

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI DE BORDJ BOUARRERIDJ

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Physique
Spécialité : Physique des matériaux

Intitulé

Réalisation expérimentale de l'hystérésis
ferromagnétique

Présenté Par :

Ilham BOUSSELOUB

Soutenu publiquement le : 26 / 06/2023

Jury de soutenance :

Président :	Mounira BERREHAIL	MCA	Univ. BBA
Encadreur :	Leila BAAZIZ	MCB	Centre Universitaire Mila
Co-encadreur :	Nadjat BENCHIHEUB	MCB	Univ. BBA
Examineur :	Nadhira BIOUD	MCA	Univ. BBA

Année Universitaire: 2022/2023

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

La réalisation expérimentale a été élaborée entre le laboratoire de Physique Labo 20 et 13 du département des Sciences de la Matière, Faculté des sciences et de la Technologie, Université Mohamed El Bachir El IBRAHIMI de Bordj Bou Arreridj et le laboratoire d'électronique du centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF de Mila. Ce travail a eu besoin de la contribution de plusieurs personnes, dont je tiens à les remercier.

J'adresse mes sincères remerciements à l'encadreur madame Leila BAAZIZ, Maître de conférences B au Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF de Mila de m'avoir aidée et assurée la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à l'encadreur madame Nadjat BENCHIHEUB, maître de conférences B, à l'Université Mohamed El Bachir El IBRAHIMI de Bordj Bou Arreridj, pour m'avoir encouragée, aidée et guidée tout au long de ce travail.

Mes reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département des Sciences de la Matière de l'Université Mohamed El Bachir El IBRAHIMI de Bordj Bou Arreridj pour leurs disponibilités et encouragement.

DIDICACE

Je dédie ce modeste travail

A Ma mère et Mon père

A mes chère frère Housseem, Raouf, Hamza, Charaf, Zouheir, et Ishak

A mes chère sœurs Souheïla, Asma et chahra

A mes chères Samir et Tarek, Rayan et Foulla

Et les enfants Adem, Dayaa, Anas, Yazan, Anaiis et Djana

A tout ma famille, mes amis et mes proches

A Rania et sa famille Bendjedi, Nadir Seddiki et Amar Kharfi

A toute personne qui porte de l'estime pour moi

LA
BIBLIOGRAPHIE

La Bibliographie

I.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	4
--------------------------------	---

CHAPITRE1: INTRODUCTION AU MAGNETISME ET A L'HYSTÉRÉSIS

I.2 CONCEPTS GÉNÉRAUX SUR LES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES	4
---	---

I.3 GRANDEURS MAGNÉTIQUES.....	5
--------------------------------	---

I.3.1 Le champ magnétique	5
---------------------------------	---

I.3.2 Le moment magnétique.....	5
---------------------------------	---

I.3.3 L'aimantation	6
---------------------------	---

I.3.4 L'induction électromagnétique	6
---	---

I.3.5 La perméabilité magnétique	7
--	---

I.4 MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES	Error! Bookmark not defined.
---------------------------------	-------------------------------------

I.4.1 Classification des matériaux magnétiques	7
--	---

I.4.2 Classification des matériaux ferromagnétiques.....	10
--	----

I.5 PHÉNOMÈNE DE L'HYSTÉRÉSIS MAGNÉTIQUE ET COURBE DE PREMIÈRE AIMANTATION.....	Error! Bookmark not defined.
--	-------------------------------------

I.5.1 Définition	11
------------------------	----

I.5.2 Courbe de première aimantation	11
--	----

I.5.3 Courbe anhystérétique:	12
------------------------------------	----

I.5.4 Cycle d'hystérésis.....	13
-------------------------------	----

I.5.5 Grandeurs Caractéristiques de cycle d'hystérésis	14
--	----

I.5.6 Types du cycle d'hystérésis	14
---	----

I.6 QUELQUES FORMES DU CYCLE D'HYSTÉRÉSIS MAGNÉTIQUE.....	14
---	----

I.6.1 Cycles d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques doux et durs	15
---	----

I.6.2 Cycles d'hystérésis des matériaux soumis à des traitements thermiques.....	15
--	----

I.6.3 Cycles d'hystérésis rectangulaire	16
---	----

I.6.4 Cycles d'hystérésis des matériaux pour des fréquences différentes	17
---	----

I.7 Configuration en domaines magnétiques.....	18
--	----

I.7.1 Mécanismes d'aimantation.....	19
-------------------------------------	----

I.8 LES PERTES DANS LES MATÉRIAUX FERROMAGNÉTIQUES.....	20
---	----

I.8.1 Expressions des pertes	20
------------------------------------	----

I.8.2 Perte par courant de Foucault.....	20
--	----

I.8.3 Les pertes par hystérésis	21
---------------------------------------	----

CHAPITRE 2: RÉALISATION EXPERIMENTALE DE L'HYSTÉRÉSIS FERROMAGNÉTIQUE

II.1 INTRODUCTION.....	23
II.2 RÉALISATION EXPERIMENTALE DE L'HYSTÉRÉSIS A L'OSCILLOSCOPE.....	23
II.2.1 Un circuit magnétique fermé	23
II.2.2 Un système d'alimentation	24
II.2.3 Oscilloscope analogique	24
II.2.4 Une Rhéostat	24
II.2.5 Un intégrateur (Résistance et capacité)	24
II.3 ÉCHANTILLONS TORIQUES DE DIMENSIONS VARIÉES	25
II.4 PRINCIPE ET RELATIONS MATHÉMATIQUES NECESSAIRE POUR LA DETERMINATION DE B ET H	26
II.5 CYCLE D'HYSTÉRÉSIS DES ÉCHANTILLONS TORIQUES.....	27
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	31

*LISTE DES
FIGURES*

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I- 1 : Structure atomique[10].....	5
Figure I- 2 : L'induction magnétique dB créé par un élément de courant I dl [5].....	6
Figure I- 3 : Matériau diamagnétique [17]	8
Figure I- 4 : matériau paramagnétique [17]	9
Figure I- 5 : matériau antiferromagnétique [17]	9
Figure I- 6 : matériau ferrimagnétique [17]	10
Figure I- 7 : Classification des principaux types des matériaux ferromagnétiques doux	11
Figure I- 8 : courbe de première aimantation.....	12
Figure I- 9 : Cycle d'hystérésis et Courbe anhystérétique.....	12
Figure I- 10 : Cycle d'hystérésis	13
Figure I- 11 : cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux.....	15
Figure I- 12 : cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique dur	15
Figure I- 13 : Cycles d'hystérésis du Permalloy 65 soumis à un traitement thermique à différentes manières[3]	16
Figure I- 14 : commencement du champ H_S et le champ critique H_0 d'un matériau au cycle d'hystérésis avec des côtés droits[3]	17
Figure I- 15 :b	17
Figure I- 16 :a.....	17
Figure I- 17 :d	18
Figure I- 18 :c.....	18
Figure I- 19 : direction du champ magnétique appliqué[12]	19
Figure I- 20 : Domaines de Weiss magnétique appliqué [12]	19
Figure I- 21 : Mécanisme d'aimantation	20
Figure I- 22 : Courants de Foucault microscopiques lors du déplacement d'une paroi à 180° [12]	21

