi-

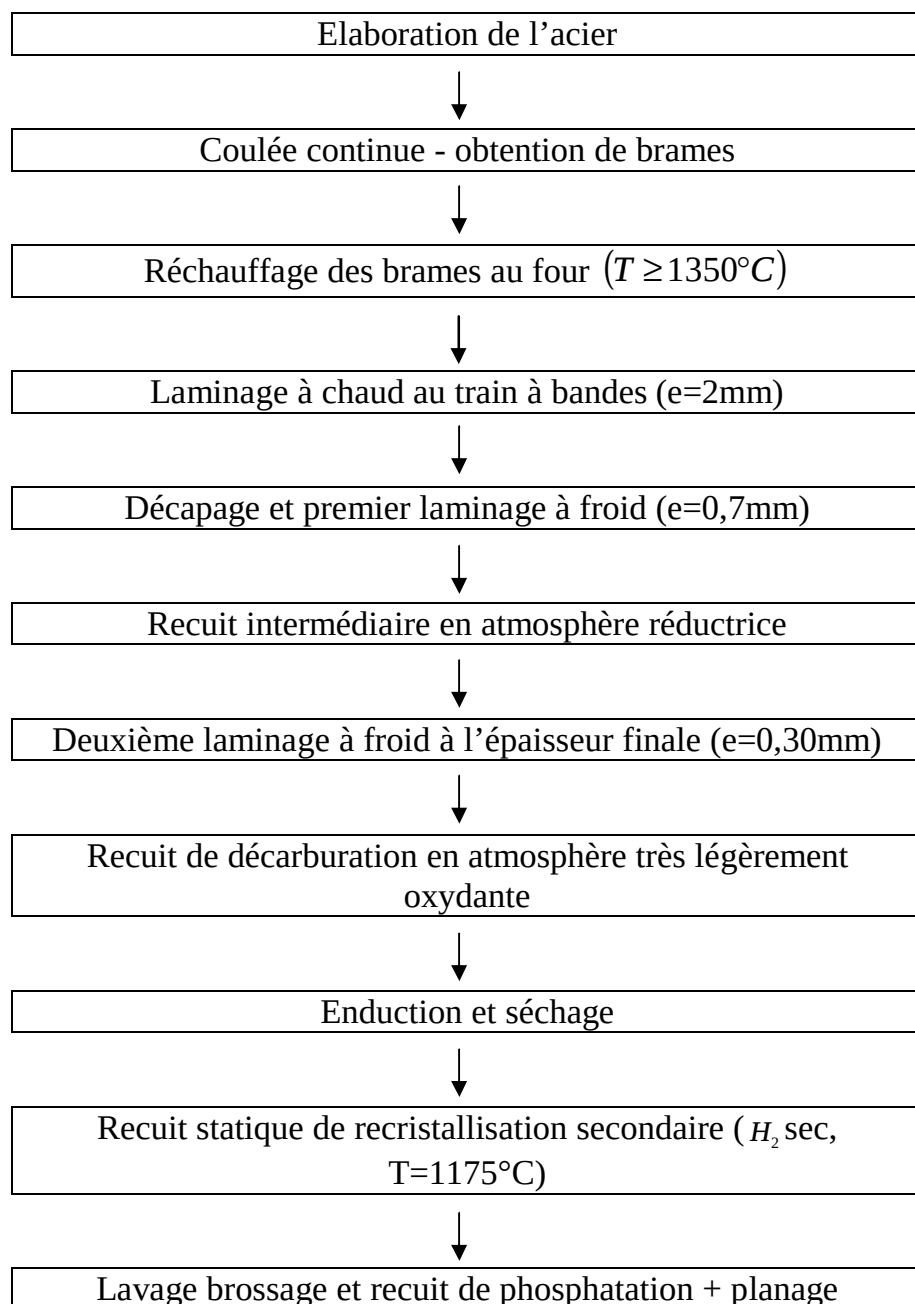
process". On emploie également celles-ci dans les machines tournantes de puissance inférieure à une vingtaine de kW.

III.4.2. Les tôles fer- silicium à grains orientés (GO)

III.4.2.1. Elaboration

Les grandes étapes de la fabrication des tôles fer silicium à grains orientés sont rapportées au tableau III.4.

Tableau III.4 : Principe de fabrication des tôles magnétiques à grains orientés classiques [4].



II.4.2.2. Propriétés [4]

Le caractère spécifique de ces tôles réside dans leur texture cristalline. Tous les cristaux cubiques centrés que compte la tôle ont des orientations très voisines d'une orientation idéale, qu'on appelle l'orientation Goss, ou (100) [001] en notations de Miller (figure III.2). Ainsi la direction de laminage, dans le plan de la tôle, est toujours très voisine d'une arête du cube, qui est aussi une direction de facile aimantation. Il apparaît alors dans la tôle une structure en domaines principaux réguliers en bandes parallèles, d'aimantations alternées, séparés par des parois de Bloch à 180° très mobiles. Cette tôle acquiert donc très facilement une aimantation importante parallèlement à sa direction de laminage et ses pertes sont faibles.

Direction de laminage $\langle 001 \rangle$

Direction transversale (110)

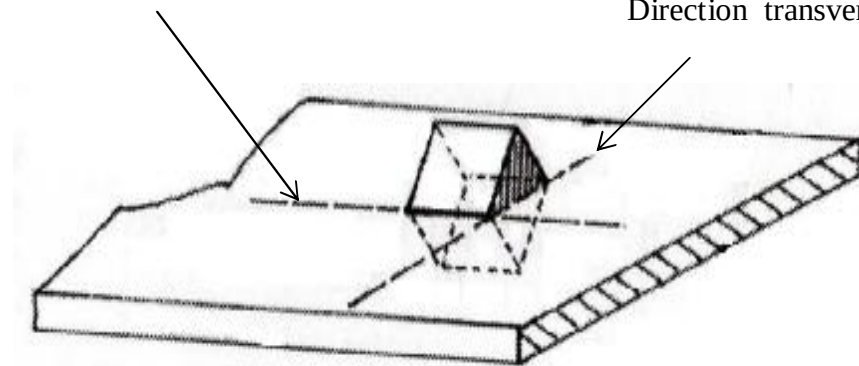


Figure III.2 : Orientation des grains dans une tôle de type GO, où D.L désigne la direction de laminage et D.T la direction transversale : cas d'une orientation Goss idéale, ou (110) [001] [4].

III.4.2.3. Utilisation

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

III.4.2.4. Epaisseurs conventionnelles et caractéristiques selon EURONORM

• Epaisseur conventionnelles [11]

Les épaisseurs disponibles varient respectivement de 0,23 à 0,35 mm (aciers classiques) et de 0,23 à 0,30 mm (aciers à haute perméabilité). Les tôles classiques d'épaisseur 0,23 mm sont commercialisées depuis plusieurs années. Les tôles à haute perméabilité de même épaisseur sont en cours de développement industriel et commercial en Europe. La réduction de l'épaisseur nécessite une maîtrise plus grande de l'orientation des grains.

• Caractéristiques selon EURONORM [4]

Les Caractéristiques magnétiques essentielles de quelques qualités de tôles à grains orientés qui diffèrent par leurs épaisseurs et l'acuité de leurs textures respectives sont rapportées dans le tableau III.5. Pour une épaisseur donnée, toute amélioration de la texture entraîne 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 800 A m^{-1} .

Tableau III.5 : Caractéristiques de quelques tôles fer-silicium à grains orientés [4].

	Epaisseur nominale (en mm)	Pertes spécifiques $J_{Max}=1,7 \text{ T}$, 50 Hz (en W.kg^{-1})	Puissance apparente spécifique $J_{Max}=1,7 \text{ T}$, 50 Hz (en V.Akg^{-1})	Polarisation J_{800} (en T)
Tôles "classiques"	0,35 (M6)	1,50	3,00	1,75
	0,30 (M5)	1,25	2,70	1,84
	0,23 (M3)	1,07	2,60-2,70	1,84
Tôles A "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

III.4.2.5. Isolation

Les tôles à grains orientés reçoivent un revêtement minéral isolant. Pour les tôles classiques, il s'agit d'un silicate de magnésium appelé forstérite (Mg_2SiO_4), qui a subi une phosphatation, ce revêtement isolant est à la fois très mince (2 à 5 mm) et très adhérent. En pratique, un bon revêtement isolant entraîne une diminution des pertes.

III.4.3. Tôles spécifiques

III.4.3.1. Les tôles fer-silicium de faibles épaisseurs [10]

Lorsque la fréquence de travail s'accroît (ce qui est le cas de beaucoup de dispositifs 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 d qui constitue une donnée essentielle présidant au choix d'une épaisseur de tôle. La profondeur de peau, peut être calculée à partir de l'expression :

$$d = \left(\frac{r}{p.m.f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}) \quad (\text{III-1})$$

Avec :

r : La résistivité électrique en ($\Omega.m$) ;

f : La fréquence en(Hz) ;

m : La perméabilité magnétique en ($H.m^{-1}$).

En général, on choisit une épaisseur de tôle e voisine de l'épaisseur de peau d . 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 tournant à vitesse élevée, machines spéciales à grand nombre de pôles, convertisseurs fonctionnant aux fréquences moyennes (400 Hz à 10kHz).

Les pertes spécifiques d'une tôle à grains orientés d'épaisseur 0,10 mm pour différentes fréquences de travail en fonction de l'induction crête de travail utilisée sont indiquées sur la figure III.3.

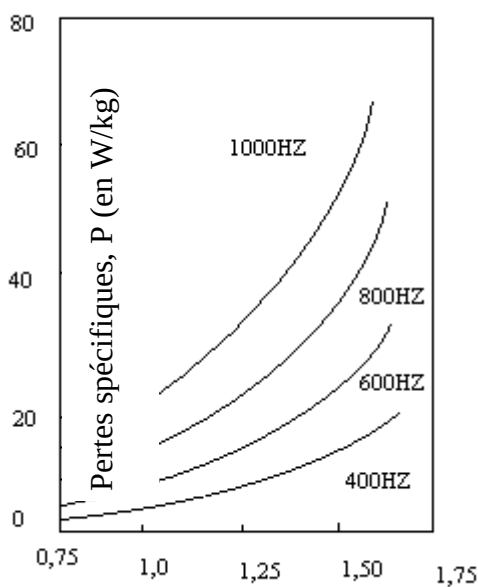


Figure III.3 : Pertes spécifiques d'une tôle fer silicium mince (3 % en poids, $e=0,10$ m), à grains orientés [4].

Les pertes spécifiques pour quelques épaisseurs sont consignées dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Pertes spécifiques des tôles fer silicium minces à 3 % de silicium [4].

Types de tôles	Qualités à grains orientés Si=3 %	Qualités à grains orientés Si=3,2 %
	Pertes spécifiques à 400 Hz et $B_{Max}=1,5$ T (en W/kg)	Pertes spécifiques à 400 Hz et $B_{Max}=1$ T (en W/kg)
$e=0,05$ mm	19	/
$e=0,10$ mm	15	14
$e=0,15$ mm	16,5	15
$e=0,20$ mm	/	15

III.4.3.2. Les tôles fer silicium à haute perméabilité [12]

Les tôles magnétiques à haute perméabilité peuvent atteindre des inductions de près de 2 T sous un champ d'excitation de 800 A/m et des pertes massiques sensiblement

égales à 1 W/kg pour des inductions de travail de 1,7 T. Ces remarquables résultats sont dûs 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, l'étain ou le traitement par faisceau laser de la surface de la tôle. A titre indicatif : pour une tôle de 0,30 mm d'épaisseur, le constructeur garantit (norme CE,404-8-7) : des pertes maximales de 1,05 W/kg sous une induction de 1,7 T et une induction minimale de 1,92 T sous un champ de 800 A/m.

III.4.3.3. Les tôles fer silicium à % de silicium $\text{Si} \geq 6 \%$ [10]

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 magnétocristalline évoluent aussi de façon favorable, passant respectivement de $4,8 \cdot 10^4$ à $2 \cdot 10^4 \text{ J.m}^{-3}$ et de 10^{-7} à $7 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ (figure III.1). Un autre avantage est la réduction des effets de vieillissement magnétique par piégeage des impuretés interstitielles, notamment du carbone. En revanche, la fragilisation très importante de l'alliage interdit les processus de laminage.

Deux technologies sont utilisées pour obtenir des alliages fer silicium contenant un excès de silicium :

- Alliages obtenus par solidification rapide.
- Alliages enrichis par diffusion.

III.4.3.4 Les tôles fer silicium " Hi-B " [10]

Les tôles fer silicium " Hi-B " sont à haute perméabilité, d'épaisseur 0,23 à 0,30 mm, sont obtenues par un laminage à froid vers 250°C, unique mais très énergique, avec un taux de réduction supérieur à 80 %. Après recristallisation secondaire, la taille des grains peut atteindre 30 mm. La tôle reçoit finalement un enduit phosphatant contenant de la silice sous forme colloïdale. Au-delà de sa fonction protectrice et isolante, ce revêtement joue un rôle important dans les propriétés magnétiques.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. Cadre d'Epstein

IV.1.1. Description du cadre d'Epstein

Le cadre d'Epstein (figure IV.1) contenant les tôles à mesurer constitue un transformateur, avec les bobinages primaire et secondaire. 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 $280 \times 30 \text{ mm}^2$. Une inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air est présente au centre du cadre. Les enroulements sont répartis uniformément et des bornes d'alimentation et de mesure sont raccordées à leurs extrémités. L'enroulement d'alimentation (primaire) est bobiné à l'extérieur tandis que l'enroulement de tension (secondaire) est bobiné à l'intérieur. L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle est connecté en série avec l'enroulement primaire du cadre d'Epstein, alors que l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est connecté en opposition avec l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein. 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 (figure IV.2). 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'enroulement, par contre nous avons une double épaisseur de matière. Des mesures sont 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, la longueur conventionnelle du circuit $l_m = 0,94 \text{ m}$.

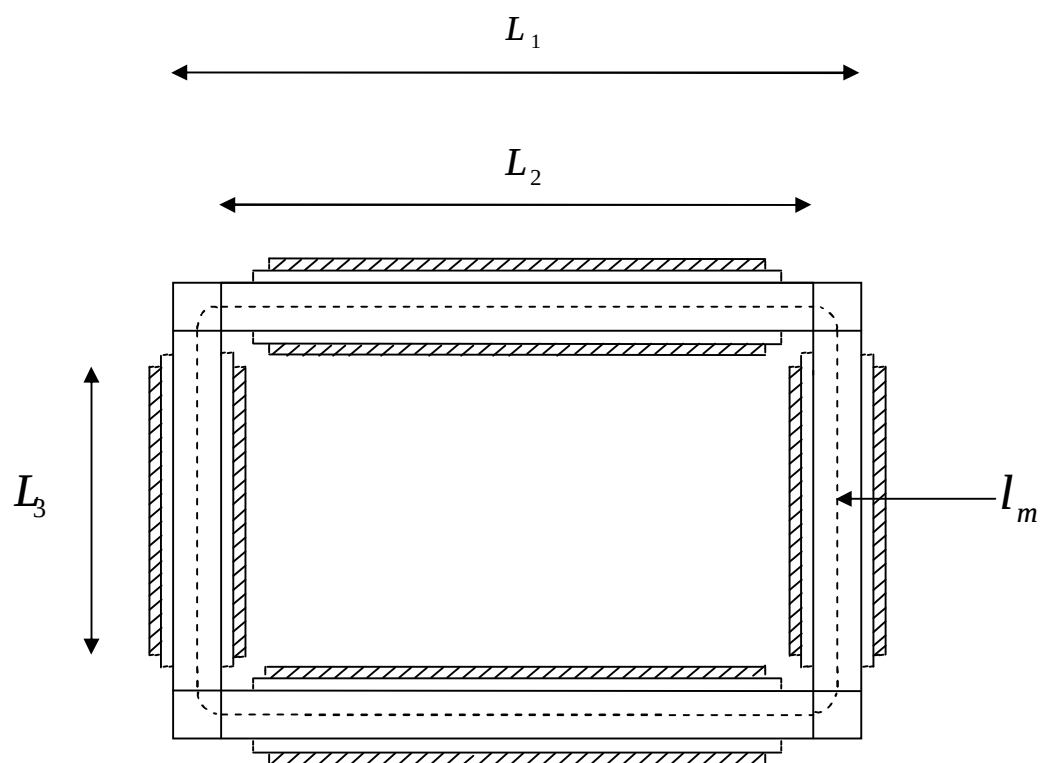


Figure IV.1 : Schéma général d'un cadre d'Epstein.

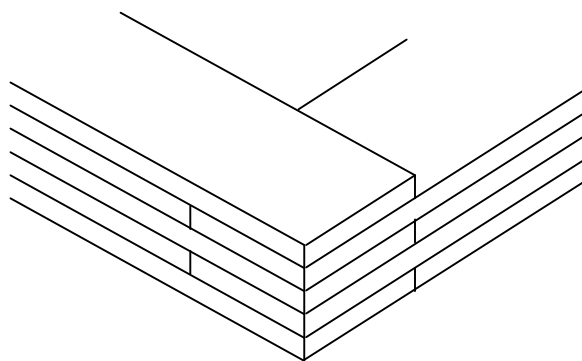


Figure IV.2 : Disposition des tôles en joints à double recouvrement.

IV.1.2. Caractéristiques du cadre d'Epstein utilisé

Le cadre d'Epstein utilisé est à 25 cm de côté et possède les caractéristiques suivantes :

- Enroulement primaire (excitation) $N_1 = 700$ spires ;
- Enroulement secondaire (mesure) $N_2 = 700$ spires ;
- Longueur du côté extérieur du cadre : $L_1 = 280$ mm ;
- Longueur du côté intérieur du cadre : $L_2 = 220$ mm ;
- Longueur de la partie bobinée : $L_3 = 190$ mm ;
- Longueur moyenne du circuit magnétique : $l_m = 0.94$ m.

IV.2. Echantillons étudiés

Nos essais ont été effectués sur trois types de tôles :

- 1) Tôles Fer-Silicium à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal du laminage.
- 2) Tôles Fer-Silicium à grains non orientés découpées dans le sens transversal du laminage.
- 3) Tôles Fer-Silicium à grains orientés.

Les tôles sont étudiées sans n'avoir subi aucune contrainte thermique dans un premier temps puis après avoir subi une contrainte thermique de 225°C durant 24 heures et puis pendant 168 heures.

Les grandeurs caractérisant ces échantillons sont données dans les tableaux IV.1 à IV.3.

Tableau IV.1 : Propriétés des tôles Fe-Si à grains non orientés (NO) découpées dans le sens longitudinal du laminage

Type de matériau	Fe-Si à grains non orientés
Nombre de tôles	16
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)	0,505
Section droite s d'un coté du cadre s (m ²)	60.10^{-6}
Masse volumique (kg/dm ³)	7,69
Volume V (m ³)	$67,2.10^{-6}$

Tableau IV.2 : Propriétés des tôles Fe-Si à grains non orientés (NO) découpées dans le sens transversal du laminage

Type de matériau	Fe-Si à grains non orientés
Nombre de tôles	16
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)	0,505
Section droite s d'un coté du cadre s (m ²)	60.10 ⁻⁶
Masse volumique (kg/dm ³)	7,69
Volume V(m ³)	67,2.10 ⁻⁶

Tableau IV.3 : Propriétés des tôles Fe-Si à grains orientés (GO) vierges.

Type de matériau	Fe-Si à grains orientés
Nombre de tôles	24
Type de tôles	M150 30S
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)	0,462
Section droite s d'un coté du cadre s (m ²)	54.10 ⁻⁶
Masse volumique (kg/dm ³)	7,65
Pertes spécifiques (W/kg)	B=1,5 T : 0,69 B=1,7T : 0,90
B(T) pour H=800A/m	2,07
Volume V(m ³)	60,48.10 ⁻⁶

IV.3. Mesure de la perméabilité relative en continu

Dans cette partie, on s'intéressera à la perméabilité relative en continu des tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et transversal ainsi que des tôles à grains orientés. Ces tôles sont, dans un premier temps non traitées c'est-à-dire elles n'ont subi aucune contrainte thermique. Les tôles sont ensuite soumises à une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures puis pendant 168 heures.