CHAPITRE II

Figure II- 1 : Banc d'essai réalisé au laboratoire	24
Figure II- 2 : Schéma représentatif montage expérimental	25
Figure II- 3 : Echantillon test (2)	25
Figure II- 4 :Echantillon test (1)	25
Figure II- 5 : Circuit intégrateur	27
Figure II- 7 : Cycle d'hystérésis pour le deuxième échantillon.....	28
Figure II- 6 : Cycle d'hystérésis pour le premier échantillon.....	28

*LISTE DES
TABLEAUX*

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Tableau I- 1: Susceptibilités de certains matériaux paramagnétiques.....8

CHAPITRE II

Tableau (II- 1) : Les paramètres magnétiques de cycle d'hystérésis28

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

Etant donnée, le magnétisme est un phénomène important dans notre vie, ce qui a poussé les physiciens à s'investir dans la compréhension avancée et approfondie des propriétés des matériaux magnétiques.

Parmi les matériaux magnétiques, on s'est intéressé dans ce mémoire à la caractérisation des matériaux ferromagnétiques doux. Ils sont de grande importance en électrotechnique et électronique, ils présentent une meilleure application dans la fabrication des circuits magnétiques, transformateurs et moteurs. Par ailleurs, la plupart des applications reposent sur l'étude du cycle d'hystérésis magnétique, ce phénomène complexe, permet la détermination des paramètres caractéristiques de ces matériaux magnétiques. En outre ce phénomène n'est uniquement pas réservé aux matériaux magnétiques, il s'étant aux autres disciplines à savoir :

Deux catégories essentielles de méthodes de détermination du cycle d'hystérésis, la première méthode est basée sur l'application d'une force sur un matériau magnétique immergé dans un gradient du champ, on utilise la balance de Faraday. En revanche, l'autre technique, couramment exploitée, son principe repose sur la loi de l'induction magnétique, et caractérisé par la représentation graphique de l'induction magnétique B induite par l'échantillon en fonction du champ magnétique H . Or dans ce manuscrit, nous avons réalisés un montage pratique permettant la visualisation de cette courbe.

Le travail de notre mémoire est agencé en deux grands chapitres et une introduction générale, Le premier chapitre donne un aperçu sur le magnétisme et les matériaux ferromagnétique, et s'achève par une présentation plus ou moins détaillée du phénomène d'hystérésis.

Quant aux deuxième chapitre, il consacré à la description du banc d'essais expérimental que nous avons conçu pour l'obtention du phénomène d'hystérésis ferromagnétiques.

Une conclusion générale marque la fin du présent manuscrit.

Chapitre I
Introduction Au
Magnétisme Et A
L'hystérésis

I.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons présenter des notions utiles pour la description du magnétisme et la classification des matériaux magnétiques à partir de leur comportement magnétique compris les matériaux ferromagnétiques qui feront le sujet du travail présenté à travers ce manuscrit. Sous l'influence d'un champ magnétique extérieure, ces matériaux ferromagnétiques présentent la propriété d'hystérésis magnétique. A cet égard, un alignement des dipôles électriques atomiques par rapport au champ appliqué se produit. L'hystérésis est présentée par une courbe non linéaire de l'induction magnétique induite vis à vis au champ appliquée c.à.d. $B - H$ est alors discutée. Du quel, des paramètres caractéristiques du matériau étudié tel que le champ magnétique maximal H_{max} , l'induction de saturation B_s , et rémanente B_r peuvent être déterminés. Ainsi nous avons exposés quelques effets pouvant avoir une influence importante sur la forme de la courbe magnétique comme la température, nature du matériau ferromagnétique. Nous nous sommes intéressés par la suite à décrire le processus d'aimantation basé sur la déformation des parois de Bloch et détailler les pertes magnétiques dans la matière.

I.2 Concepts généraux sur les matériaux magnétiques

Le magnétisme d'un matériau est dû aux mouvements des électrons (chargés e) des couches électroniques incomplètes, il est la contribution : du mouvement circulaire des électrons de masse m_e autour du noyau des atomes de ce matériau, qui engendre un champ magnétique orbitale ;

$$M_O = m. \mu_\beta \quad (I-1)$$

Où m est le nombre quantique magnétique associé à l'électron et μ_β est le magnéton de Bohr, avec :

$$\mu_\beta = \frac{eh}{4\pi m_e} \quad (I-2)$$

Où h constante de Planck ($6.626.10^{-34} J.s$)

Egalement, il est dû aux mouvements de rotation de l'électron sur lui-même, c'est le spin de l'électron, cette rotation de spin engendrera aussi un champ magnétique intrinsèque ou encore de spin. Le mouvement magnétique orbital et de spin génère donc des dipôles magnétiques qui sont caractérisés par un moment magnétique qui seront influencer par l'application d'un

Chapitre I : Introduction Au Magnétisme ET A l'hystérésis

champ magnétique extérieur [3]. Le moment magnétique total de l'atome sera égal à la somme vectorielle des moments magnétiques orbitaux et de spins de tous les électrons gravitant autour du noyau de cet atome [3].

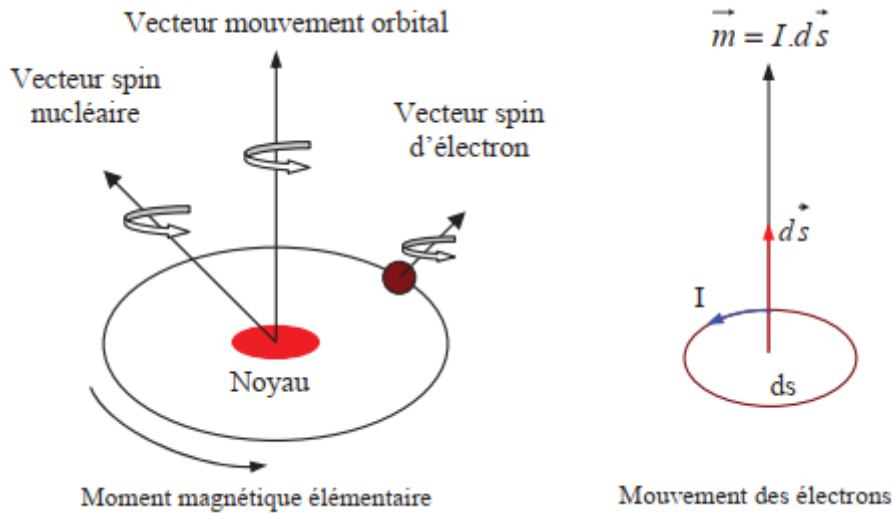


Figure I- 1: Structure atomique[10]

I.3 Grandeurs magnétiques

I.3.1 Le champ magnétique

Le champ magnétique est une grandeur directement liée au courant électrique si les phénomènes de propagation sont négligés. Le champ magnétique ne peut être mesuré directement. Il est déduit de la mesure de l'induction dans le vide, l'induction et le champ sont alors liés par la relation [7].

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (I-3)$$

où \mathbf{B} est l'induction, \mathbf{H} est le champ magnétique et μ_0 la perméabilité du vide.

I.3.2 Le moment magnétique

Le moment est associé à l'existence de charge en mouvement [7]. Si un courant I parcourt une trajectoire circulaire définissant une surface ds .

$$dm = I \cdot ds \quad (I-4)$$

I.3.3 L'aimantation

L'aimantation d'un objet est une force magnétique, et est définie comme la densité volumique du moment dipolaire, c'est une grandeur vectorielle de symbole M . Ainsi, un petit élément de volume Δv , possède le moment dipolaire magnétique ΔM tel que l'on a :

$$\Delta M = M \cdot \Delta v \quad (I-5)$$

M est appelée aimantation ou intensité d'aimantation, sa connaissance en tout point permet de définir complètement l'état magnétique de la matière à l'échelle macroscopique. Elle s'exprime en Ampère par mètre (A/m).

À l'échelle microscopique ce volume élémentaire contient un grand nombre d'atomes ce qui lui donne une grande importance. Si l'aimantation est uniforme, les courants des dipôles magnétiques seront éliminés on aura un matériau neutre. En revanche, si l'aimantation n'est pas uniforme, les dipôles magnétiques ne seront pas éliminés et donnent naissance à des courants de magnétisation même en absence de charge. Ces courants produisent un champ magnétique [5,6].

I.3.4 L'induction électromagnétique

Si un fil est parcouru par un courant continu I , le champ magnétique (parfois appelée induction magnétique ou densité du flux magnétique), en un point M associé à un élément de longueur dl parcouru par le courant I est donné par :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{I \cdot dl \wedge \vec{u}}{r^2} \right] \quad (I-6)$$

où r la distance de l'élément dl au point M .

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

B l'induction magnétique exprimée en Tesla (T).

\vec{u} le vecteur unitaire de la droite orientée de l'élément dl au point M [5].

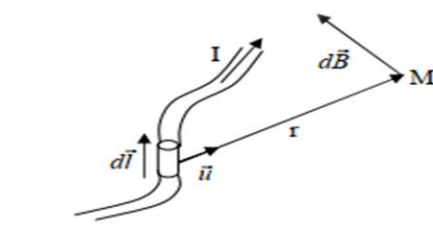


Figure I- 2 : L'induction magnétique $d\vec{B}$ créé par un élément de courant $I d\vec{l}$ [5].

I.3.5 La perméabilité magnétique

En général, un matériau magnétique est caractérisé par sa perméabilité μ [H/m], propriété intrinsèque qui reflète sa capacité à « faciliter le passage du flux magnétique ». Comme la conductivité électrique, caractérise un matériau conducteur, est la facilité avec laquelle le courant électrique peut circuler. Dans le cas linéaire et isotrope elle est déterminée par :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (1 + \chi) \quad (I-7)$$

Avec μ_r la perméabilité relative du matériau.

M L'aimantation.

la susceptibilité magnétique χ [4].

Ainsi, sous l'application d'un champ d'excitation H , à l'induction magnétique B [T] créée dans le vide ($B = \mu_0 H$), s'ajoute la polarisation du milieu aimanté. La loi de comportement du matériau s'écrit alors :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (I-8)$$

I.4 Matériaux magnétiques

Soit un corps homogène dont un ou plusieurs des atomes qui le composent possèdent un moment magnétique, ce corps est appelé matériau magnétique si les moments des atomes s'organisent de manière cohérente sous l'action d'une contrainte ou d'un champ. Le comportement des atomes est donc à l'origine de l'aimantation qui exprime les qualités magnétiques du matériau [7].

I.4.1 Classification des matériaux magnétiques

Les moments magnétiques dépendent de l'environnement magnétique de chaque atome à savoir la nature et la position des atomes voisins, la température et le champ magnétique appliqué. Selon le comportement de cet ensemble, on distingue différents types de matériaux magnétiques, on distingue :

I.1.1.a Diamagnétique

Sous un champ magnétique extérieur appliqué sur un corps à l'ensemble des électrons en mouvement électronique avec une vitesse angulaire de rotation autour de la direction du champ magnétique appliqué. Par conséquent des moments magnétiques seront induits dans la substance qui s'aligne dans le sens opposé au champ appliqué. L'aimantation produite est de sens inverse au champ extérieur [5,6,8].

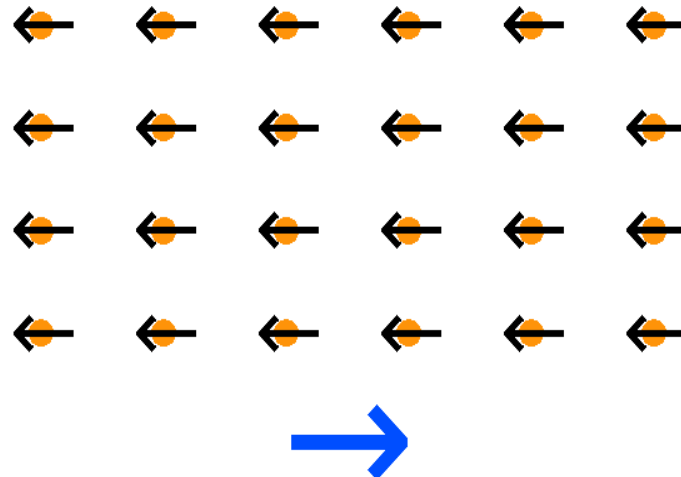


Figure I- 3 : Matériau diamagnétique [17]

I.4.1.a Paramagnétique

Lorsqu'il existe dans la substance des porteurs de moment magnétique permanent, d'autres effets magnétiques se superposent au diamagnétisme, c'est-à-dire lorsque les atomes possèdent leur propre moment magnétique permanent, le diamagnétisme est masqué par le paramagnétisme. Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, ces atomes s'orientent selon le champ appliqué et l'amplifient. Il s'agit alors du paramagnétisme les moments magnétiques élémentaires orientés au hasard en raison de l'agitation thermique, tendent à s'aligner le long du champ, créant ainsi une aimantation qui vient renforcer l'action du champ appliqué. Ces matériaux magnétiques présentent une susceptibilité magnétique faible mais positive, de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} [5,6].