Le schéma du dispositif expérimental utilisé dans cette partie est représenté sur la figure IV.3. Ce dispositif comporte :

- Un transformateur d'isolement et un auto-transformateur ;
- Un Cadre d'Epstein ;

- Un rhéostat
- Un fluxmètre ;
- Un inverseur ;
- Deux ampèremètres numériques à plusieurs calibres ;
- Une source de tension continue variable ;
- Une bobine de 5 spires.

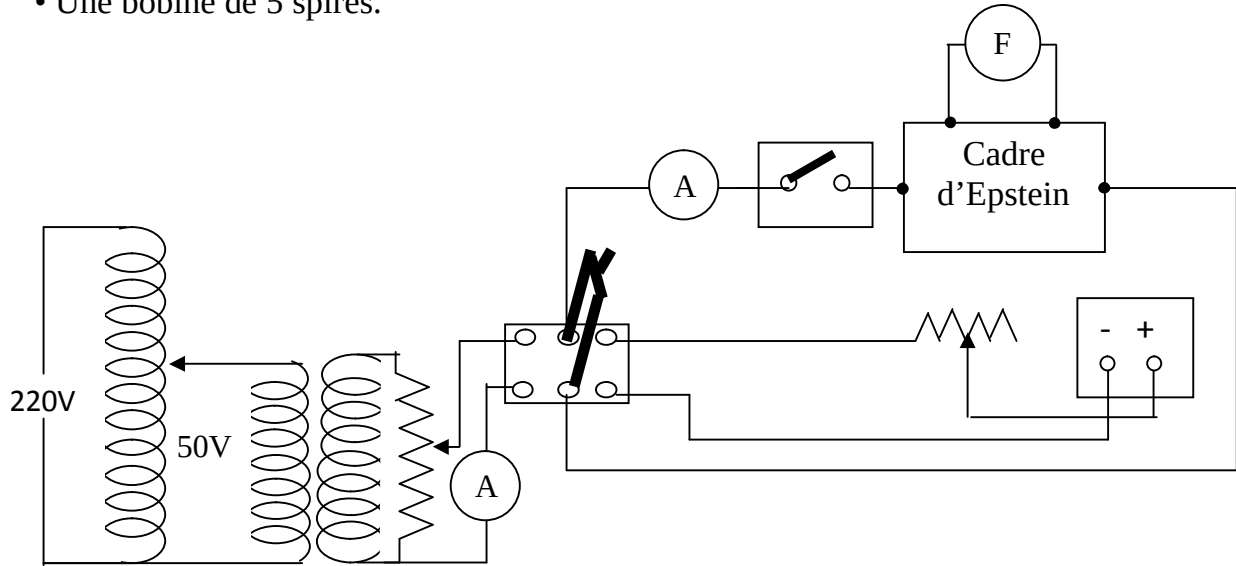


Figure IV.3. Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la perméabilité en continu

A l'aide de l'inverseur, on se met sur la source continue et on fixe une valeur du courant puis on passe à la source à courant alternatif en utilisant l'inverseur, on fixe un courant dont la valeur efficace est égale à la valeur fixée en continu puis on diminue progressivement le courant jusqu'à atteindre la valeur zéro. On aura ainsi démagnétisé l'échantillon. On ouvre l'inverseur, on réinitialise le fluxmètre, on passe de nouveau sur la source à courant continu puis on relève la valeur du flux. On suit la même procédure pour plusieurs valeurs du courant et pour chaque valeur, on relève la valeur du flux correspondante.

Les valeurs du champ magnétique H et de l'induction magnétique B sont déduites à partir des relations suivantes :

$$H = \frac{N_1}{l_m} \cdot I \quad (\text{IV.1})$$

$$B = \frac{\Phi}{S \cdot N_b} \quad (\text{IV.2})$$

Avec

Φ : flux mesuré par le fluxmètre en (Wb) ;

S : section droite d'un coté du cadre en (m^2) ;

N_b : nombre de spire de la bobine enroulée sur les tôles afin de capter le flux ($N_b=5$ spires).

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

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0.H} \quad (IV.3)$$

IV.3.1. Tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal du laminage

On remplit le cadre d'Epstein avec 16 tôles à raison de 4 tôles par côté. La courbe de la perméabilité relative en continu en fonction du champ magnétique est représentée sur la figure IV.4. La perméabilité relative augmente rapidement et passe par un maximum de 10923 correspondant à un champ magnétique de 58,38 A/m, pour l'échantillon n'ayant pas subi la contrainte thermique. Le maximum est de 10692 sous un champ de 75,17 A/m, pour l'échantillon ayant subi une contrainte thermique de 225°C, pendant 24 heures. Ce maximum est de 10361 sous 55,53 A/m, pour l'échantillon qui a subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures.

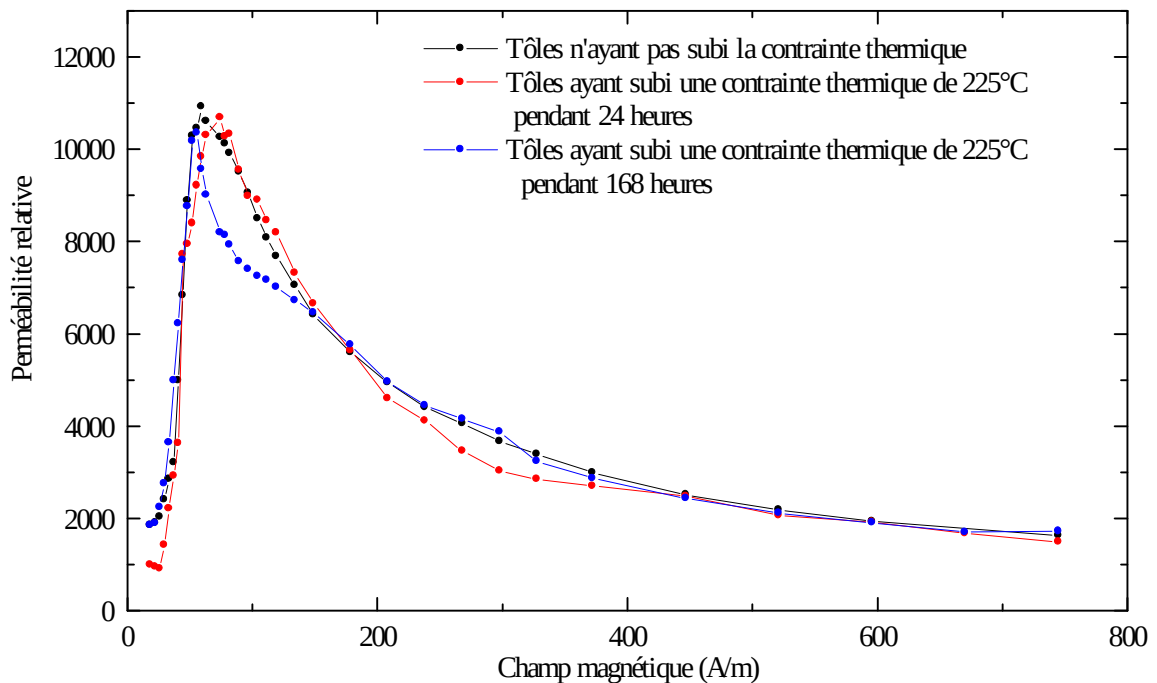


Figure IV. 4. Perméabilité relative en continu des tôles à grains non orientés (NO) découpées dans le sens longitudinal.

IV.3.2. Tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens transversal du laminage

On remplit le cadre de la même manière que pour les tôles précédentes (& IV.3.1). Le tracé de la perméabilité relative en fonction du champ magnétique est représenté sur la figure (IV.5).

La perméabilité relative augmente jusqu'à une valeur maximale de 4070 correspondant à un champ de 157.87 A/m pour l'échantillon n'ayant pas subi une contrainte thermique. Le maximum de perméabilité est de 3938 sous un champ de 156,45 A/m pour l'échantillon ayant subi une contrainte de 225°C pendant 24 heures. Le maximum est de 3883 sous 169.04 A/m pour l'échantillon ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures.

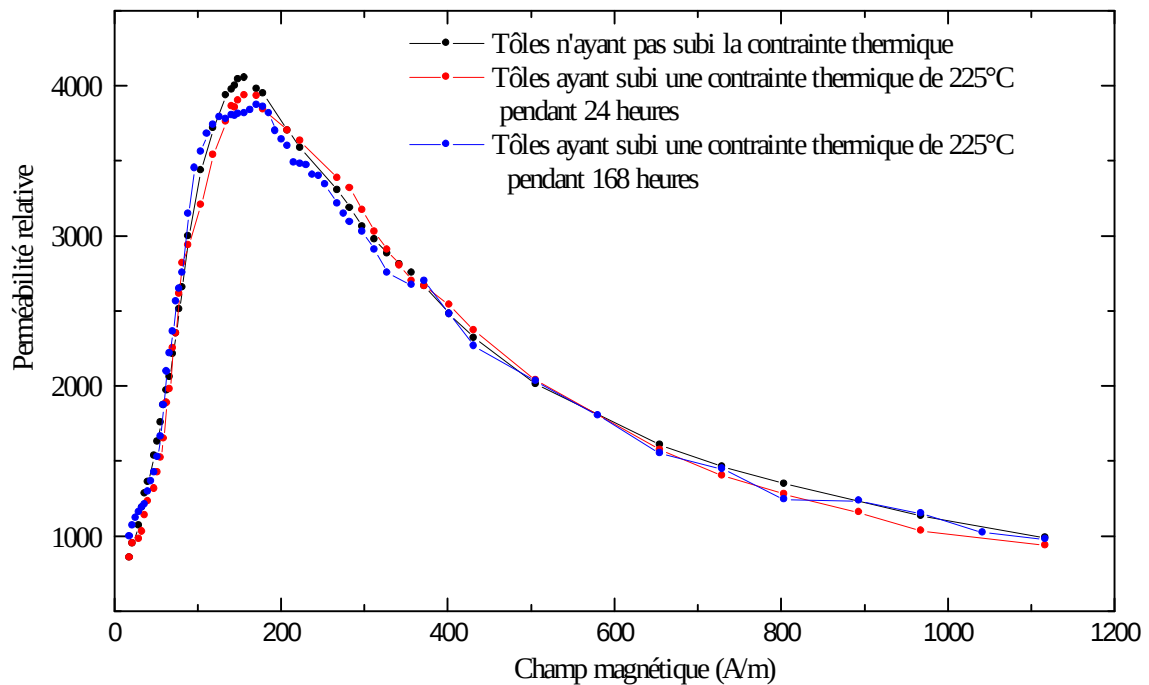


Figure IV.5. Perméabilité relative en continu des tôles à grains non orientés (NO) découpées dans le sens Transversal.

La perméabilité magnétique des tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal du laminage est nettement supérieure à celle concernant les tôles Fe-Si à grains non orientés découpées dans le sens transversal du laminage. Ce résultat est tout à fait conforme aux prévisions théoriques puisque le sens du laminage correspond au sens de facile aimantation de la tôle.

IV.3.3. Tôles Fe-Si à grains orientés

On remplit le cadre d'Epstein avec 24 tôles à raison de 6 tôles par côté. Sur la figure IV.6 est représentée la perméabilité relative en fonction du champ magnétique.

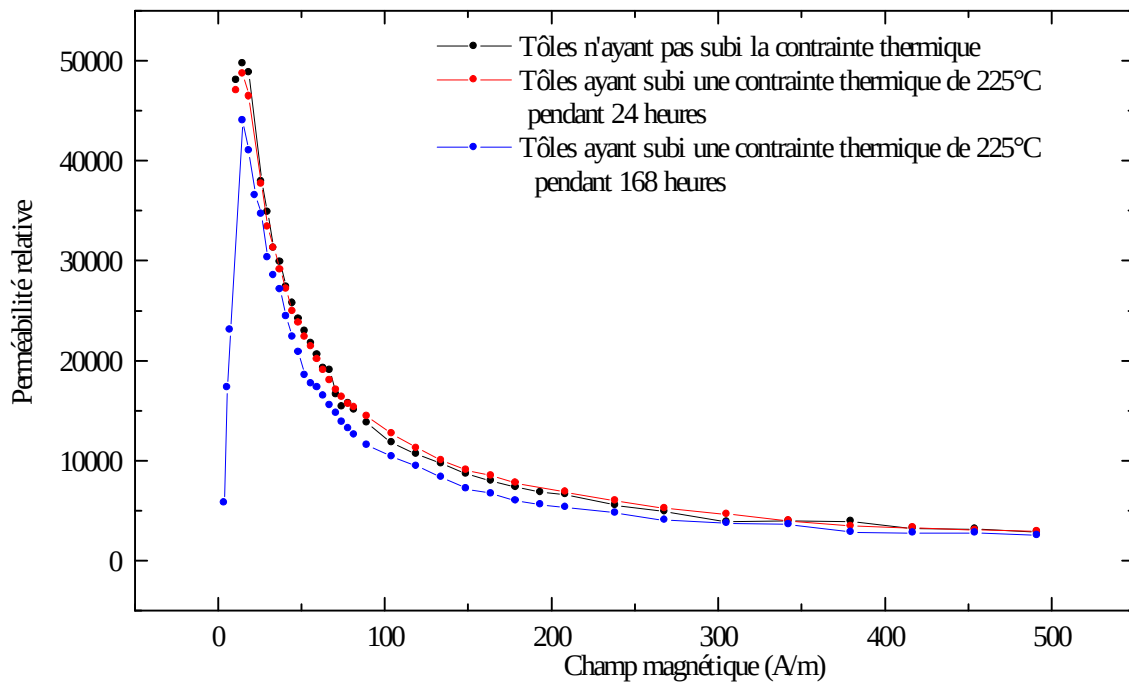


Figure IV.6. Perméabilité relative en continu des tôles à grains orientés (GO)

La valeur de la perméabilité relative est maximale et elle vaut 49851 sous un champ de 14.1 A/m, pour l'échantillon n'ayant pas subi la contrainte thermique. La valeur de la perméabilité relative maximale est de 48683 sous un champ de 13.49 A/m pour l'échantillon ayant subi une contrainte thermique de 225°C, pendant 24 heures. Pour l'échantillon ayant subi une contrainte thermique de 225°C, pendant 168 heures, la perméabilité relative maximale est de 43890 sous un champ de 14.81 A/m.

IV.4. Mesure de la perméabilité relative en alternatif

La perméabilité relative en alternatif a été mesurée pour les mêmes échantillons que ceux étudiés sous tension continue.

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure IV.7. Il comporte :

- Un transformateur d'isolement et un auto-transformateur ;
- Un cadre d'Epstein ;
- Un rhéostat de type 10 Ω .
- Un rhéostat de type de 5 Ω et 10 A ;
- Un ampèremètre numérique à plusieurs calibres ;

- Un voltmètre numérique à plusieurs calibres ;

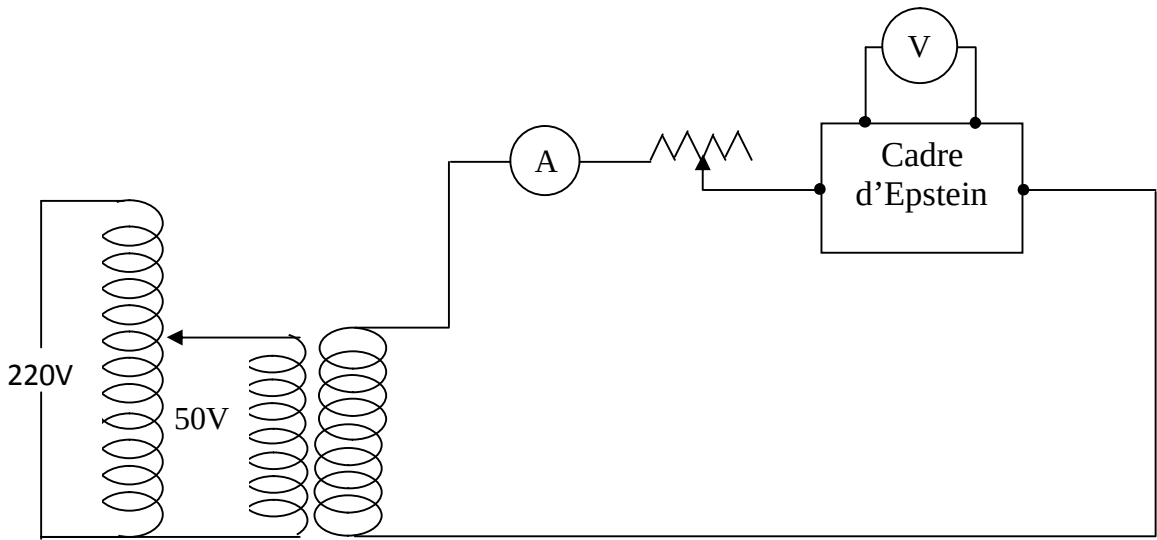


Figure IV.7. Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la perméabilité en alternatif.

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 :

$$B_{max} = \frac{V_{eff} \cdot \sqrt{2}}{N_2 \cdot w \cdot S} \quad (IV.4)$$

$$H = I \cdot \frac{N_1}{l_m} \quad (IV.5)$$

Avec V_{eff} : La tension lue sur le voltmètre.

La perméabilité en alternatif en fonction du champ magnétique est donnée sur les figures IV.8 et IV.9 pour les tôles à grains non orientées découpées dans le sens longitudinal et transversal respectivement. Sur la figure IV.10 est donnée la perméabilité relative des tôles à grains orientés. Les essais ont été réalisés sur les tôles non traitées et les tôles ayant subi un échauffement sous 225°C pendant 24 heures et 168 heures.

Le maximum de la perméabilité relative des tôles à grains orientés découpées dans le sens longitudinal présente une augmentation suite à un chauffage de 24 heures sous 225°C. Ce maximum diminue pour un temps de chauffage de 168 heures tout en restant supérieur à celui donné pour les tôles vierges.

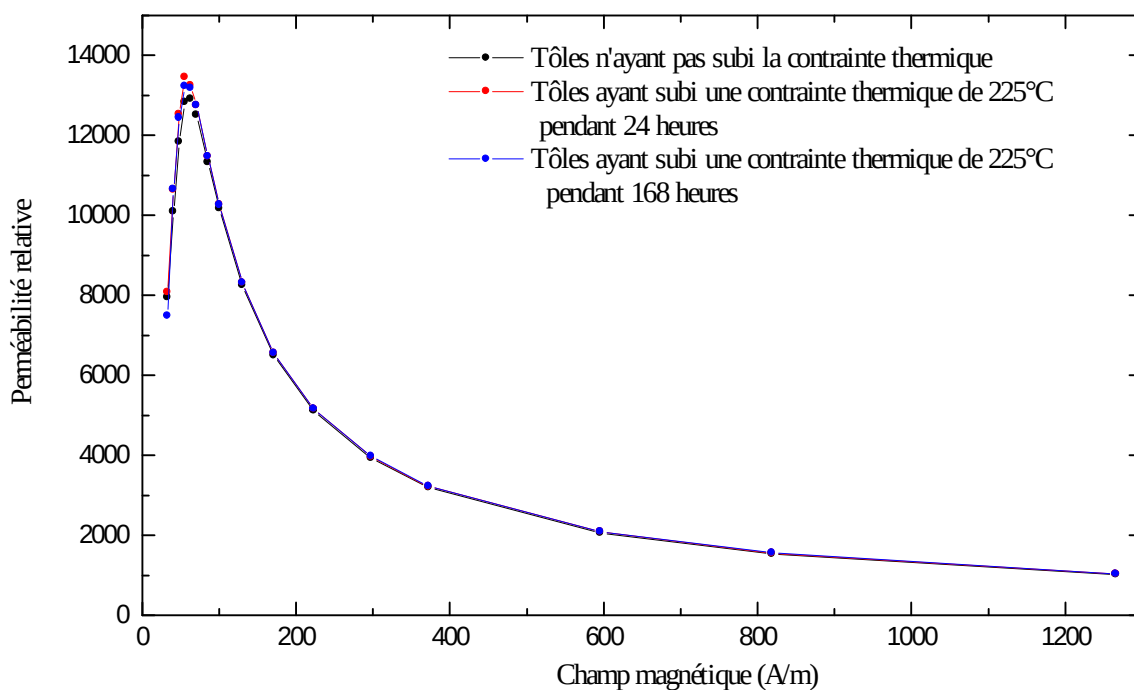


Figure IV.8. Perméabilité relative en alternatif des tôles à grains non orientées (NO) découpées dans le sens longitudinal.