Matériaux	Susceptibilité
Aluminium	$7.7 \cdot 10^{-6}$
Tungstène	$3.5 \cdot 10^{-6}$
Platine	$1.2 \cdot 10^{-6}$

Tableau I- 1: Susceptibilités de certains matériaux paramagnétiques

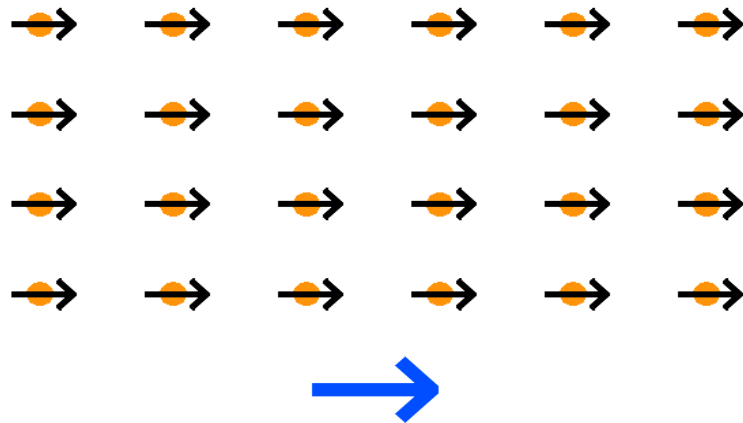


Figure I- 4 : matériau paramagnétique [17]

I.4.1.b Antiferromagnétiques

Pour les substances antiferromagnétiques, l'alignement est antiparallèle et les moments magnétiques des ions du réseau cristallin sont orientés deux à deux en sens contraire. Ceci veut dire que le matériau ne montre aucune aimantation spontanée et l'aimantation de l'ensemble est alors nulle, les moments magnétiques d'un atome s'inversent avec celui de l'atome voisin [3,9].

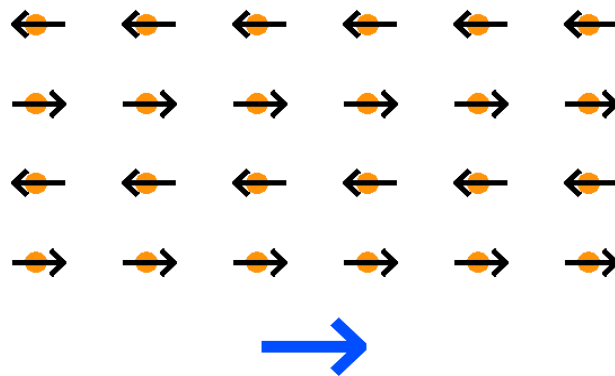


Figure I- 5 : matériau antiferromagnétique [17]

I.4.1.c Ferrimagnétique

Le mot ferrimagnétisme est le terme proposé par Néel pour décrire le comportement magnétique des ferrites. Dans ces matériaux les ions occupent deux types de réseaux cristallins. Dans le premier type les spins sont orientés dans une même direction alors que dans le deuxième réseau cristallin leurs orientations sont telles qu'ils s'opposent aux spins du premier réseau. Il en résulte une aimantation spontanée non nulle. Les matériaux se comportent de façon très semblable aux ferromagnétiques. Cependant, leur aimantation à saturation est en générale plus

faible. Les ferrimagnétiques sont en général des isolants. Leur résistivité étant de l'ordre de $1 \Omega m$ [3,6].

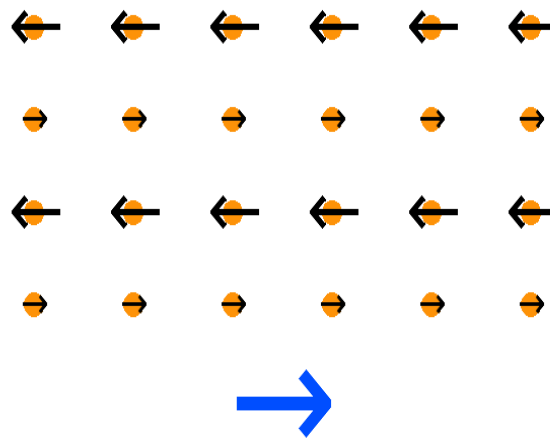


Figure I- 6 : matériau ferrimagnétique [17]

I.4.1.d Ferromagnétique

Les principales substances ferromagnétiques sont le Fer, le Nickel, le Cobalt, le Gadolinium et leurs alliages et certains de leurs composés. Ils présentent, une aimantation même en l'absence de champ magnétique extérieur, aimantation spontanée, magnétique pour un matériau linéaire, homogène et isotrope est donnée par:

$$\mathbf{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (I-9)$$

Pour les matériaux ferromagnétiques $\mu_r \gg 1$, ce qui permet d'amplifier la valeur de l'induction B pour une valeur H donnée. Cette propriété est très utile dans les dispositifs de conversion électromagnétique de l'énergie [8].

I.4.2 Classification des matériaux ferromagnétiques

Ces matériaux présentent la particularité d'avoir des moments magnétiques identiques et orientés dans la même direction. Ils se scindent en deux grandes familles, on distingue les matériaux durs et les matériaux doux.

I.4.2.a Matériaux ferromagnétique doux

Ils peuvent être aimantés facilement sous l'influence d'un champ magnétique faible. Ils sont utilisés dans les noyaux des transformateurs, des moteurs et des générateurs, dans les inductances de précision des circuits électroniques. Il existe deux types de matériaux magnétiques doux qui peuvent être utilisés pour limiter les pertes par courants de Foucault : les matériaux en tôles isolées comme les tôles de type (**F e – Si**) et les

matériaux en poudres de fer. Les premiers sont les plus répandus et le plus utilisé, notamment aux basses fréquences, tandis que les seconds sont utilisés pour les hautes fréquences. Exemple : (**FeSi**) [10,12].

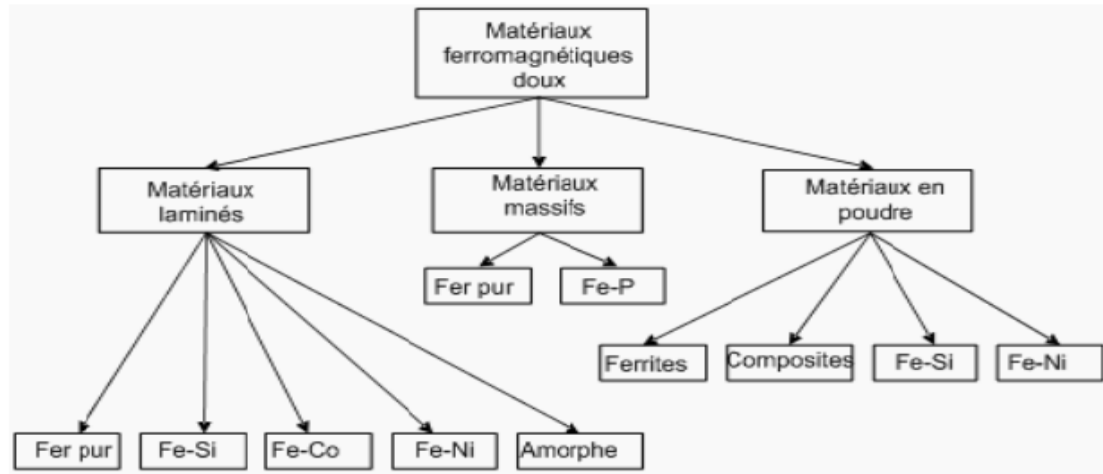


Figure I- 7 : Classification des principaux types des matériaux ferromagnétiques doux

I.4.2.b Matériaux ferromagnétiques durs

On appelle matériau magnétique dur, un matériau dont la valeur de la polarisation J reste sensiblement égale à sa valeur à saturation tant que le module du champ magnétique ne dépasse une certaine limite, cette limite devant être élevée [12].

I.5 Phénomène de l'hystérésis magnétique et courbe de première aimantation

I.5.1 Définition

Si l'on applique au matériau magnétique une tension alternative, on parcourt après une période, un cycle dans le plan (H, B) suivant le sens trigonométrique ; appelé cycle d'hystérésis ou d'hystérèse. Sa forme dépend de la nature chimique et structurale du matériau étudié, et est fonction des énergies magnétique set du champ appliqué. De ce faite, elle peut être considérée comme une caractéristique du matériau [9,13].

I.5.2 Courbe de première aimantation

La courbe de première aimantation d'un matériau ferromagnétique représente le passage de son état désaimanté ($M = 0$) à son état dit de saturation. L'action du champ magnétique H a pour

Chapitre I : Introduction Au Magnétisme ET A l'hystérésis

effet de favoriser l'augmentation du volume des domaines de Weiss orientés dans le sens du champ [18].

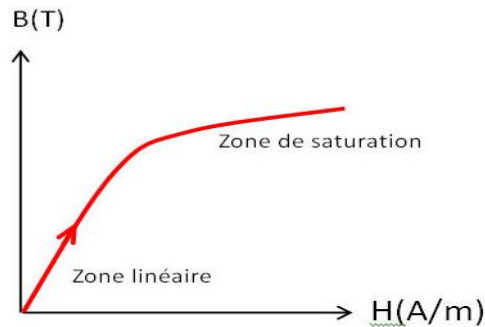


Figure I- 8 : courbe de première aimantation

I.5.3 Courbe an hystérétique

Est la courbe qui représente l'induction en fonction du champ tel qu'il serait ; lorsque les transformations dans le matériau étaient réversibles. Pour déterminer expérimentalement cette courbe, un champ sinusoïdal décroissant est superposé au champ continu dont la valeur de l'induction est recherchée. A partir de l'état désaimanté, lorsqu'on applique au matériau un champ d'excitation H , on obtient son aimantation normale (H). Il suffit alors de superposer à H un champ alternatif supplémentaire de même direction, de module initial suffisant pour saturer l'échantillon, que l'on fait décroître lentement et régulièrement jusqu'à une amplitude nulle [11,14].

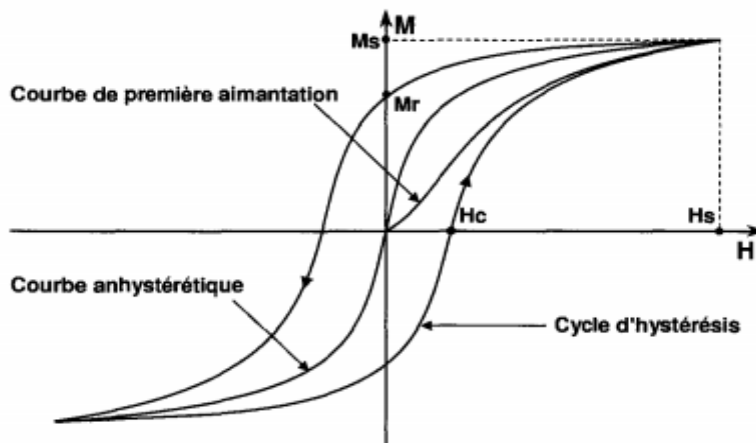


Figure I- 9 : Cycle d'hystérésis et Courbe anhystérétique

I.5.5 Grandeurs Caractéristiques du cycle d'hystérésis

I.5.5.a Saturation

Lorsque le champ magnétique H augmente à l'infini, la polarisation tend vers une valeur maximale. Tous les moments du matériau sont alors orientés dans le sens du champ. On dit que le matériau est à saturation. L'induction, elle, continue d'augmenter indéfiniment avec le champ.

I.5.5.b Champ coercitif H_c

C'est le champ magnétique nécessaire à partir de l'induction rémanente pour annuler l'induction [7].

I.5.5.c Induction rémanente B_r

Il s'agit de la valeur de l'induction résiduelle, lorsque le champ appliqué est disparu. Cette valeur montre que le matériau ne peut être spontanément démagnétisé.

I.5.6 Types du cycle d'hystérésis

Les types de cycles d'hystérésis, sont :

I.5.6.a le cycle majeur

Ce cycle est obtenu en faisant varier le champ magnétique d'une valeur suffisamment élevée pour que le matériau soit saturé jusqu'à la saturation opposée du matériau. Tout point (H, M) à l'intérieur du cycle majeur est un état possible du matériau. Le comportement d'un matériau dépend ainsi non seulement de la valeur courante de H mais aussi de l'histoire du matériau [15].

I.5.6.b Le Cycle mineur

Un cycle d'hystérésis mineur est un cycle d'hystérésis avec un champ appliqué maximal mais inférieur au champ de saturation. A l'aide de cycles mineurs, on peut étudier le retournement d'une petite partie de la particule sans faire intervenir la complexité de la particule entière [15].

I.6 Quelques formes du cycle d'hystérésis magnétique

La forme de la courbe d'hystérésis change d'un matériau à un autre, elle change en fonction des conditions d'utilisation, de la nature du matériau ferromagnétique, des traitements qu'a subi, de :

I.6.1 Cycles d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques doux et durs

Les matériaux ferromagnétiques doux, ont une susceptibilité magnétique initiale très importante. Leur aimantation rémanente H_c n'est pas très importante est facile à annuler. Ils sont caractérisés par une très haute perméabilité, une induction à saturation B_s élevée et des faibles pertes par hystérésis.

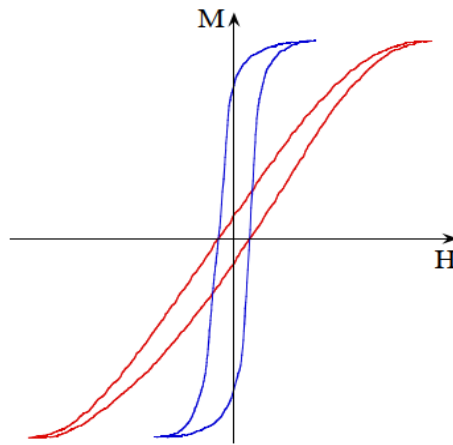


Figure I- 11 : cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux

Les matériaux ferromagnétiques durs présentent une aimantation rémanente très élevée. En général, celle-ci est très difficile à annuler car le champ magnétique coercitif est également très important, Le champ coercitif est alors de 50 à 100 kA/m et peut atteindre 1000 kA/m .