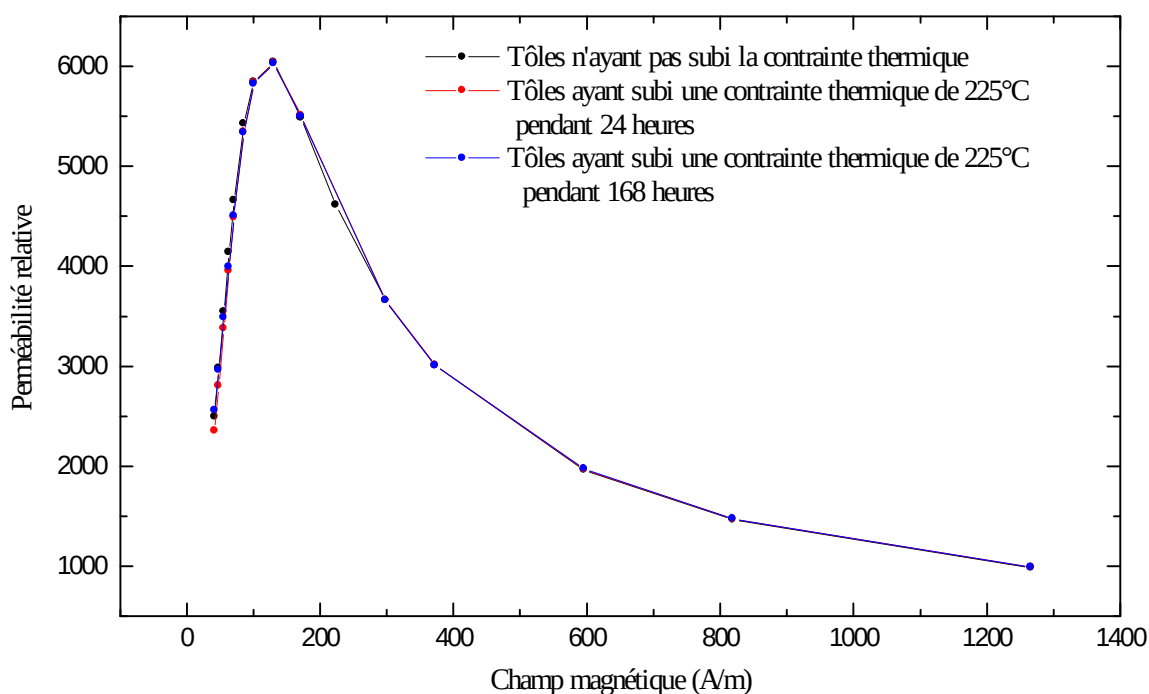


Figure IV.9. Perméabilité relative en alternatif des tôles à grains non orientés (NO) découpées dans le sens transversal.

Pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal, les trois maxima sont presque confondus et ont une valeur de l'ordre de 6044 pour un champ magnétique de 128.83 A/m.

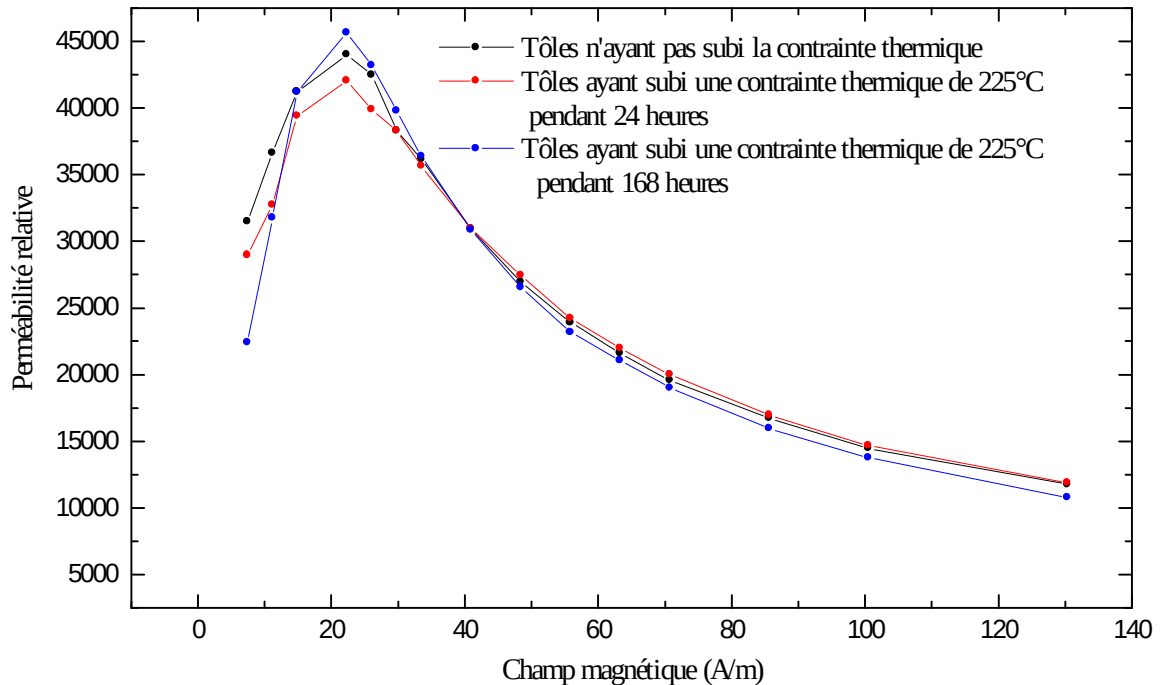


Figure IV.10. Perméabilité relative en alternatif des tôles à grains orientés (GO)

La figure IV.10 montre que le maximum de la perméabilité relative des tôles à grains orientés ayant subi une contrainte thermique pendant 24 heures diminue. Ce maximum augmente ensuite pour les tôles ayant subi une contrainte thermique pendant 168 heures et passe au dessus de celui correspondant aux tôles vierges.

IV.5. Forme du courant et de l'induction magnétique

Le montage utilisé pour la visualisation des formes du courant et de la tension ainsi que des cycles d'hystérésis est représentés sur la figure IV. 11. La forme du courant est déduite de la tension aux bornes de la résistance r et celle de l'induction magnétique est tirée de la tension aux bornes du condensateur de capacité C .

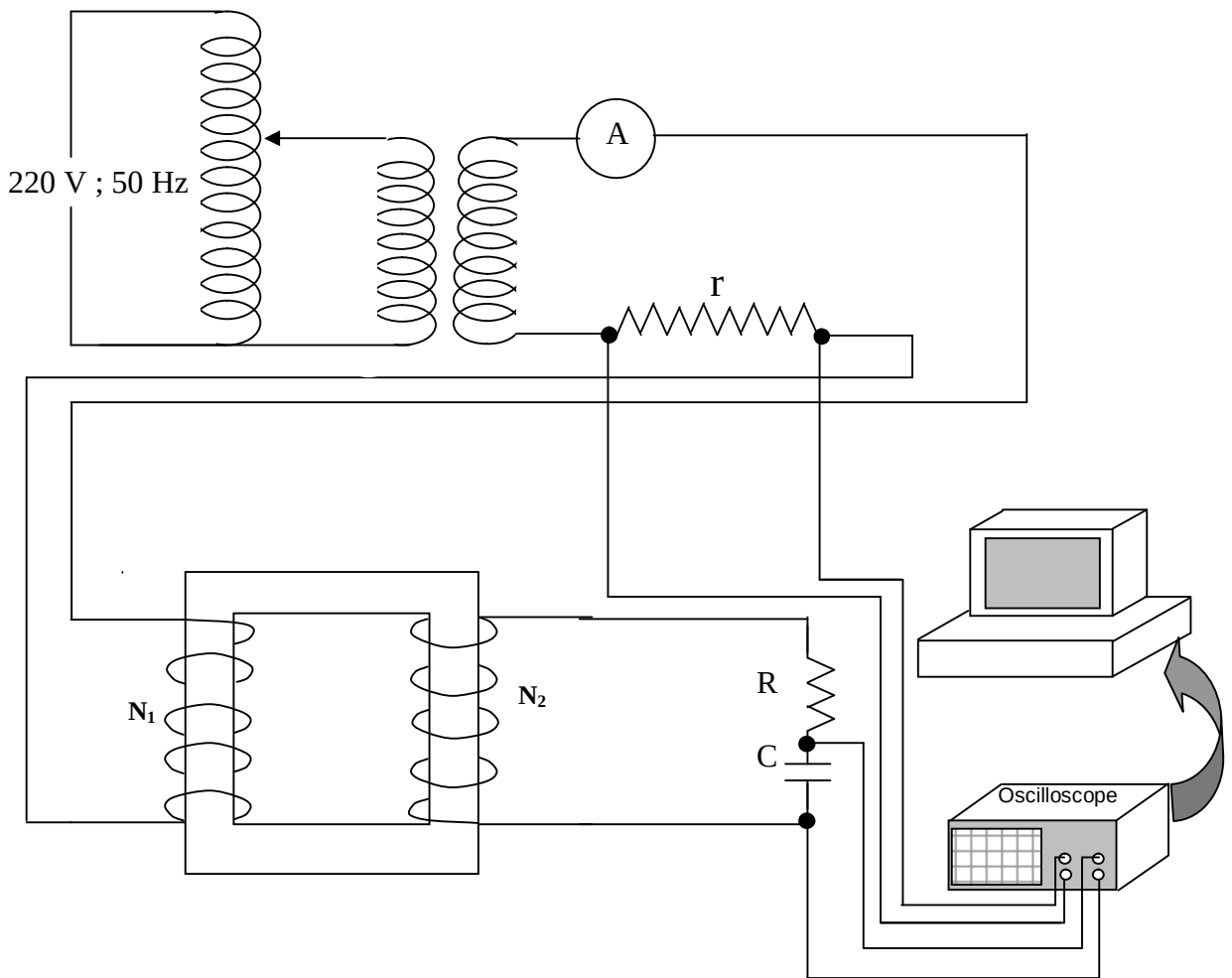


Figure IV.11. Montage utilisé pour la visualisation de la forme du courant et de l'induction magnétique.

IV.5.1. Forme de l'induction magnétique

IV.5.1.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal

Nous présentons sur les figures IV.12 à IV.17, les formes de l'induction magnétique pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal avec des inductions maximales de 1 T et 1.5 T.

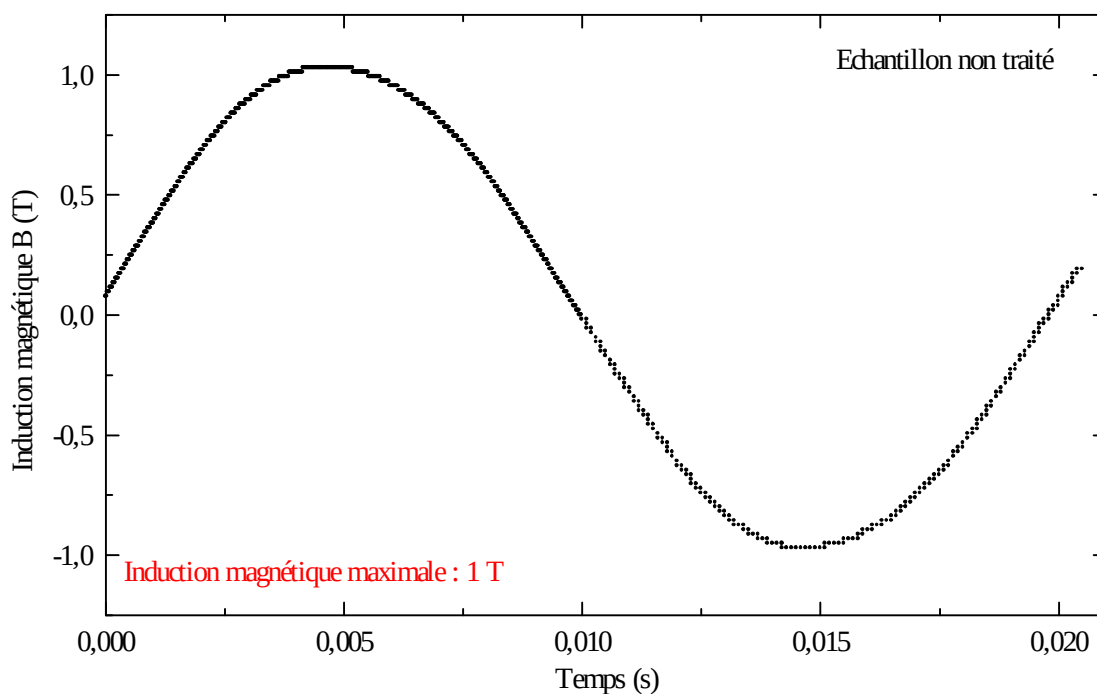


Figure IV. 12: Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1T)
Echantillon n'ayant subi aucune contrainte thermique.

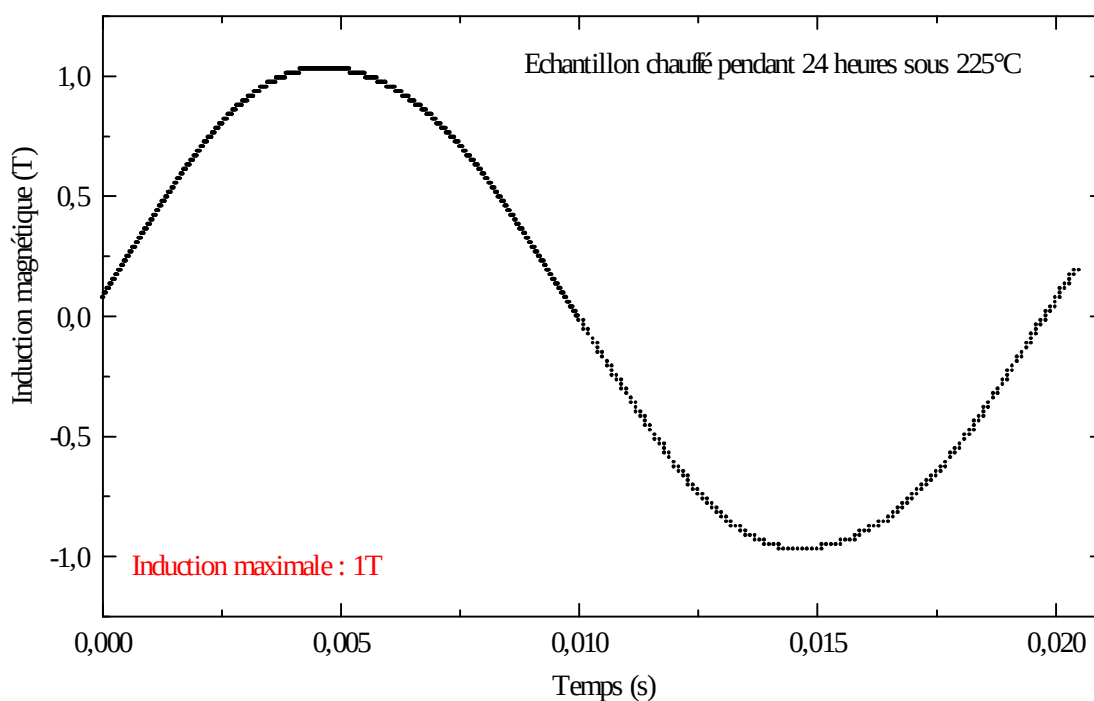


Figure IV. 13 : Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1T)
Tôles chauffées pendant 24 heures sous 225°C.

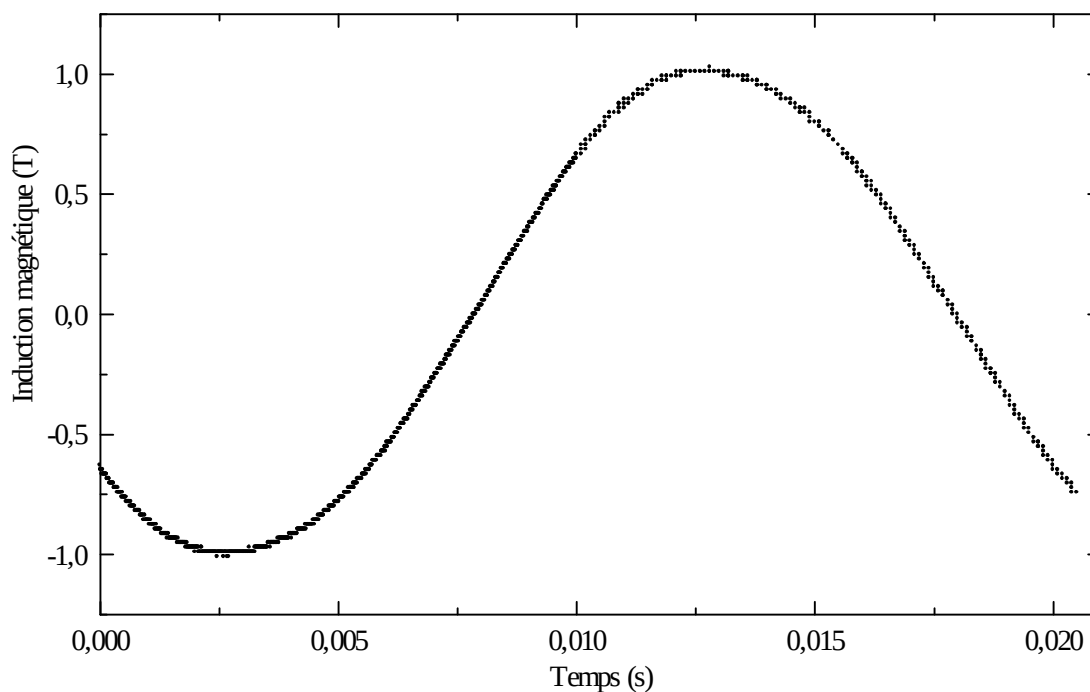


Figure IV.14 : Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1T)
Tôles chauffées pendant 168 heures sous 225°C.

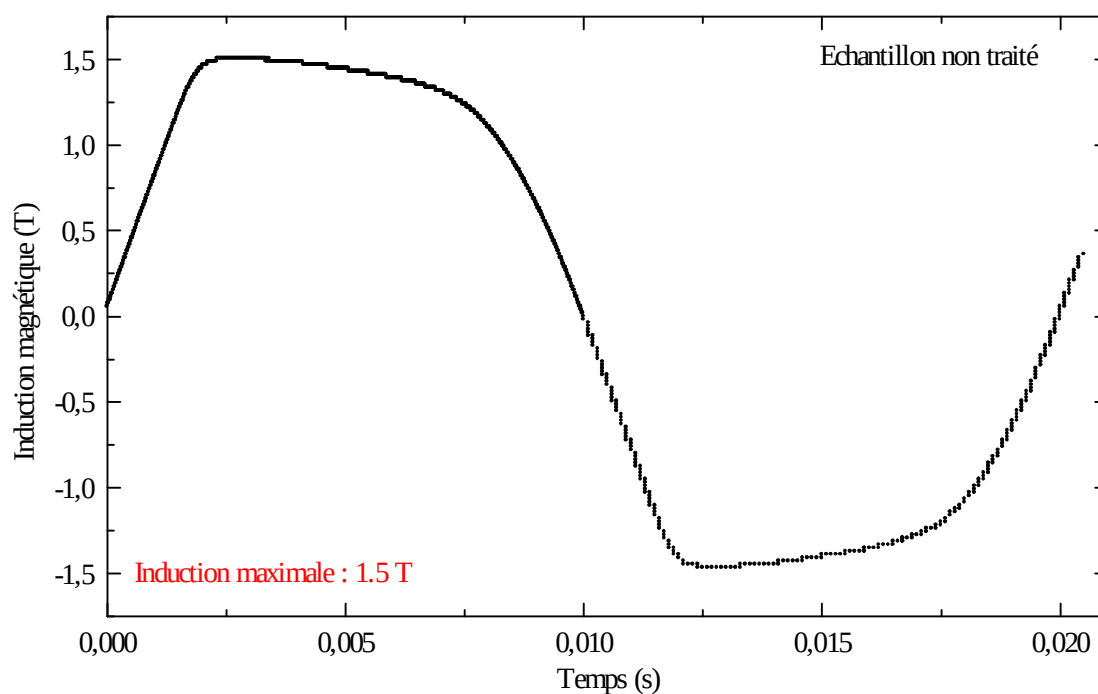


Figure IV.15. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1.5 T). Tôles non traitées.