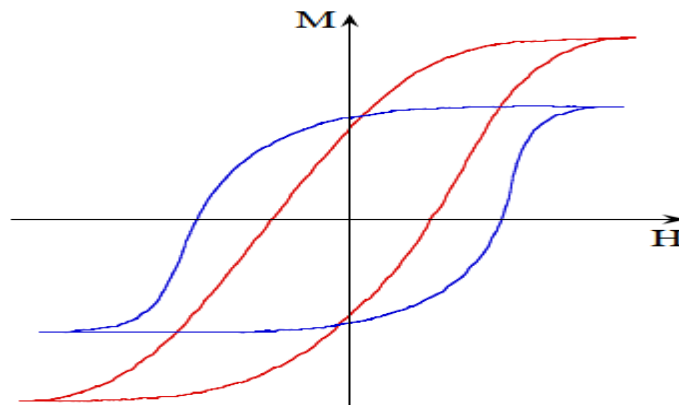


Figure I- 12: cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique dur

I.6.2 Cycles d'hystérésis des matériaux soumis à des traitements thermiques

Dans les domaines faibles et moyen champ, si la perméabilité est constante, on observe pour certains matériaux, qu'ils possèdent un cycle d'hystérésis étroit et resserré. Dans une étude antérieure [4], il est à noter que le traitement thermique a modifié le caractère resserré du cycle

Chapitre I : Introduction Au Magnétisme ET A l'hystérésis

d'hystérésis et également la perméabilité a augmenté dans les domaines faibles champs. Le cycle d'hystérésis étroit et resserré pour le matériau Permalloy 65 qui a été traité au four pendant 24 heures à 425°C Comme le fait montrer la figure (I – 20 – (b)).sa comparaison avec des cycles (a),(c), et (d) sur la même figure ayant subi trois autres traitements thermiques, montre que ce matériau présente des cycles normaux non resserrés quand ils sont traités au four ou refroidis rapidement. Les perméabilités initiales et maximales, aussi bien que le champ coercitif et la rémanence de tels matériaux, sont aussi sensibles au traitement thermique, or, l'induction à saturation ne montre aucun changement [3].

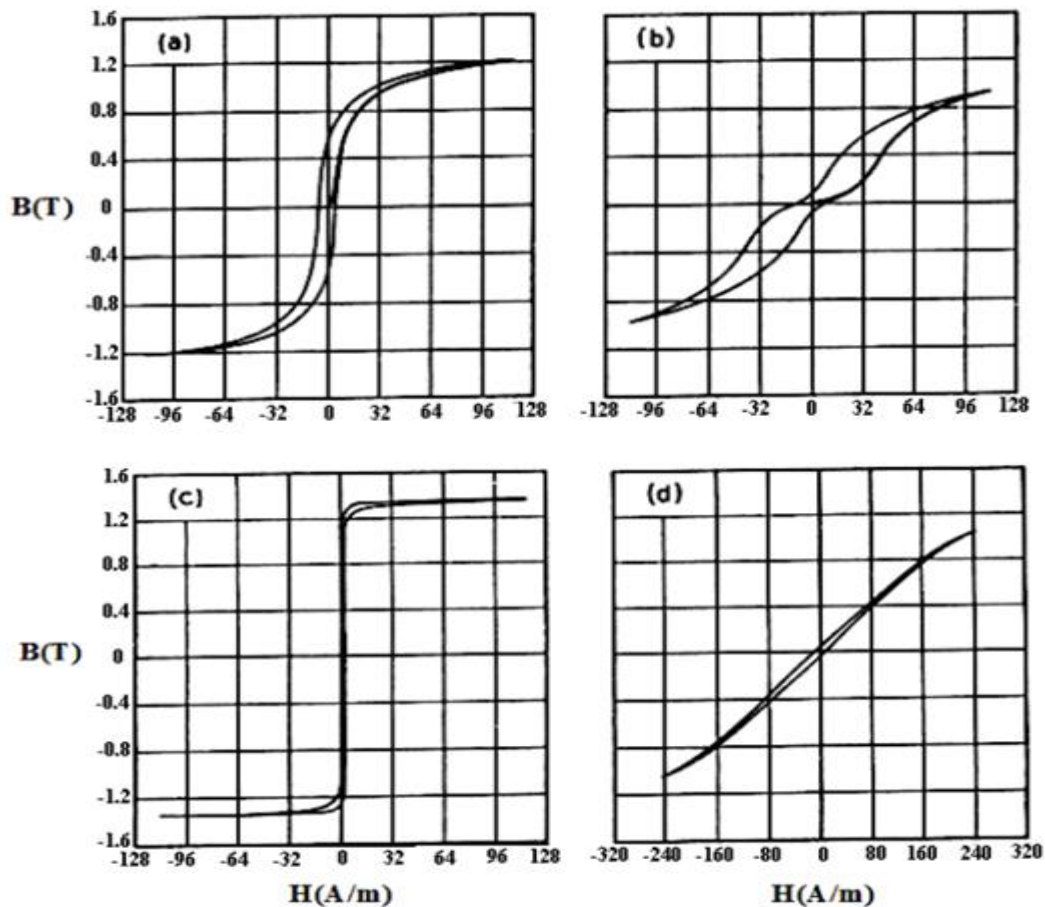


Figure I- 13 : Cycles d'hystérésis du Permalloy 65 soumis à un traitement thermique à différentes manières[3]

(a) recuit à 1000°C.

(b) recuit au four à 425°C pendant 24 heures.

(c) soumis à un traitement thermique dans un champ longitudinal.

(d) soumis à un traitement thermique dans un champ transversal.

I.6.3 Cycles d'hystérésis rectangulaire

Chapitre I : Introduction Au Magnétisme ET A l'hystérésis

Dans quelques matériaux la partie rigide du cycle d'hystérésis devient simplement une ligne verticale lorsque le cycle devient un rectangle, ou presque avec des lignes se prolongeant horizontalement des bouts du cycle [3].

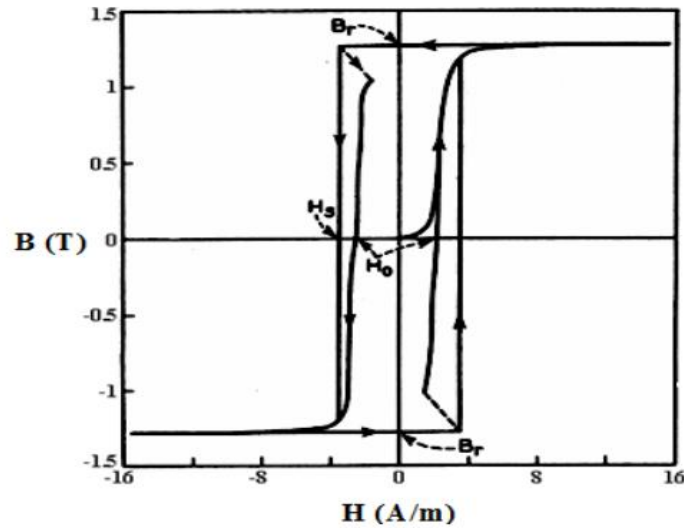
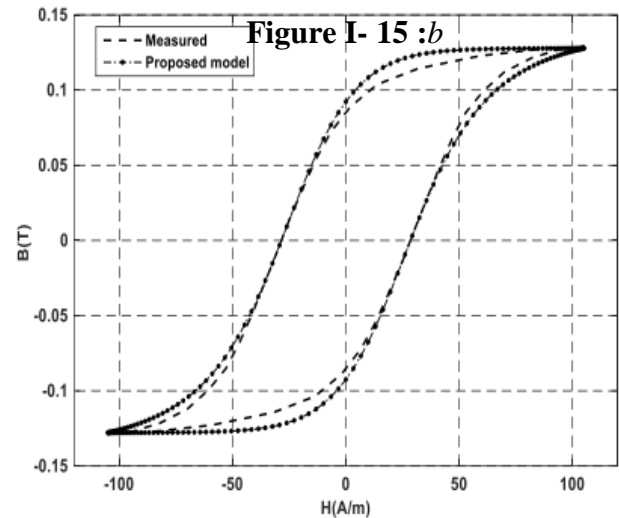
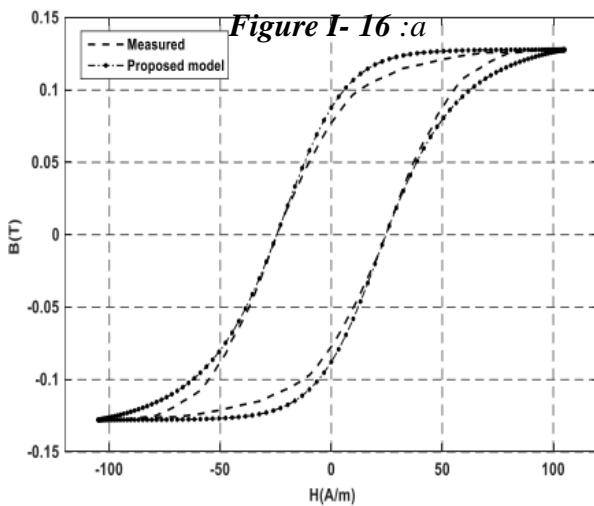
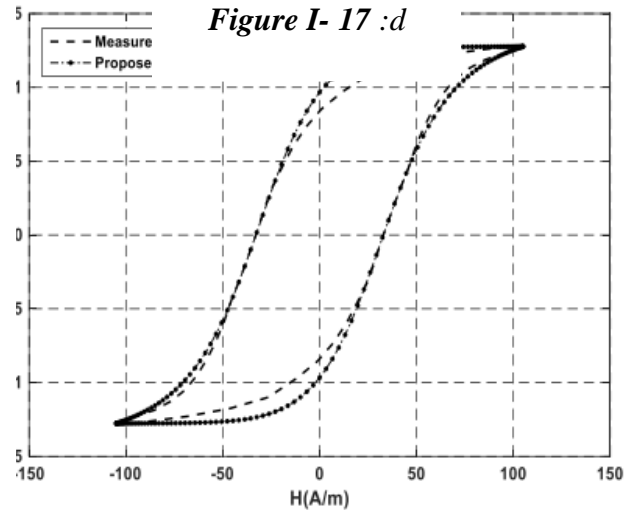
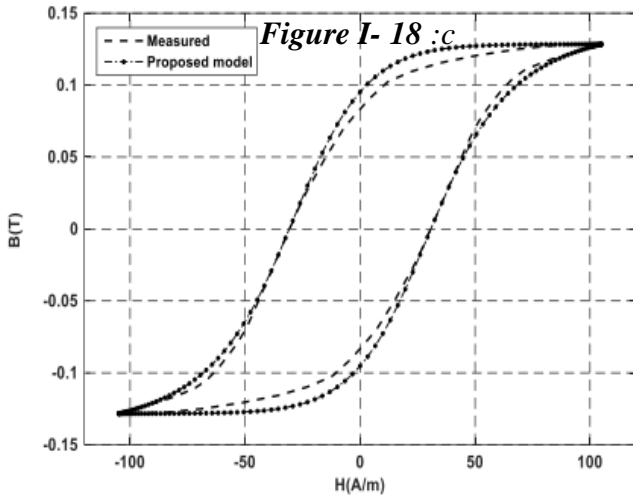


Figure I- 14 : commencement du champ H_s et le champ critique H_0 d'un matériau au cycle d'hystérésis avec des côtés droits[3]

I.6.4 Cycles d'hystérésis des matériaux pour des fréquences différentes





I.7 Configuration en domaines magnétiques

Le phénomène d'orientation des moments magnétiques à l'intérieur des matériaux ferromagnétiques se produit de manière localisée. L'expérience montre que tous les matériaux magnétiques de volume suffisant se divisent spontanément en régions plus petites qu'on appelle « domaines de Weiss » pouvant mesurer jusqu'à 1mm . À l'intérieur de chaque domaine, les moments magnétiques sont maintenus parallèles par l'interaction d'échange, de telle sorte que chaque domaine se présente comme un petit volume saturé avec une orientation différente de celles de ces voisins telle que l'aimantation globale de l'échantillon peut forte et bien être nulle. Les interfaces entre les domaines sont appelées « parois de Bloch » à travers lesquelles l'orientation des moments magnétiques passe progressivement d'un domaine à l'autre. Lorsqu'un champ magnétique extérieur est appliqué, les domaines déjà orientés dans la direction du champ s'élargissent avec l'augmentation de l'intensité du champ appliqué, Si l'on supprime le champ magnétique extérieur le matériau reste aimanté dans la direction du champ précédemment appliqué [10,11].