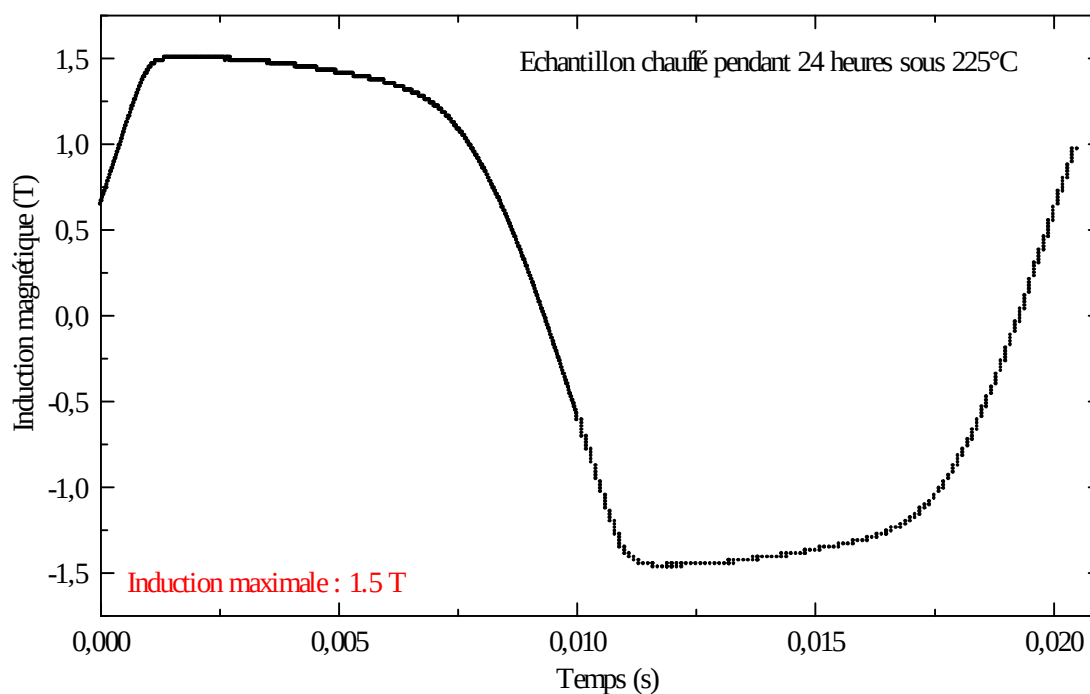


Figure IV.16. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1.5 T).
Tôles chauffées pendant 24 heures sous 225 °C.

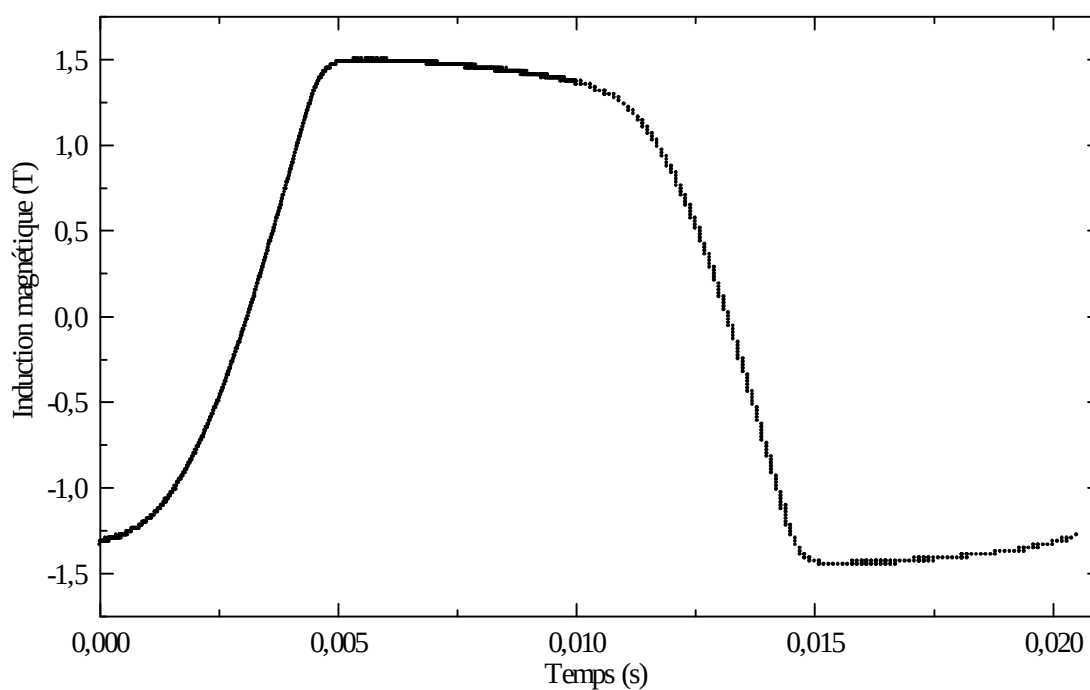


Figure IV. 17. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal (Induction maximale : 1.5 T).
Tôles chauffées pendant 168 heures sous 225 °C.

Nous remarquons que la contrainte thermique ne semble pas affecter la forme de l'induction magnétique. L'induction est sinusoïdale dans le premier cas correspondant à une induction maximale de 1 T. Quand l'induction maximale atteint 1.5 T, la forme de l'induction s'écarte du comportement sinusoïdal. Ceci est probablement dû au phénomène de saturation.

IV.5.1.2. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal

Nous représentons sur les figures IV.18 à IV.20 les formes des inductions magnétiques des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal avec des inductions maximales de 1 T.

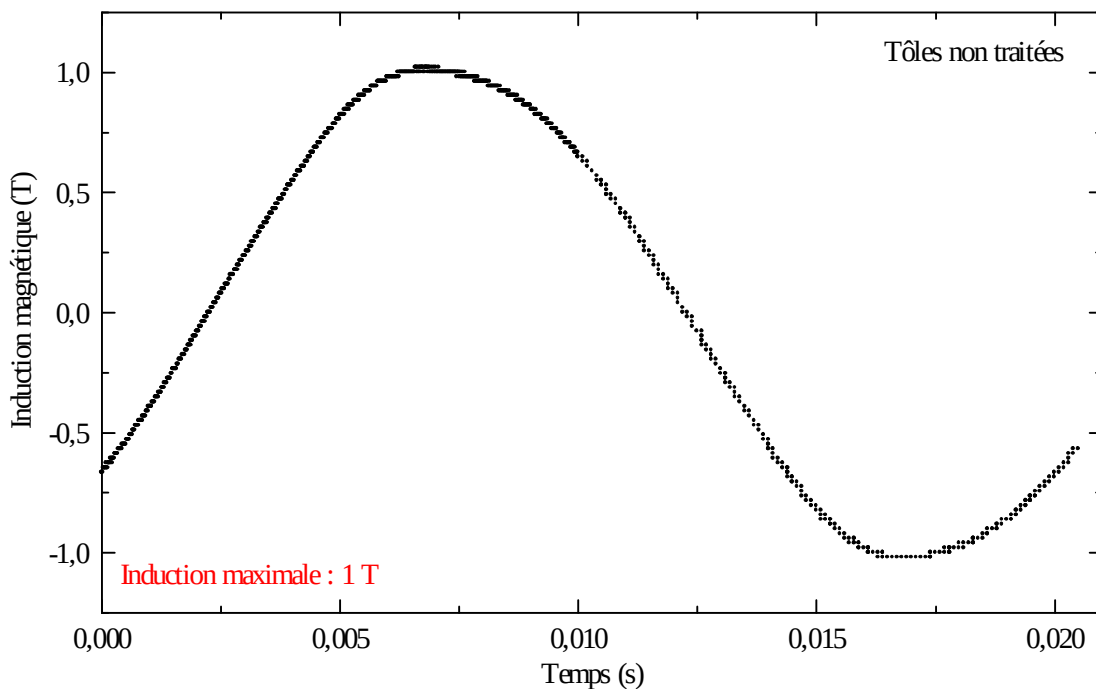


Figure IV. 18. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal (Induction maximale : 1 T).

Tôles non traitées.

La forme de l'induction n'a pas l'air d'être affectée par la contrainte thermique.

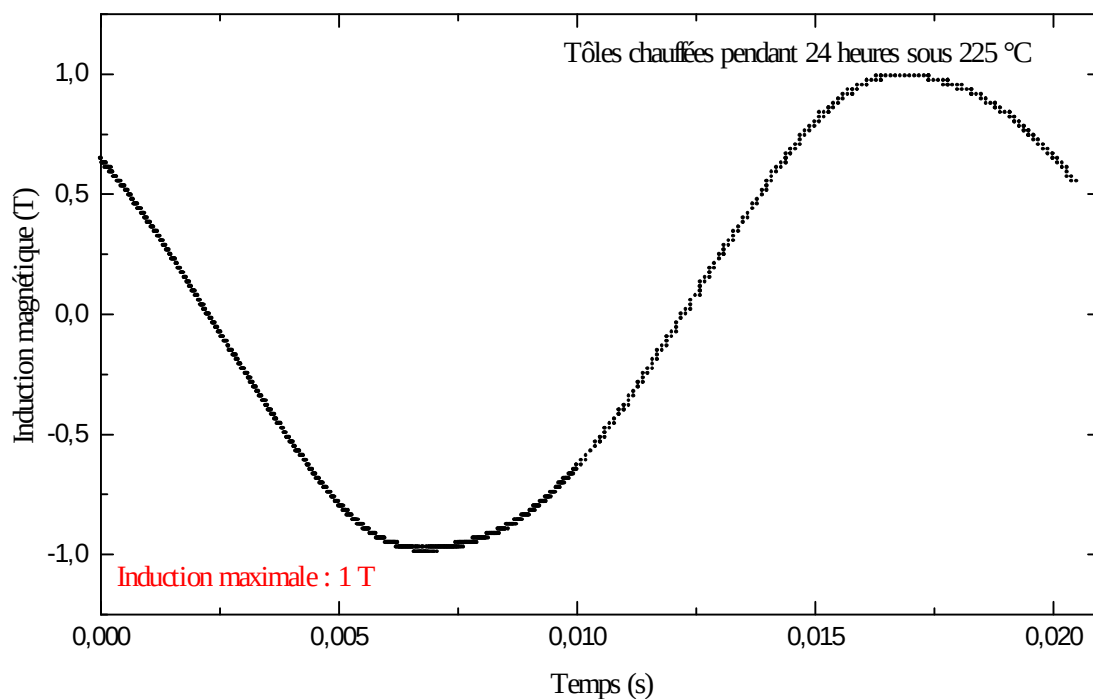


Figure IV. 19. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal (Induction maximale : 1 T).

Tôles chauffées pendant 24 heures sous 225 °C.

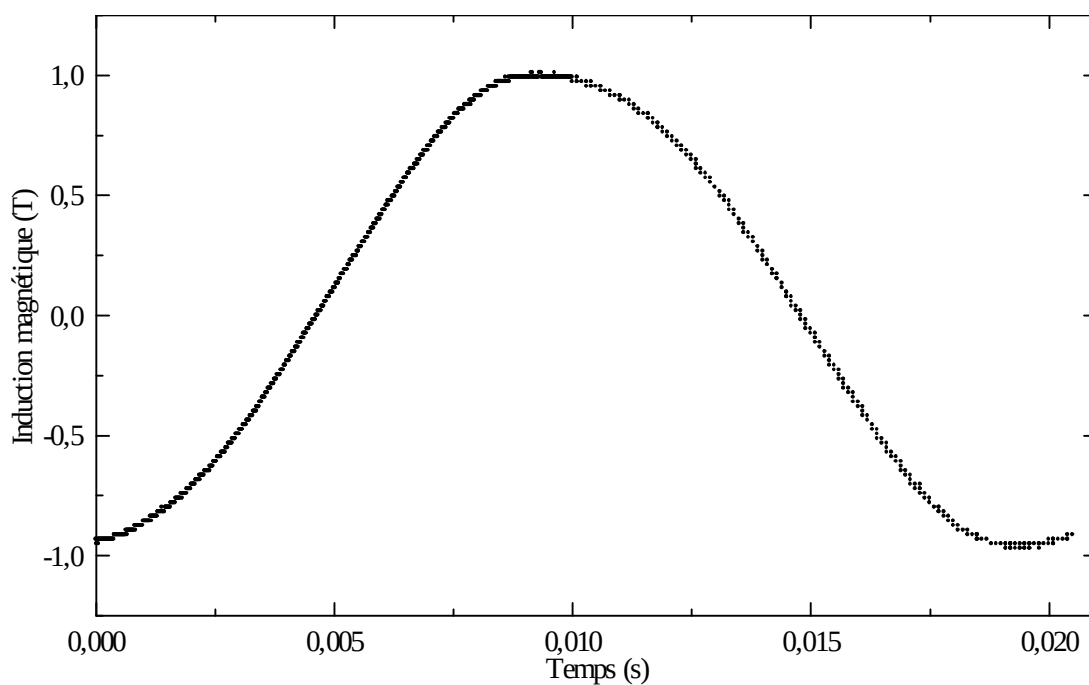


Figure IV. 20. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal (Induction maximale : 1 T).

Tôles chauffées pendant 168 heures sous 225 °C.

IV.5.1.3. Tôles à grains orientés

Nous représentons sur les figures IV.21 à IV.26 les formes de l'induction magnétique pour les tôles à grains orientés non traitées puis soumises à un chauffage de 225°C pendant 24 heures et 168 heures.

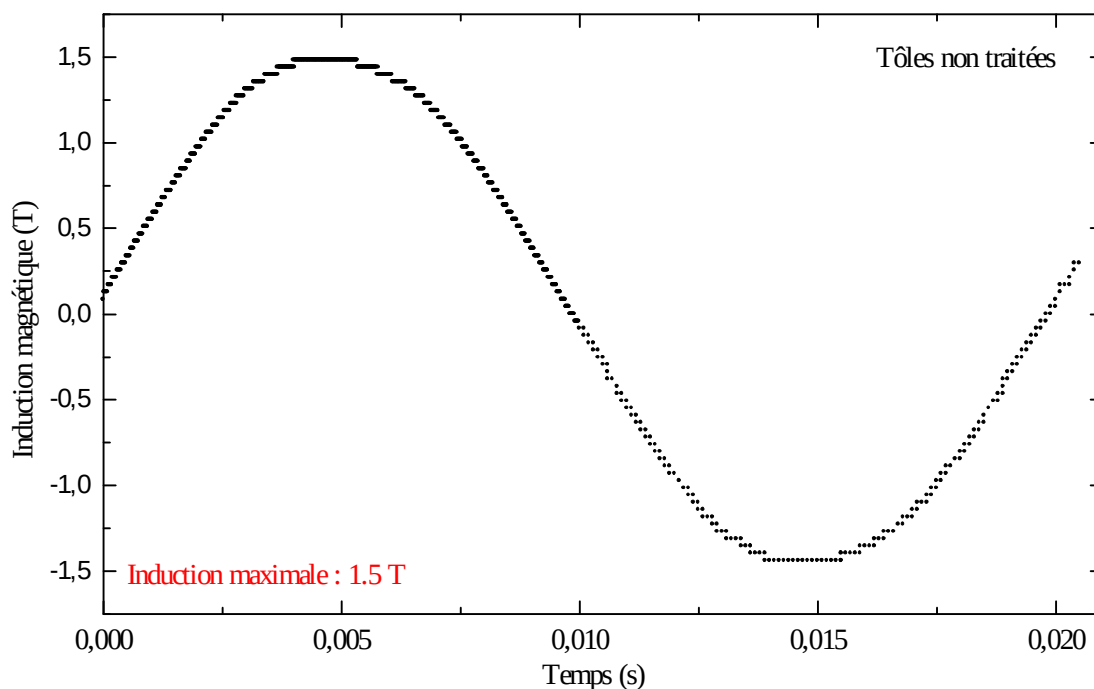


Figure IV. 21. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés non traitées (Induction maximale : 1.5 T).

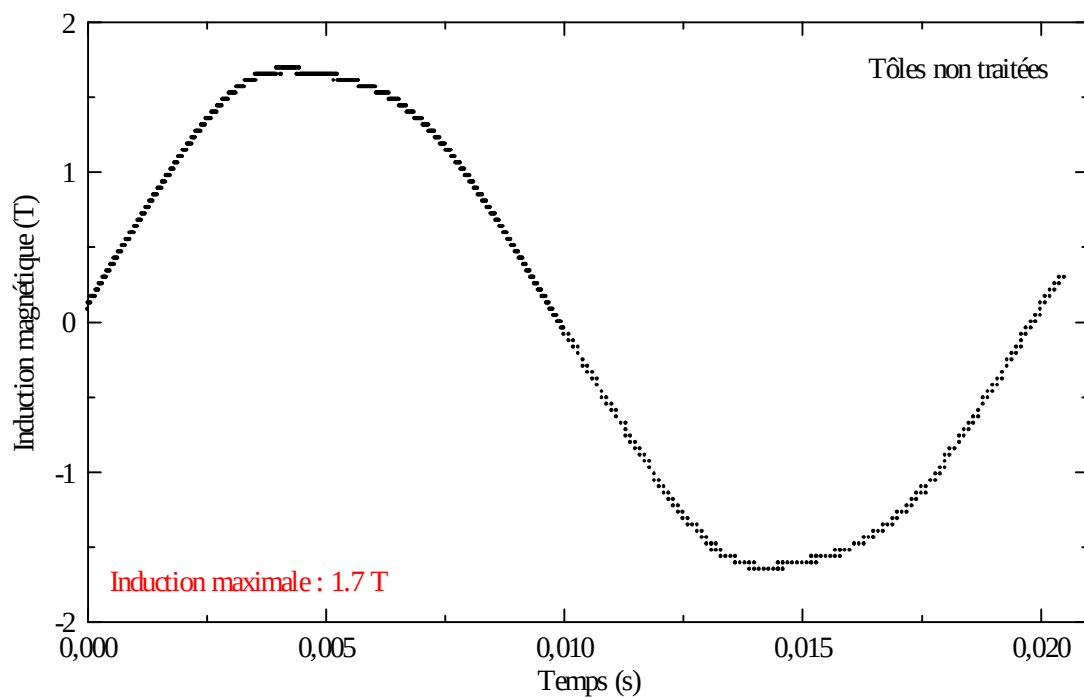


Figure IV. 22. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés non traitées (induction maximale : 1.7 T)

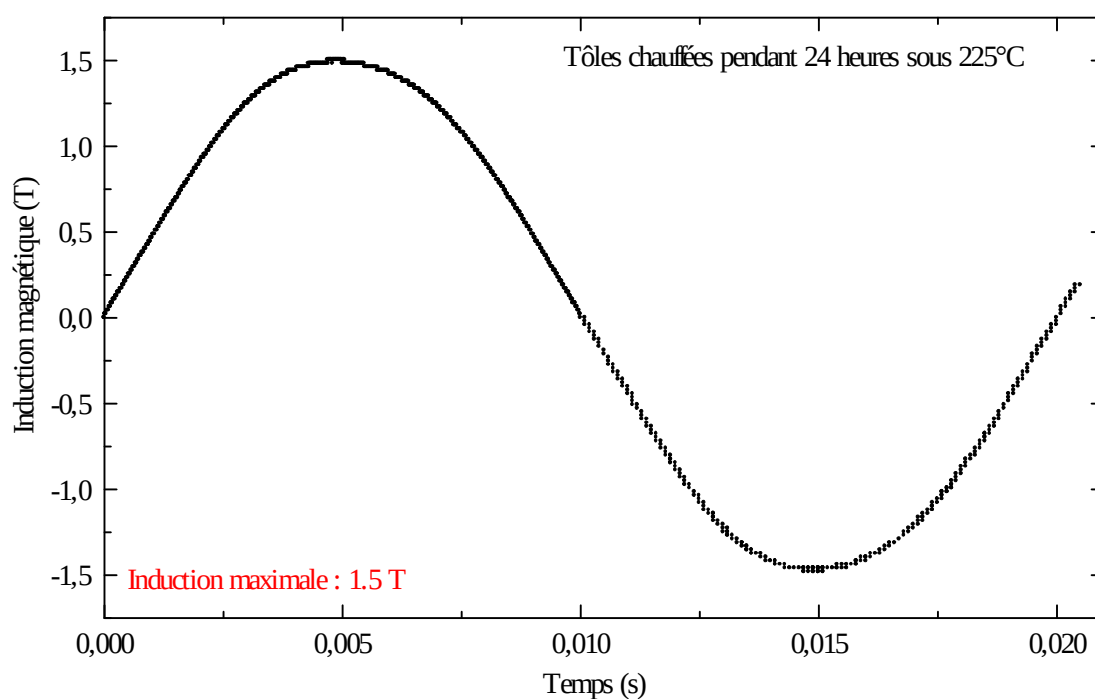


Figure IV.23. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés chauffées pendant 24 heures sous 225°C (induction maximale : 1.5 T).

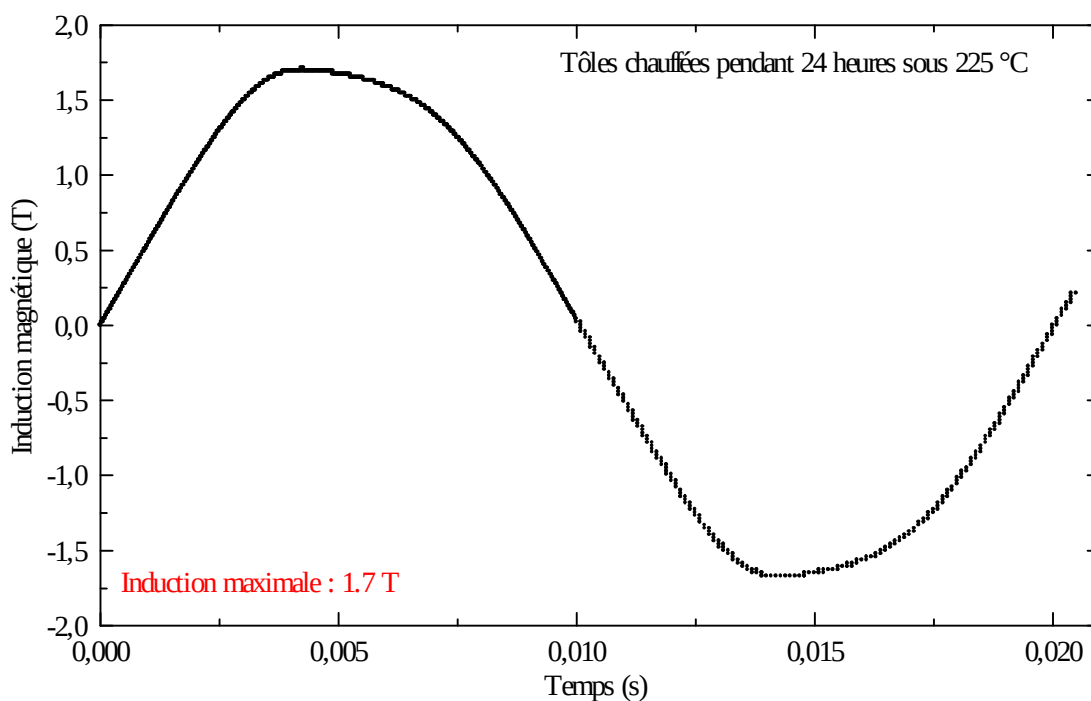


Figure IV.24. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés chauffées pendant 24 heures sous 225°C (induction maximale : 1.7 T).

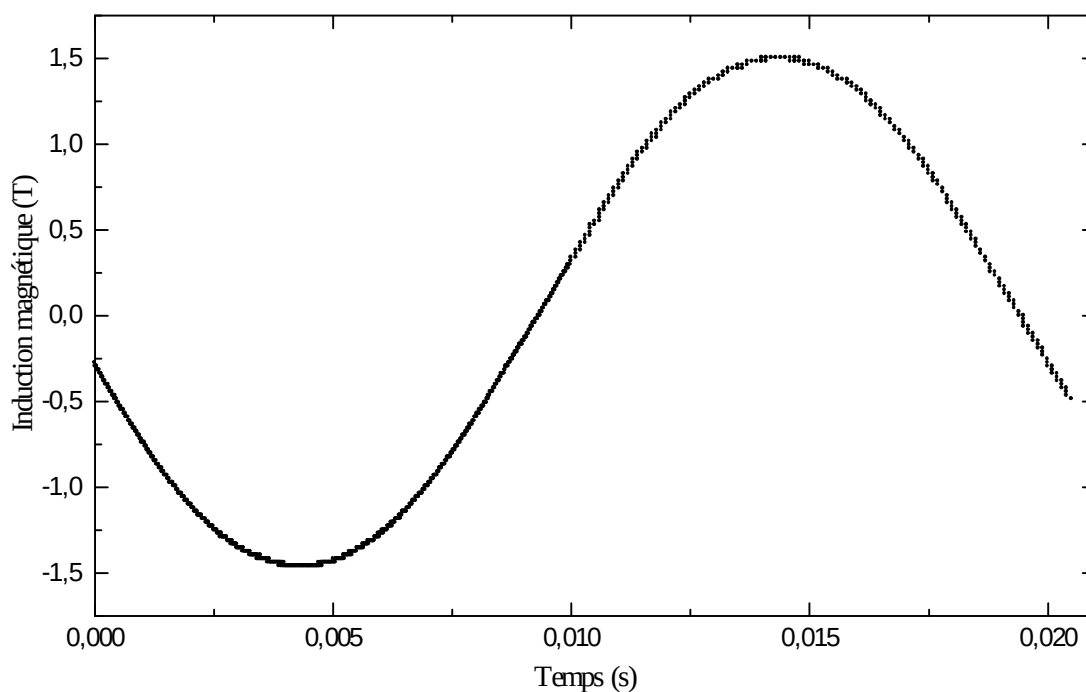


Figure IV.25. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés chauffées pendant 168 heures sous 225°C (induction maximale : 1.5 T).

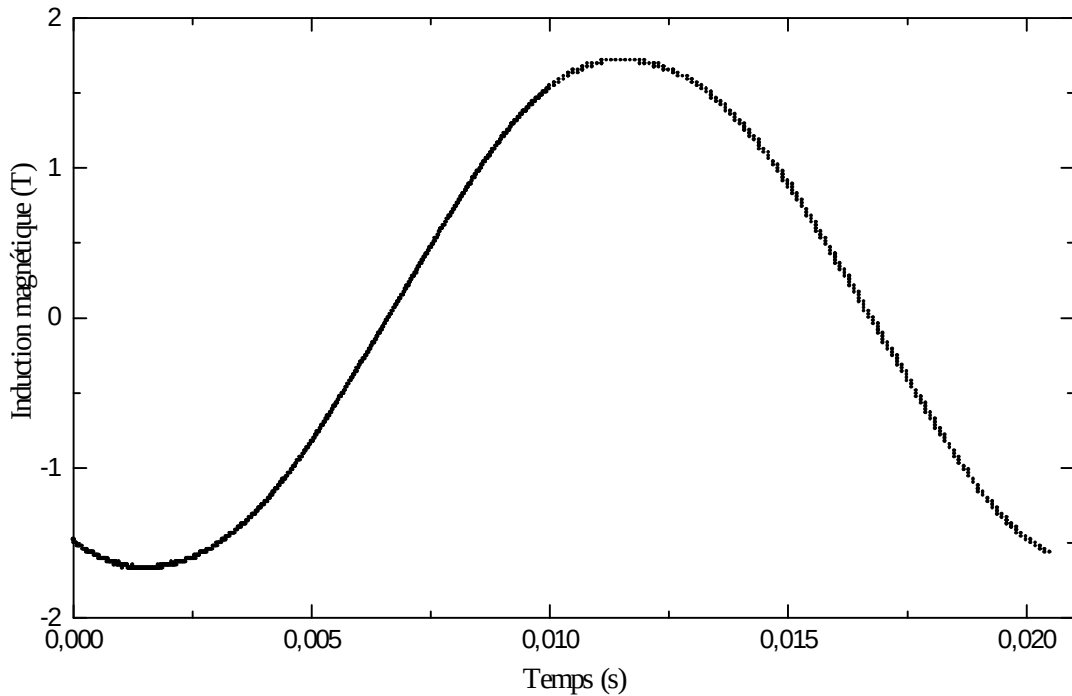


Figure IV.26. Forme de l'induction magnétique des tôles à grains orientés chauffées pendant 168 heures sous 225°C (induction maximale : 1.7 T).

IV.5.2. Forme du courant

IV.5.2.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal

Les formes des courants pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal sont représentées sur les figures IV. 27 à IV.32. La forme du courant n'a pas l'air d'être affecté par la contrainte thermique pour une induction magnétique donnée. Cette forme est d'autant plus déformée que l'induction magnétique est élevée. Le courant maximal nécessaire pour atteindre une induction magnétique de 1 T est faible pour un échantillon vierge et il est relativement élevé pour les tôles ayant subi une contrainte thermique. La même observation est valable pour une induction maximale de 1.5 T.

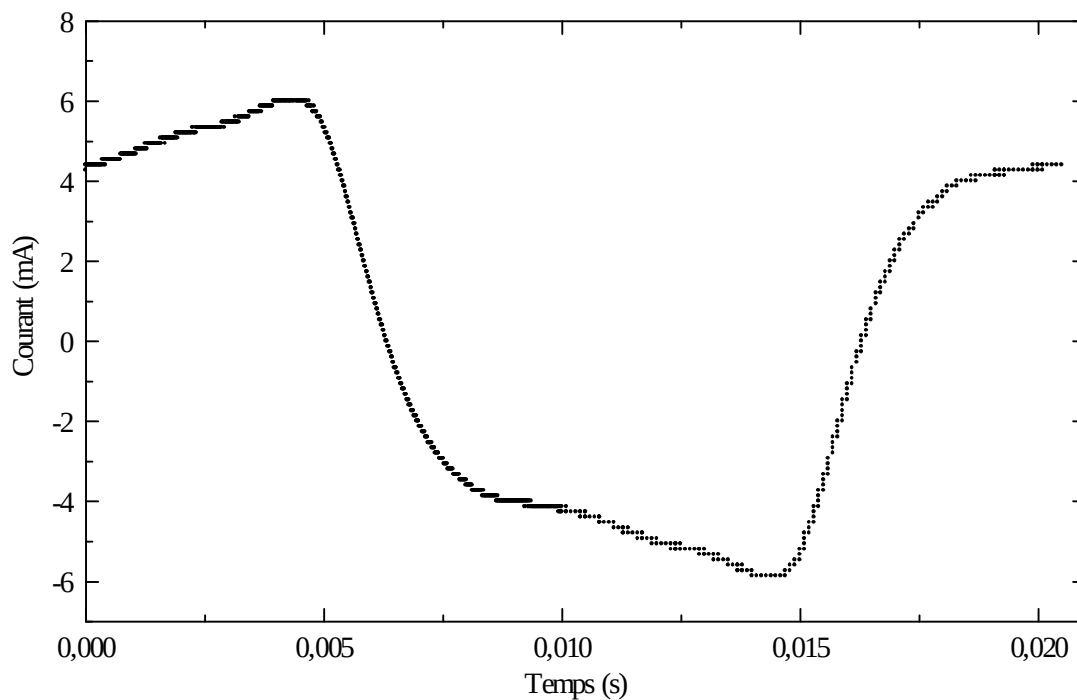


Figure IV.27. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et n'ayant subi aucune contrainte thermique.

Induction maximale : 1 T

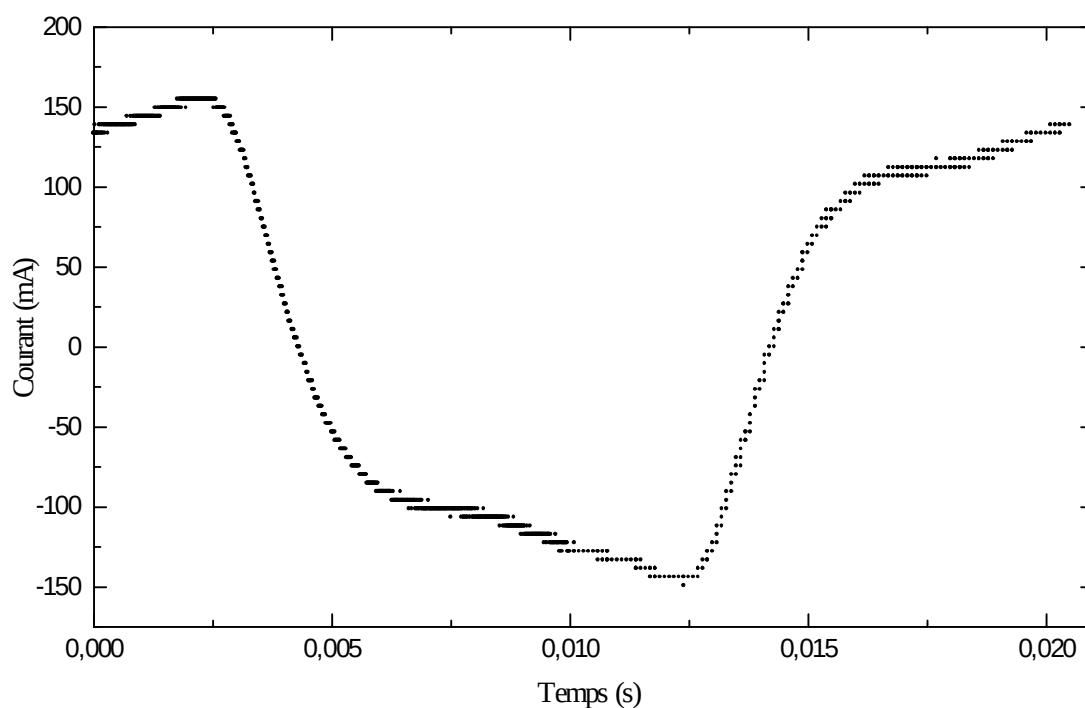


Figure IV.28. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures. Induction maximale : 1 T

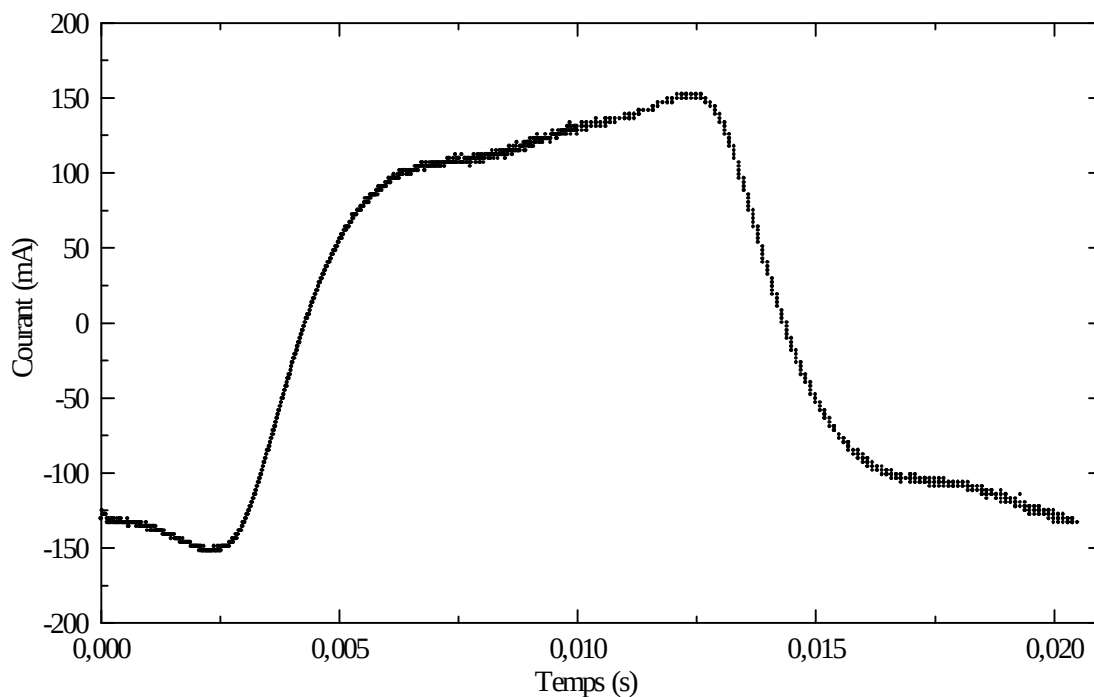


Figure IV.29. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Induction maximale : 1 T

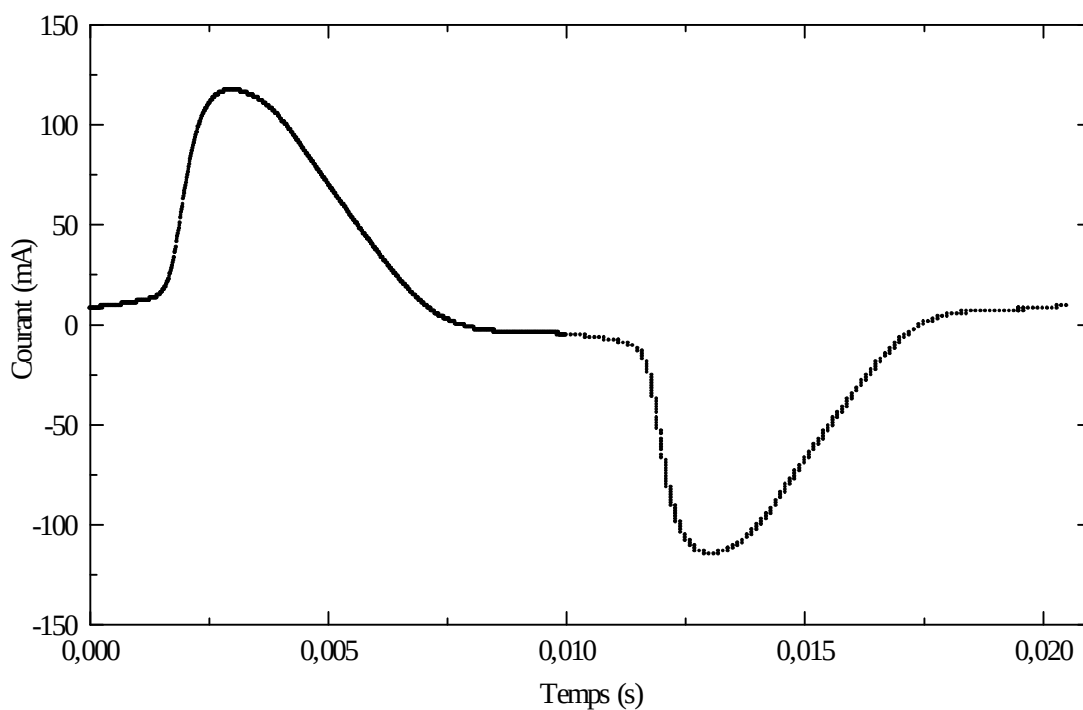


Figure IV.30. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et n'ayant subi aucune contrainte thermique.

Induction maximale : 1.5 T

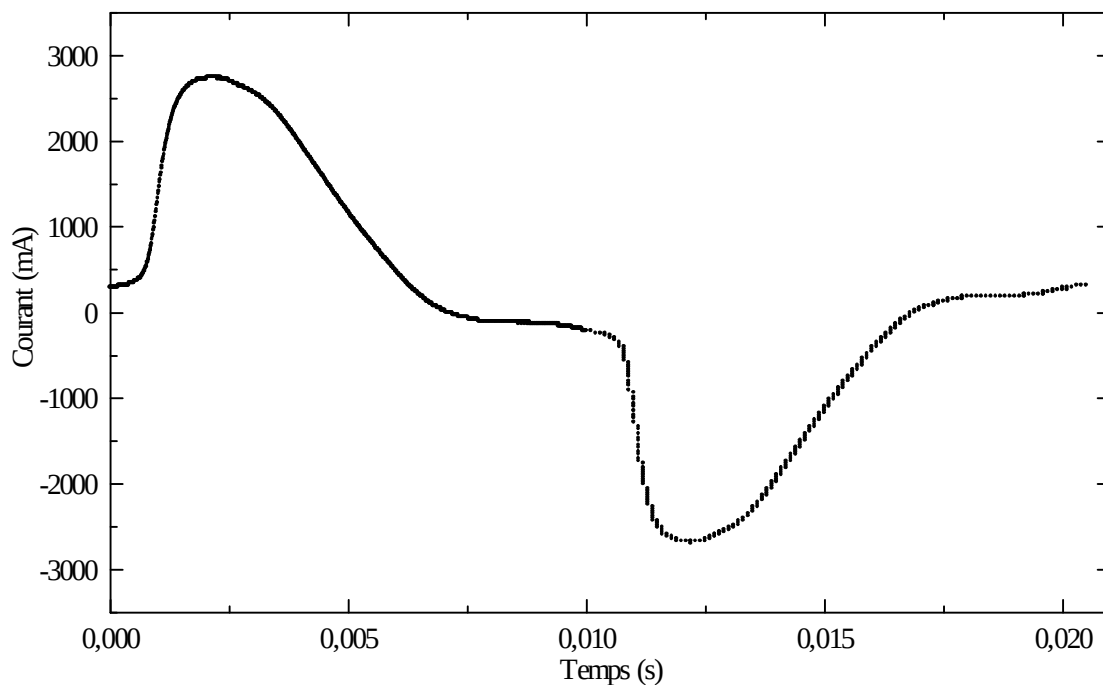


Figure IV.31. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures. Induction maximale : 1.5 T

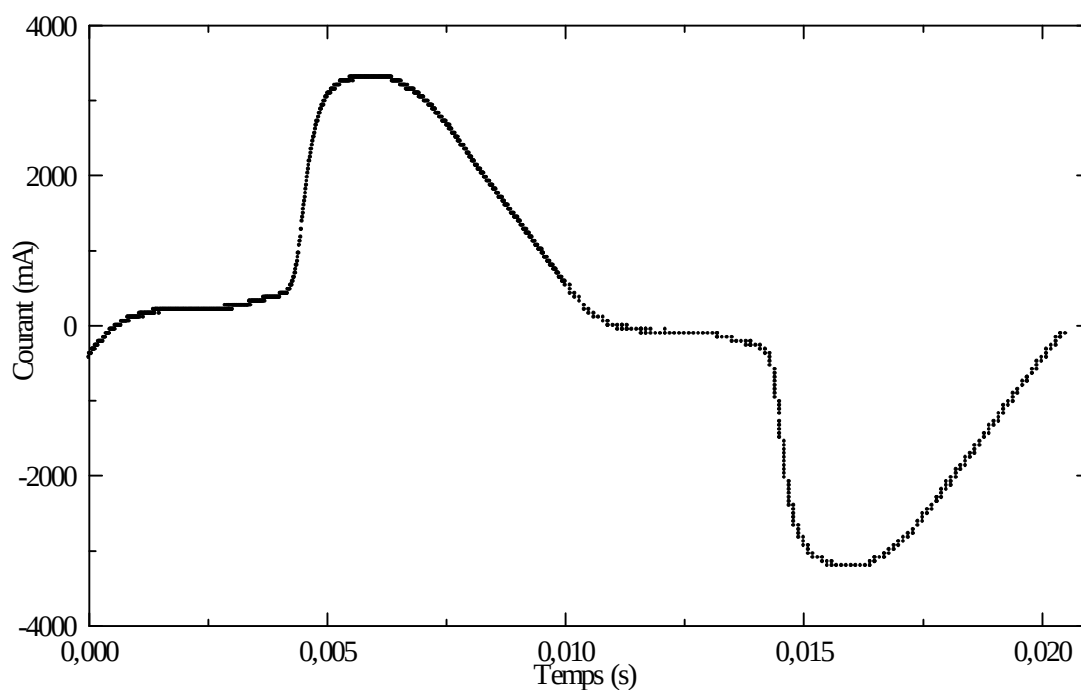


Figure IV.32. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Induction maximale : 1.5 T

IV.5.2.2. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens Transversal

Nous représentons sur les figures IV.33 et IV.35 les formes du courant et de l'induction maximale des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal.

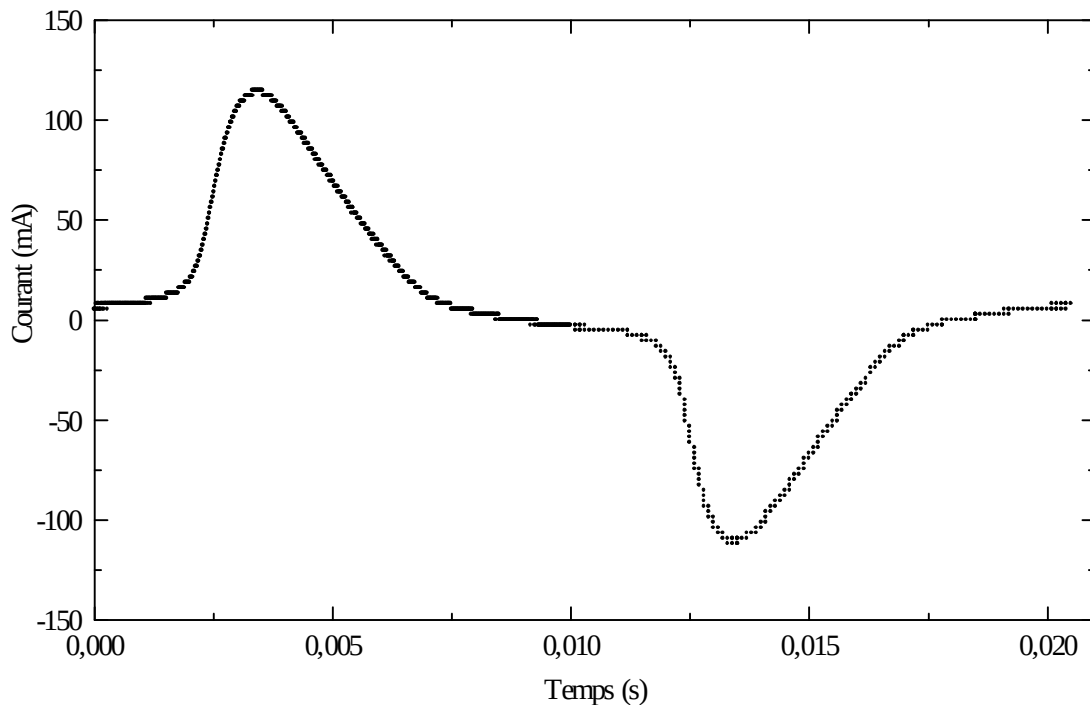


Figure IV.33. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal et n'ayant subi aucune contrainte thermique.

Induction maximale : 1 T

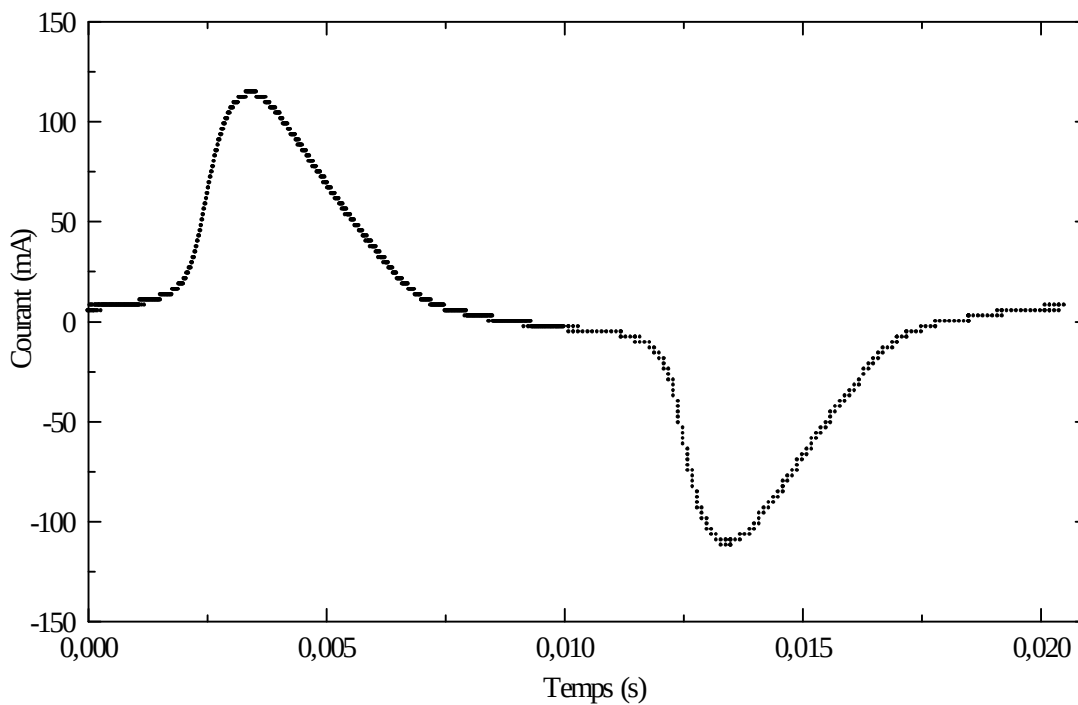


Figure IV.34. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures. Induction maximale : 1 T

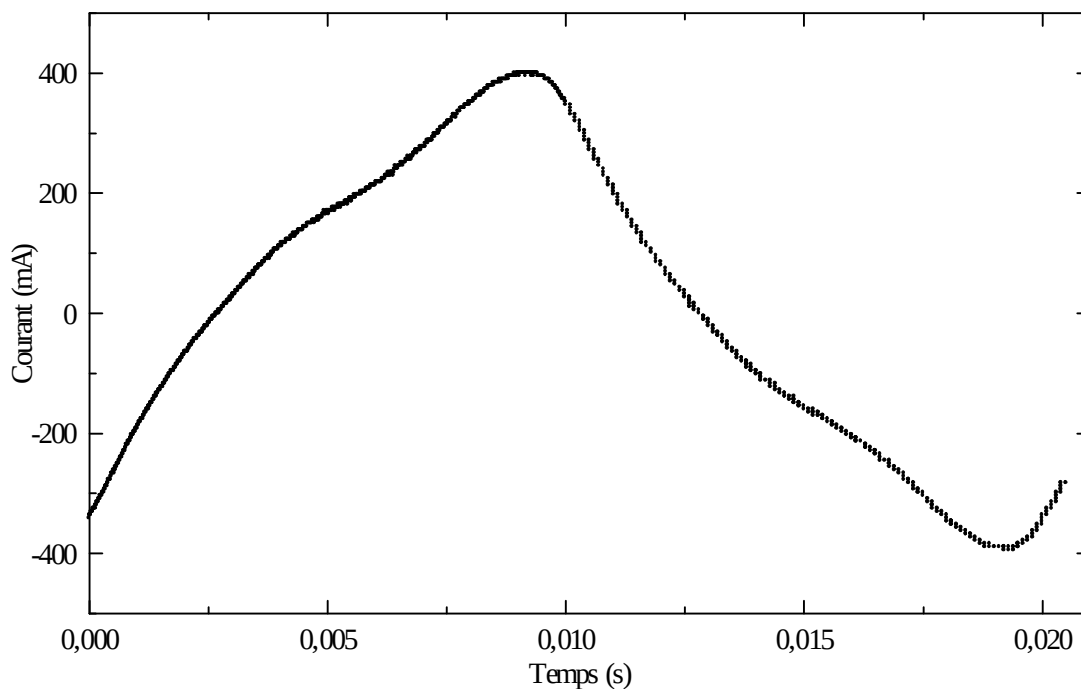


Figure IV.35. Forme du courant des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal et ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Induction maximale : 1 T

Le courant nécessaire pour obtenir une induction magnétique de 1 T est le même pour des tôles vierges et des tôles ayant subi un échauffement de 225°C pendant 24 heures. Ce courant est remarquablement plus élevée dans le cas où la même contrainte thermique est subie pendant 168 heures.

IV.5.2.3. Tôles à grains orientés

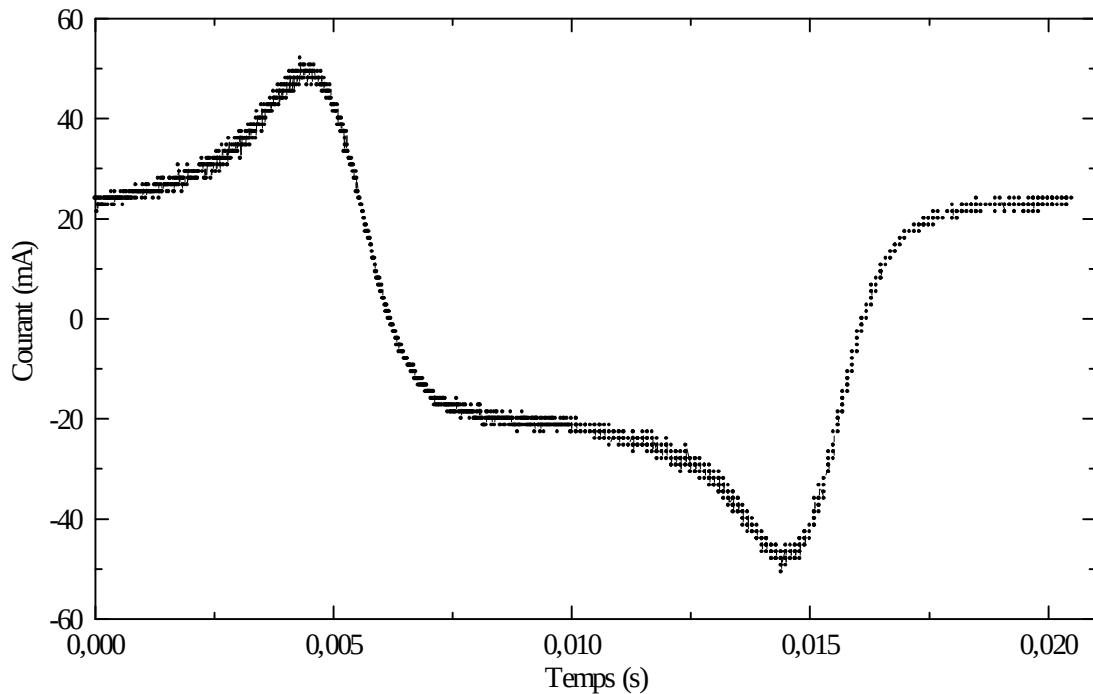


Figure IV.36. Forme du courant des tôles à grains orientés n'ayant subi aucune contrainte thermique. Induction maximale : 1.5 T

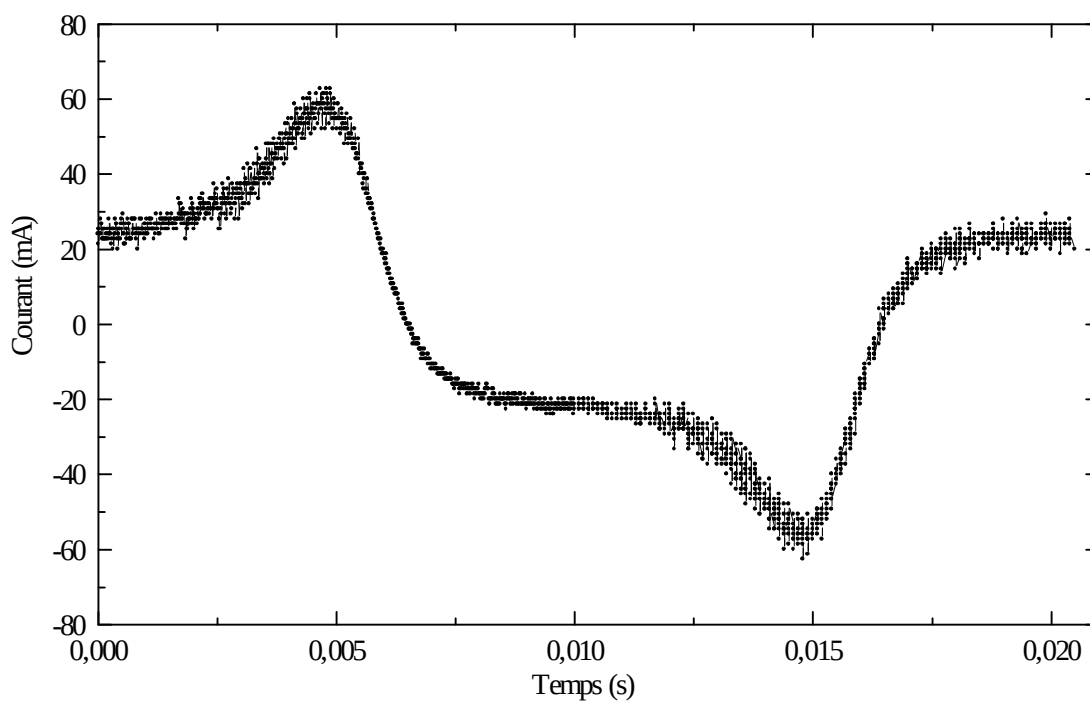


Figure IV.37. Forme du courant des tôles à grains orientés ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures. Induction maximale : 1.5 T.

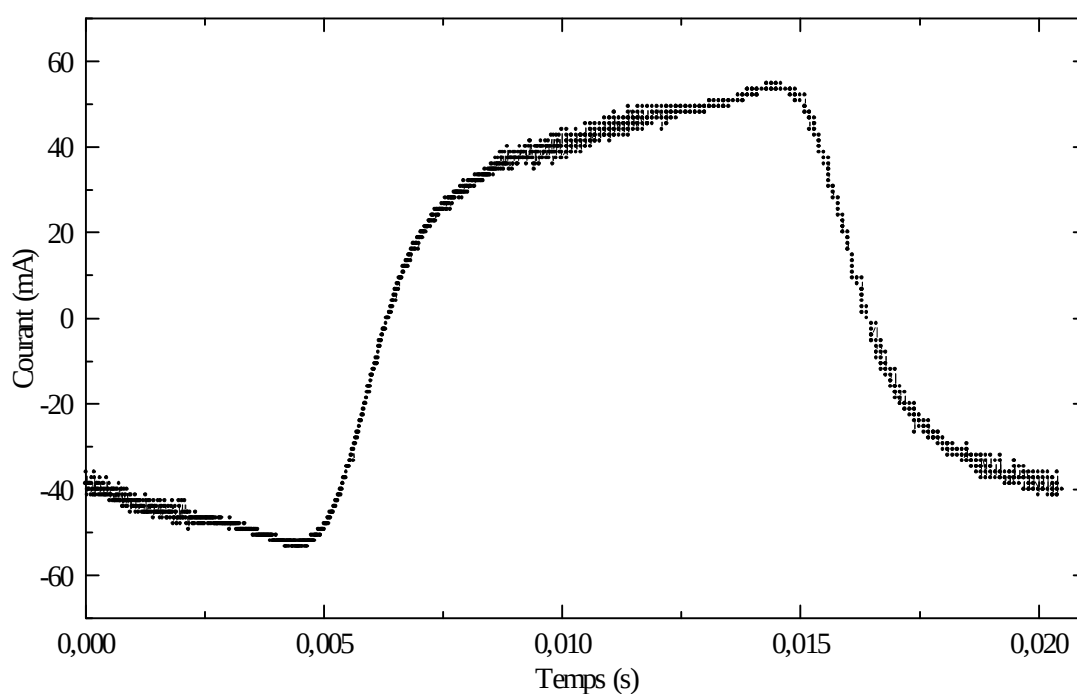


Figure IV.38. Forme du courant des tôles à grains orientés ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Induction maximale : 1.5 T.

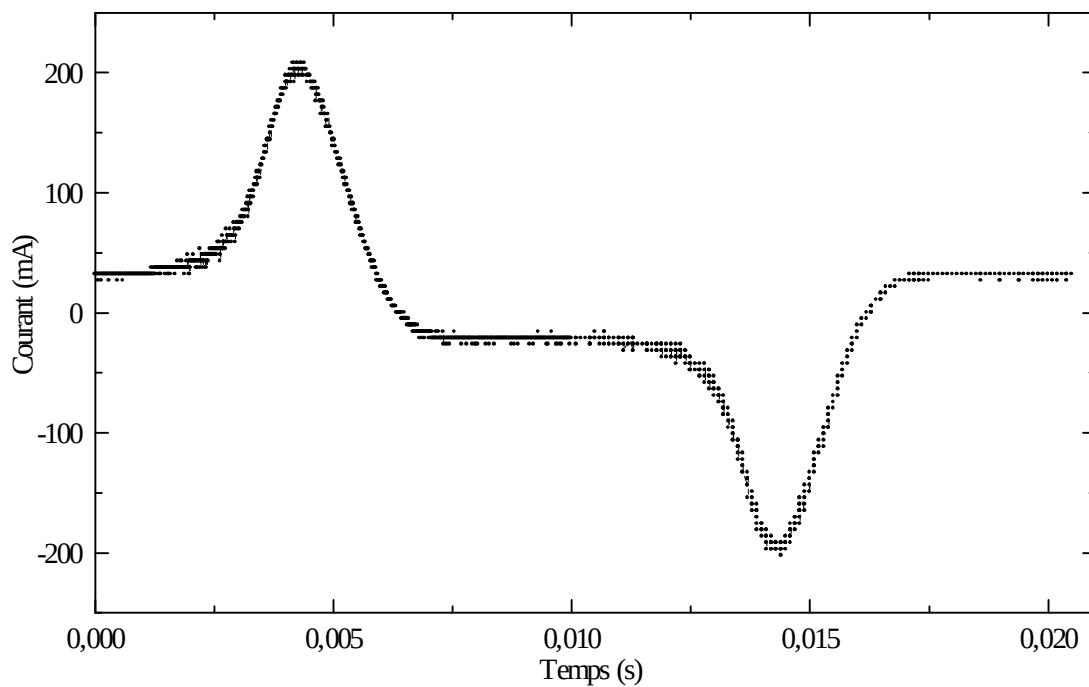


Figure IV.39. Forme du courant des tôles à grains orientés n'ayant subi aucune contrainte thermique. Induction maximale : 1.7 T

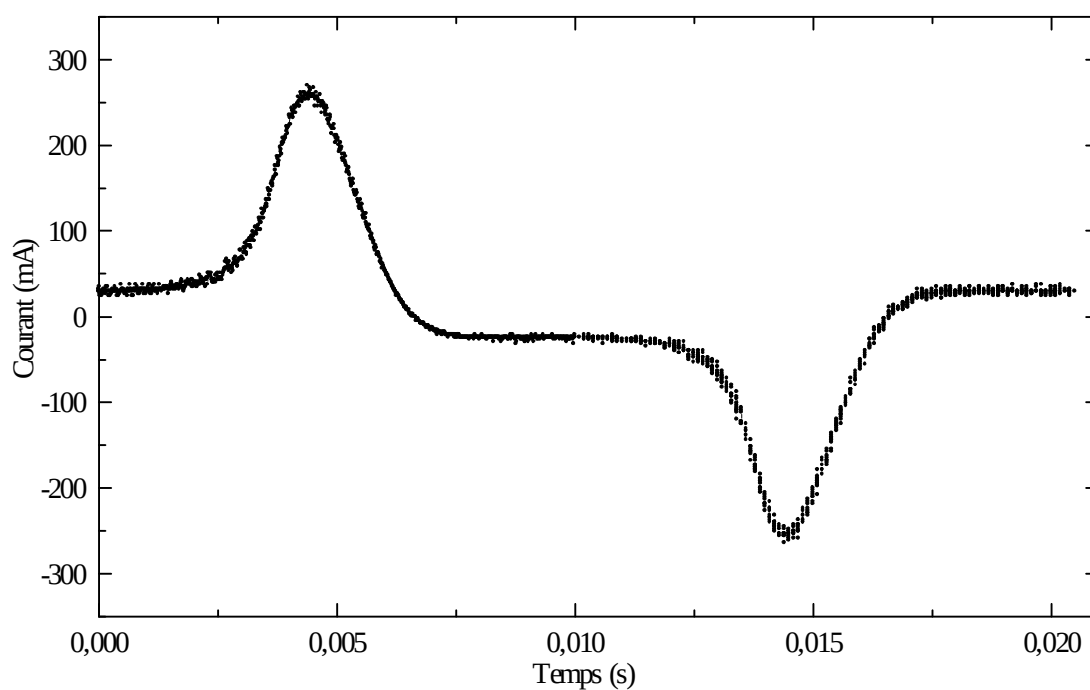


Figure IV.40. Forme du courant des tôles à grains orientés ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures. Induction maximale : 1.7 T.

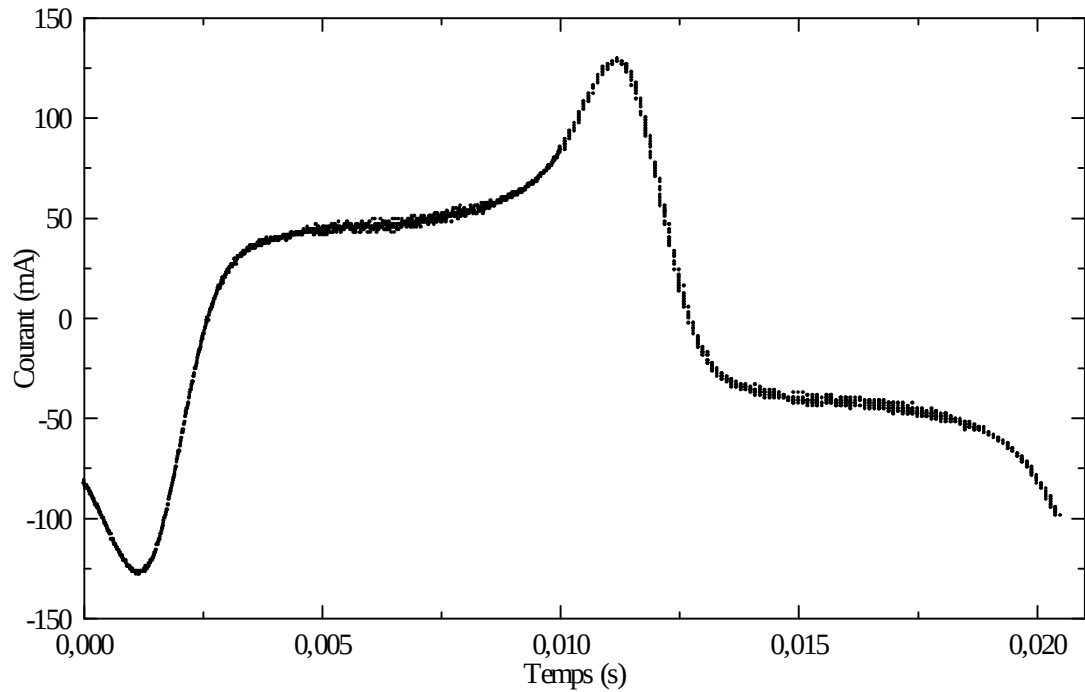


Figure IV.41. Forme du courant des tôles à grains orientés ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Induction maximale : 1.7 T.

IV.6. Mesure des pertes magnétiques

Les pertes magnétiques sont données à partir d'une mesure directe à l'aide d'un wattmètre pour une induction donnée. Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure IV. 42.

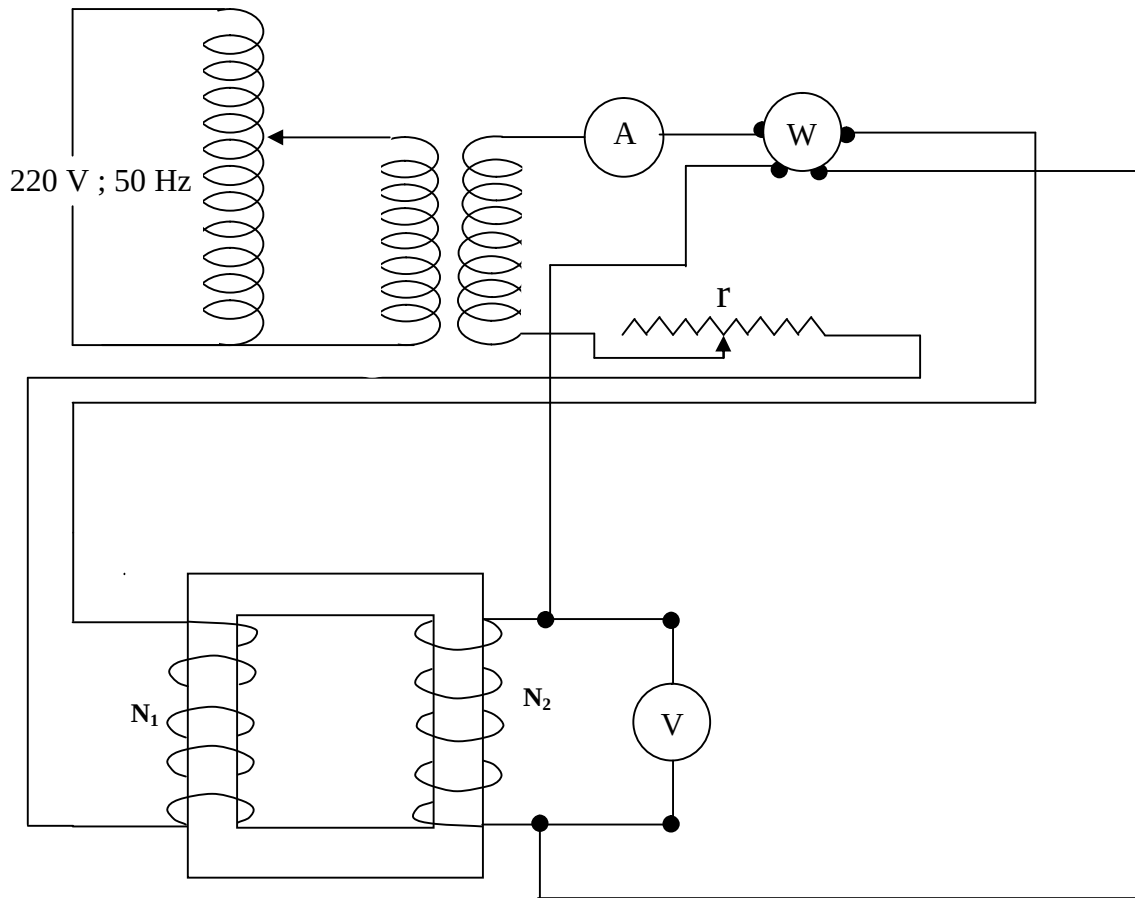


Figure IV.42. Dispositif expérimental utilisé dans la mesure des pertes magnétiques.

Nous avons mesuré les pertes magnétiques des différentes tôles en faisant varier l'induction magnétique.

IV.6.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal

Les essais ont été réalisés pour des tôles n'ayant subi aucune contrainte thermique puis pour des tôles ayant subi un chauffage de 225°C pendant 24 heures et 168 heures. L'évolution des pertes magnétiques en fonction de l'induction magnétique maximale est représentée sur la figure IV.43. Les pertes sont plus élevées pour les tôles ayant subi une contrainte thermique. Cette augmentation est perceptible vers les grandes inductions magnétiques.

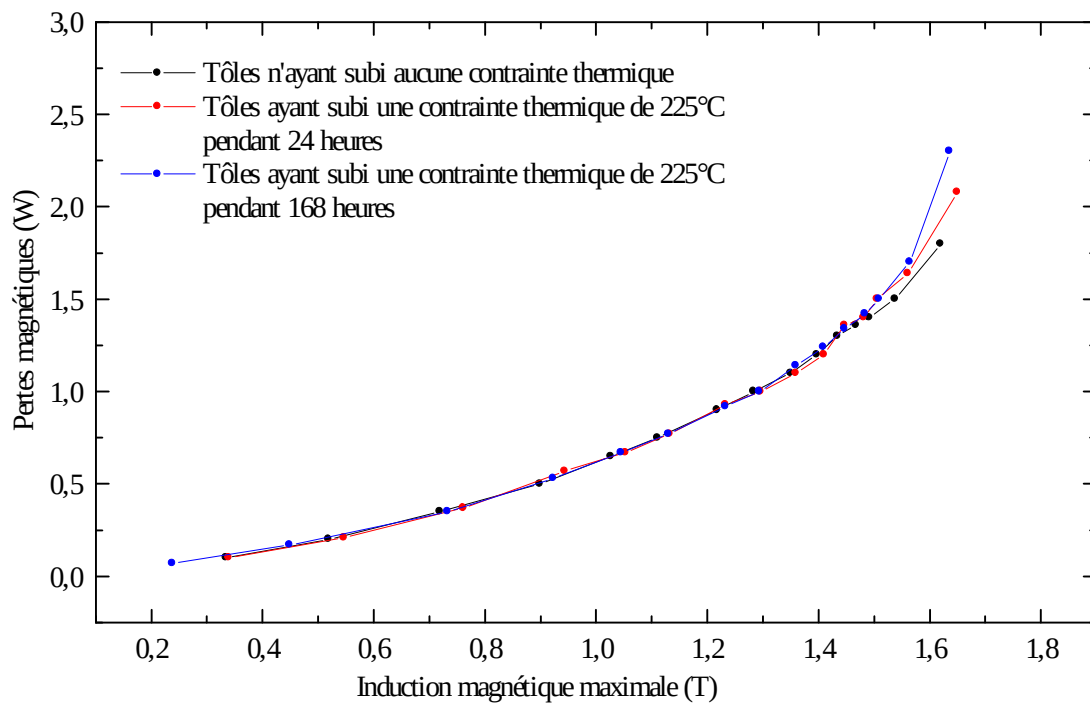


Figure IV.43. Pertes magnétiques en fonction de l'induction magnétique maximale des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal.

IV.6.2. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal

La figure IV.44 nous donne les pertes magnétiques en fonction de l'induction magnétique maximale pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal. Les pertes magnétiques ont l'air d'être les mêmes pour les tôles n'ayant subi aucune contrainte thermique et celles ayant subi un chauffage sous 225°C pendant 24 heures. Pour les tôles dont la contrainte thermique de 225°C a été maintenue pendant 168 heures, les pertes sont plus élevées pour les fortes inductions.

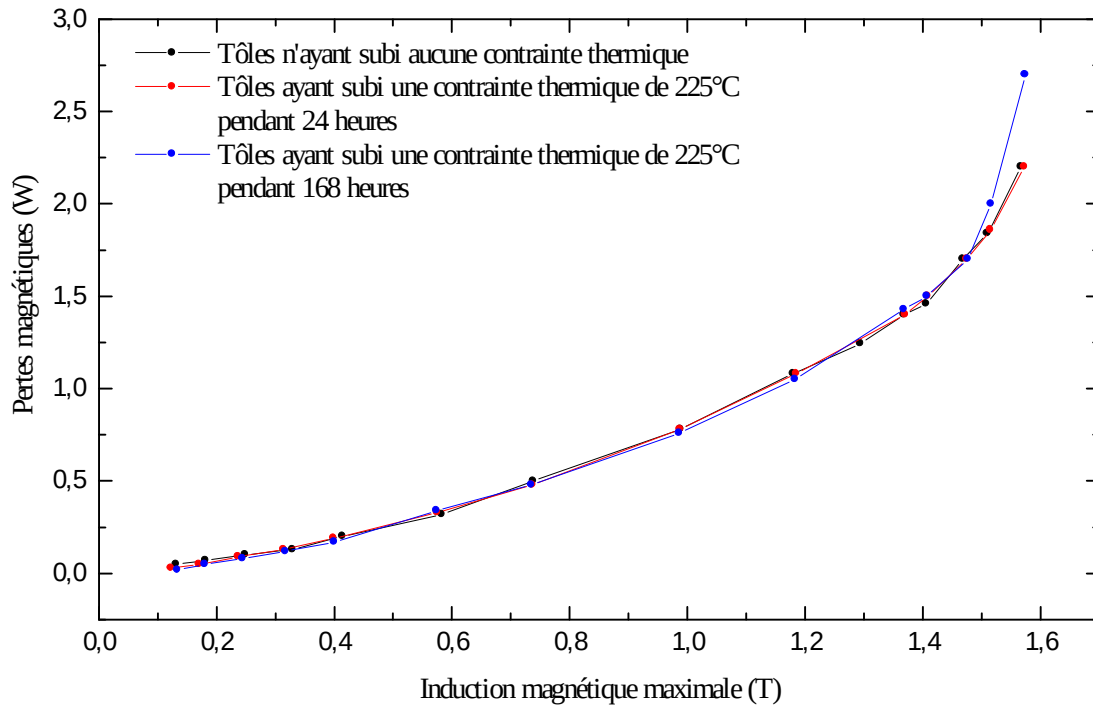


Figure IV.44. Pertes magnétiques en fonction de l'induction magnétique maximale des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal.

IV.6.3. Tôles à grains orientés

Les pertes magnétiques des tôles à grains orientés sont représentées sur la figure IV.45.

Les tôles n'ayant subi aucune contrainte thermique et celles ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures ont pratiquement les mêmes pertes en fonction de l'induction magnétique. Les tôles ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures ont des pertes supérieures et cela à partir d'une induction magnétique de 0.6 T environ.

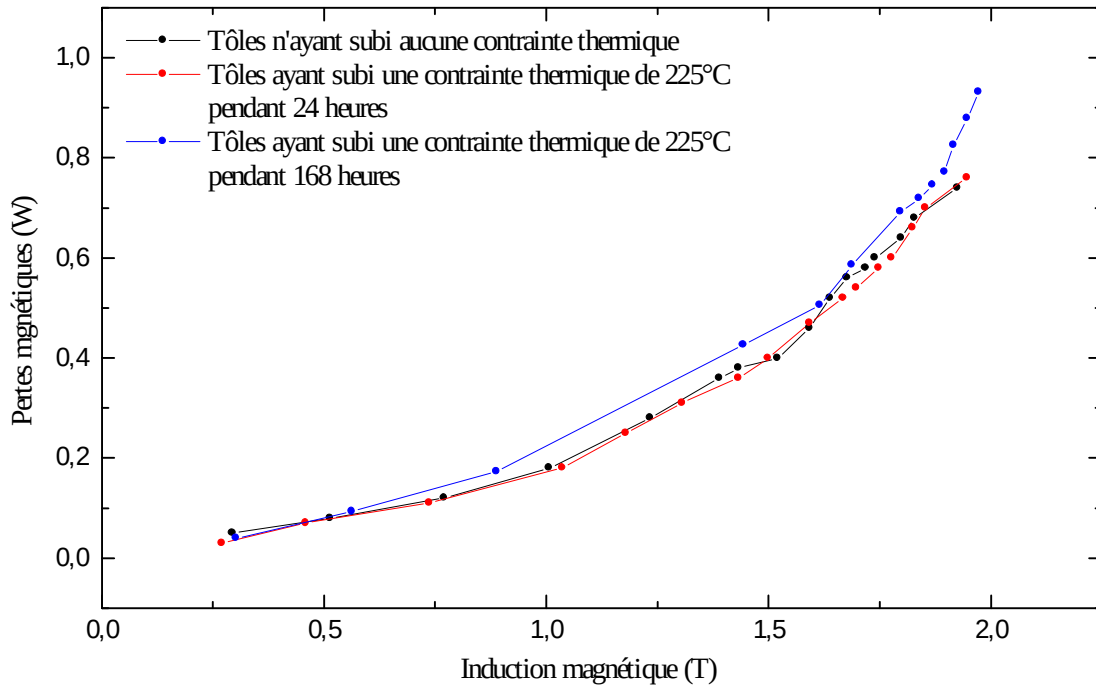


Figure IV.47. Pertes magnétiques en fonction de l'induction magnétique maximale des tôles à grains orientés

IV.7. Cycles d'hystérésis

Le cycle d'hystérésis est visualisé à l'oscilloscope, en envoyant la tension aux bornes du rhéostat, proportionnelle au champ magnétique H , 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. Le dispositif expérimental utilisé pour la visualisation des cycles d'hystérésis est le même que celui de la figure IV.11 utilisé pour la visualisation de la forme du courant et de l'induction magnétique. Nous présentons ici quelques cycles d'hystérésis pour montrer leur forme et mettre en évidence l'augmentation des pertes magnétiques suite à une contrainte thermique.

IV. 7.1. Tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal

Les cycles d'hystérésis des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal sont donnés sur les figures IV.46 à IV.48 pour une induction magnétique maximale de 1.5 T.

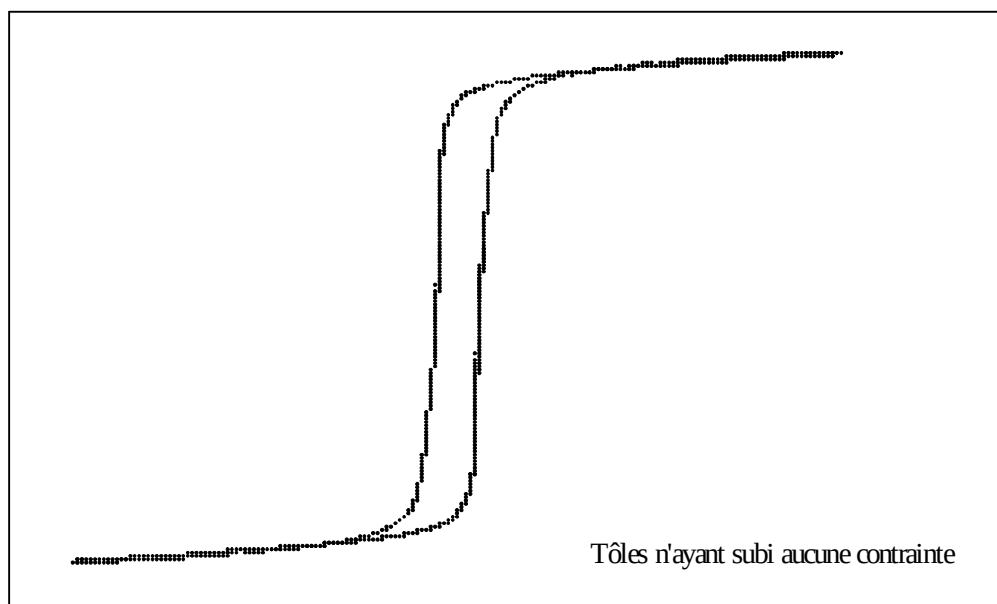


Figure IV.46. Cycle d'hystérésis des tôles à grains non orientés
Découpées dans le sens longitudinal. Induction maximale 1.5 T

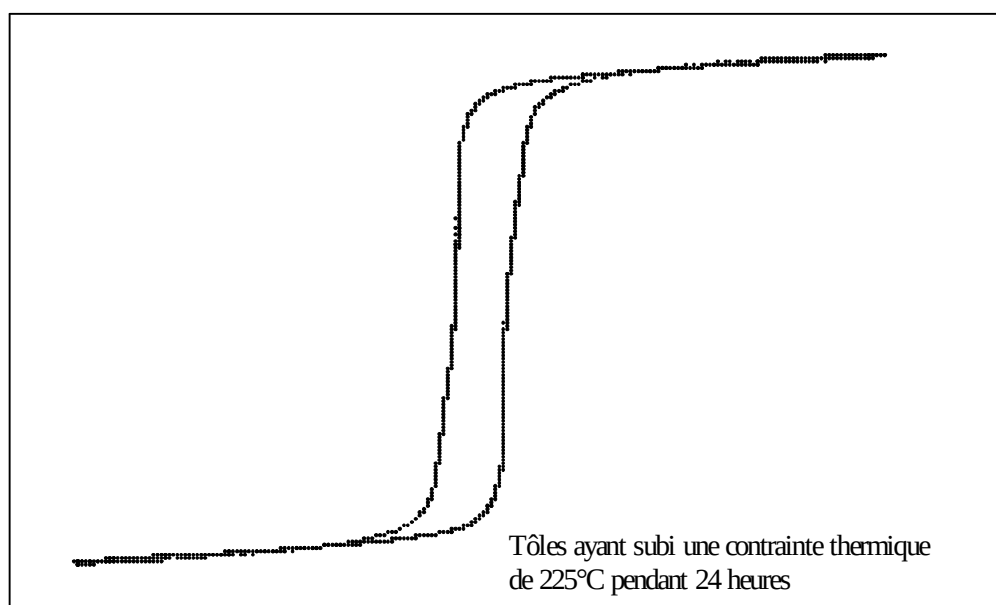


Figure IV.47. Cycle d'hystérésis des tôles à grains non orientés
Découpées dans le sens longitudinal. Induction maximale 1.5 T

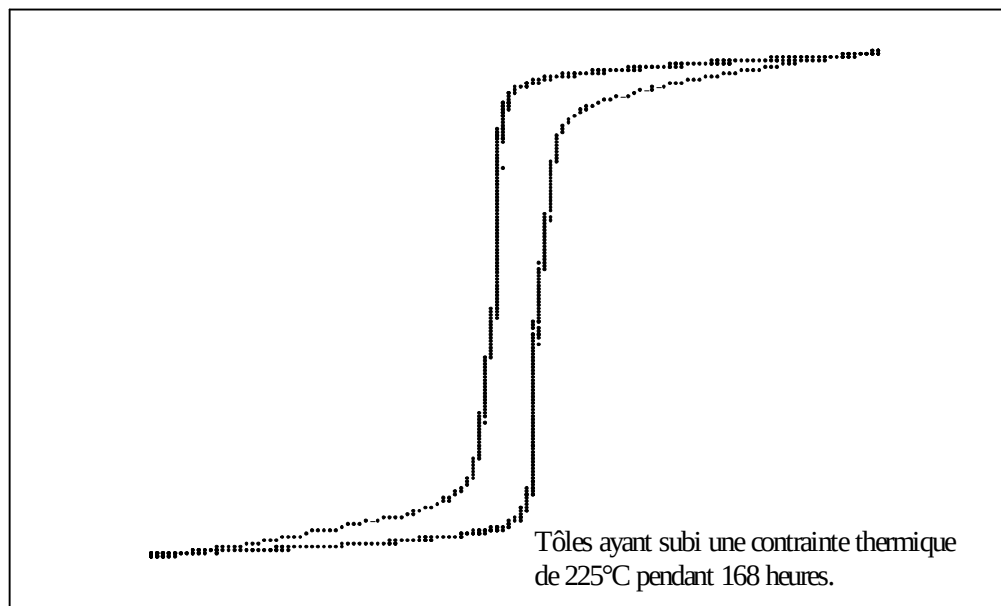


Figure IV.48. Cycle d'hystérésis des tôles à grains non orientés
Découpées dans le sens longitudinal. Induction maximale 1.5 T

IV. 7.2. Tôles à grains orientés

Nous représentons sur les figures IV.49 à IV.51 les cycles d'hystérésis pour les tôles à grains orientés avec une induction magnétique maximale de 1.5 T

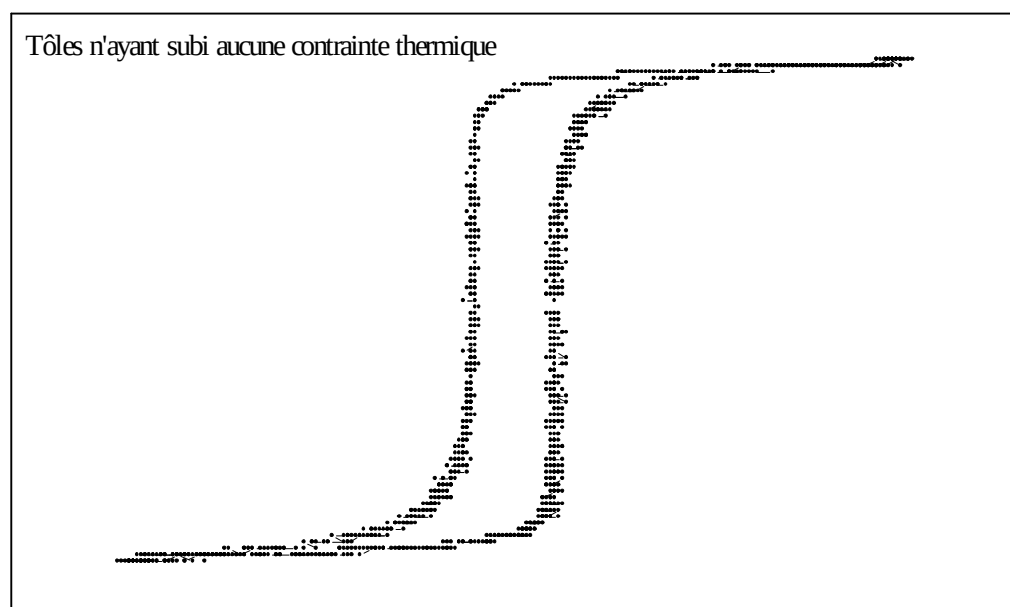


Figure IV.49. Cycle d'hystérésis des tôles à grains orientés
Induction maximale : 1.5 T

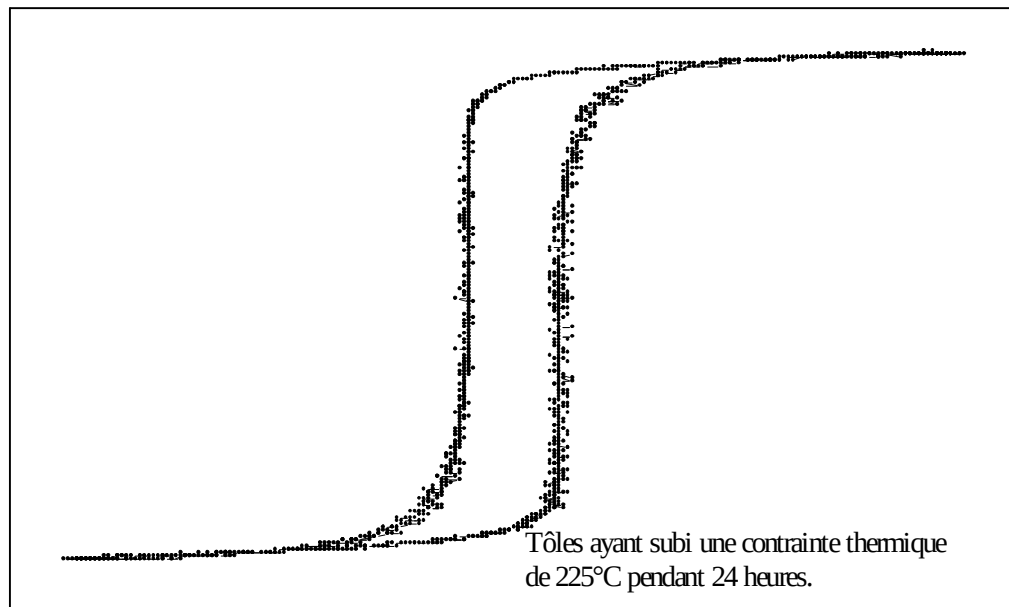


Figure IV.50. Cycle d'hystérésis des tôles à grains orientés
Induction maximale 1.5 T

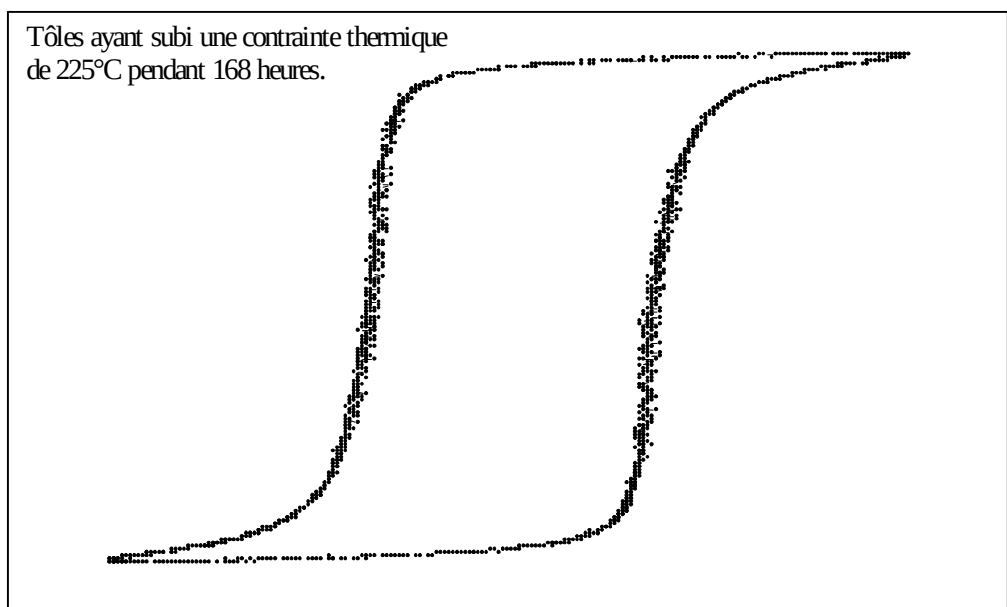


Figure IV.51. Cycle d'hystérésis des tôles à grains orientés
Induction maximale 1.5 T

Les cycles correspondant à des tôles n'ayant subi aucune contrainte thermique ou ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 24 heures sont pratiquement identiques. Le cycle correspondant à une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures est plus large, ce qui correspond à des pertes magnétiques plus élevées. Ceci confirme ce qui a été dit précédemment lors de ma mesure des pertes magnétiques au wattmètre.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence d'une contrainte thermique sur les caractéristiques magnétiques des tôles à grains orientés utilisées dans la construction des transformateurs. Notre étude a également porté sur les tôles à grains non orientés utilisés dans la réalisation des machines électriques tournantes.

L'étude de la perméabilité relative en courant continu montre qu'elle est influencée par la contrainte thermique pour les deux types de tôles étudiées. En effet dans le cas des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal, cette perméabilité passe d'une valeur de 10923 pour des tôles vierges à 10361 pour des tôles ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Dans le cas des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal, la perméabilité passe par un maximum de 4070 pour les tôles vierges. Ce maximum n'est que de 3883 pour les tôles ayant subi un chauffage de 225°C pendant 168 heures. Il est à noter que les perméabilités des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal sont médiocres. Dans le cas des tôles à grains orientés, la perméabilité relative passe par un maximum de 49851 pour des tôles vierges.

L'étude de la perméabilité relative en alternatif en fonction de la contrainte thermique montre une tendance pas très claire pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal. En effet la perméabilité relative augmente puis diminue quand le temps de l'application de la contrainte thermique passe de 24 heures à 168 heures. Pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal, les trois maxima ont l'air confondus. Concernant les tôles à grains orientés, le maximum de la perméabilité relative après chauffage de 24 heures sous 225°C diminue. Ce maximum augmente ensuite pour les tôles ayant subi une contrainte thermique pendant 168 heures et passe au dessus de celui correspondant aux tôles vierges.

L'étude des pertes magnétiques en fonction de l'induction maximale montre qu'elles augmentent vers les inductions élevées quand le temps d'application de la contrainte thermique est de 168 heures. Ceci est valable pour les tôles à grains non orientées. Dans le cas des tôles à grains orientés, les pertes mesurées après la contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures augmentent pratiquement dès les petites inductions magnétiques.

Le tracé des cycles d'hystérésis pour les inductions élevées montre que l'aire du cycle augmente légèrement pour les tôles à grains non orientés suite à la contrainte thermique. Concernant les tôles à grains orientés, l'aire du cycle augmente de manière accentuée entre le chauffage pendant 24 heures et 168 heures.

La perspective que pourrait ouvrir ce travail est la poursuite de l'étude des caractéristiques magnétiques des différentes tôles avec des temps d'application de la contrainte thermique plus lents.

Références bibliographiques

- [1] H. Yan Lu, J. G. Zhu and S. Y. Ron Hui, "Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, N° 11, November 2007.
- [2] N. Takahashi, M. Morishita, D. Miyagi, and Masanori Nakano, "Examination of magnetic properties of magnetic materials at high temperature using a ring specimen", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, N°2, February 2010.
- [3] P. Robert, " Matériaux de l'électrotechnique", édition Dunod, paris, 1987.
- [4] P. Brissonneau, " Magnétisme et matériaux pour l'électrotechnique", Edition Hermès, Paris, 1997.
- [5] M. Imache, " Etude de la technologie et des caractéristiques de l'alliage magnétique fer-silicium", mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2001.
- [6] C. Kittel, " Physique de l'état solide", édition Dunod, paris, 1972.
- [7] L. Sedkaoui, "Les tôles magnétiques fer-silicium : Caractéristiques et processus d'élaboration", mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [8] J. L. Dalmaso, "Cours de l'électrotechnique", 1985.
- [9] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials ", IEEE Trans. On magnetics, MAG 24, (1988), P.621-630.
- [10] J. L. Porteseil, O. Geoffroy, " Les matériaux doux pour l'électrotechnique basse fréquence " Presse universitaire de Grenoble 1999.
- [11] J. C. Bavay et J. Verdun " Alliages fer-silicium ", Techniques de l'ingénieur, Traité de Génie Electrique.
- [12] N. Bendif, M. Boudissa, K. Saidani, "Caractérisation des tôles magnétiques utilisées dans la construction des machines électriques", mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [13] M. G. Say, " Alliages magnétiques et ferrites", édition Dunod, paris, 1956.
- [14] Document de l'entreprise Electro-Industries.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence d'une contrainte thermique sur les caractéristiques magnétiques des tôles à grains orientés utilisées dans la construction des transformateurs. Notre étude a également porté sur les tôles à grains non orientés utilisés dans la réalisation des machines électriques tournantes.

L'étude de la perméabilité relative en courant continu montre qu'elle est influencée par la contrainte thermique pour les deux types de tôles étudiées. En effet dans le cas des tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal, cette perméabilité passe d'une valeur de 10923 pour des tôles vierges à 10361 pour des tôles ayant subi une contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures. Dans le cas des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal, la perméabilité passe par un maximum de 4070 pour les tôles vierges. Ce maximum n'est que de 3883 pour les tôles ayant subi un chauffage de 225°C pendant 168 heures. Il est à noter que les perméabilités des tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal sont médiocres.

Dans le cas des tôles à grains orientés, la perméabilité relative passe par un maximum de 49851 pour des tôles vierges.

L'étude de la perméabilité relative en alternatif en fonction de la contrainte thermique montre une tendance pas très claire pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens longitudinal. En effet la perméabilité relative augmente puis diminue quand le temps de l'application de la contrainte thermique passe de 24 heures à 168 heures. Pour les tôles à grains non orientés découpées dans le sens transversal, les trois maxima ont l'air confondus. Concernant les tôles à grains orientés, le maximum de la perméabilité relative après chauffage de 24 heures sous 225°C diminue. Ce maximum augmente ensuite pour les tôles ayant subi une contrainte thermique pendant 168 heures et passe au dessus de celui correspondant aux tôles vierges.

L'étude des pertes magnétiques en fonction de l'induction maximale montre qu'elles augmentent vers les inductions élevées quand le temps d'application de la contrainte thermique est de 168 heures. Ceci est valable pour les tôles à grains non orientées. Dans le cas des tôles à grains orientés, les pertes mesurées après la

contrainte thermique de 225°C pendant 168 heures augmentent pratiquement dès les petites inductions magnétiques.

Le tracé des cycles d'hystérésis pour les inductions élevées montre que l'aire du cycle augmente légèrement pour les tôles à grains non orientés suite à la contrainte thermique. Concernant les tôles à grains orientés, l'aire du cycle augmente de manière accentuée entre le chauffage pendant 24 heures et 168 heures.

La perspective que pourrait ouvrir ce travail est la poursuite de l'étude des caractéristiques magnétiques des différentes tôles avec des temps d'application de la contrainte thermique plus lents.