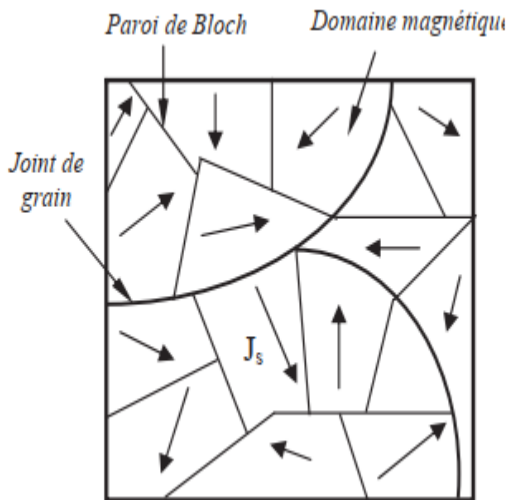


Figure I- 20 : Domaines de Weiss magnétique appliqué [12]

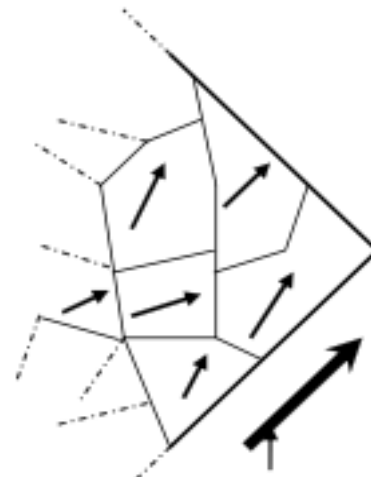


Figure I- 19 : direction du champ magnétique appliqué[12]

I.7.1 Mécanismes d'aimantation

Le mécanisme responsable de l'aimantation peut être expliqué par la théorie des domaines magnétiques, il comporte quatre principaux phénomènes qui se produisent successivement en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué.

Le premier mécanisme d'aimantation est le mouvement élastique des parois de domaines, qui se produit aux bas champs magnétiques et qui représente une aimantation spontanément réversible du matériau. Le mouvement des parois amène une augmentation de l'énergie totale du système mais ne permet pas de franchir la barrière de potentiel créée par le défaut où est ancrée la paroi, le système retourne donc naturellement à l'état initial si le champ appliqué est annulé.

Le deuxième mécanisme d'aimantation est le mouvement irréversible des parois de domaines, qui provoque le franchissement de certaines barrières de potentiel. Dans cette plage d'aimantation, l'effet magnétothermique, accompagnant le déplacement des parois du domaine, peut être observé tandis qu'une partie de l'énergie de magnétisation est dissipée sous forme de perte thermique [3,12].

Dans le troisième domaine, les déplacements des parois des domaines sont déjà terminés et l'aimantation se poursuit par une magnétisation par rotation des domaines. Cette plage est la section de l'aimantation par rotation.

Chapitre I : Introduction Au Magnétisme ET A l'hystérésis

La dernière plage l'aimantation de saturation à l'intérieur des domaines magnétique est atteinte. Si l'aimantation atteint la saturation, le champ magnétique appliqué n'augmentera pas davantage. Les vecteurs de champ magnétique et de l'aimantation sont presque parallèles [12].

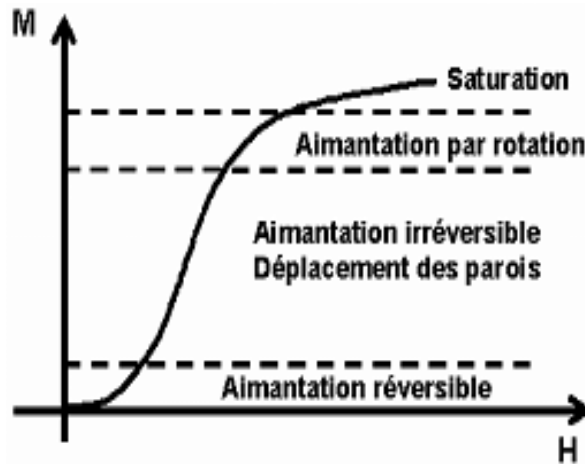


Figure I- 21 : Mécanisme d'aimantation

I.8 Les pertes dans les matériaux ferromagnétiques

I.8.1 Expressions des pertes

Lors d'un parcours complet du cycle d'hystérésis, l'énergie fournie pour H croissant est plus importante que l'énergie récupérée pour H décroissant, cette différence constitue les pertes par hystérésis. On montre que, sur un cycle complet, le travail fourni au milieu extérieur pour parcourir un cycle au sein du matériau, vaut par unité de volume [11].

$$w = \oint HdB \text{ [J/m}^3\text{]} \quad (I-10)$$

I.8.2 Perte par courant de Foucault

Le courant de Foucault est un courant électrique induit dans l'ensemble d'une substance conductrice plongée dans un champ magnétique extérieur variable ou lorsque cette masse se déplace dans ce champ magnétique. Au sein des masses métalliques, ces courants sont toujours accompagnés d'une dissipation de chaleur par effet joule connue sous le nom de << pertes par courants de Foucault >>. Ces pertes peuvent être calculées pour une induction de forme sinusoïdale par :

$$PCF = KCF \cdot f_2 \cdot B_2 \cdot e_2 \cdot V \quad (I-11)$$

Avec :

- $K_{CF} = \frac{\pi^2}{6} \cdot \rho$ ou ρ la résistivité du matériau utilisé.

- f : la fréquence en hertz (Hz).

- B : l'induction maximale en Tesla(T).

- V : le volume du matériau en (m^3).
- P_{CF} : les pertes par hystérésis exprimées en Watt (W).
- e : l'épaisseur de la tôle en mètre (m).

Afin de réduire ces pertes, on utilise généralement en pratique des circuits magnétiques Feuilletés. [5]

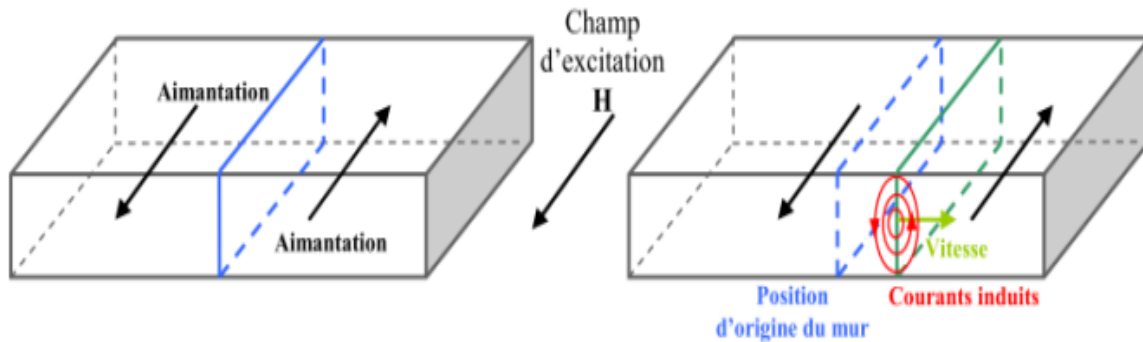


Figure I- 22 : Courants de Foucault microscopiques lors du déplacement d'une paroi à 180°[12]

I.8.3 Les pertes par hystérésis

Lors du processus d'aimantation et désaimantation du matériau magnétique sous l'influence du champ magnétique variable, l'énergie fournie par le dispositif au matériau pour passer par un cycle complet est convertie en chaleur. Elle représente les pertes volumiques par hystérésis dans le cas statique [12].

$$Ph = f\phi HdB \quad [W/m^3] \quad (I-12)$$

Chapitre II
Réalisation
expérimental de
l'hystérésis
ferromagnétique

II.1 Introduction

Le phénomène d'hystérésis magnétique est un phénomène souvent observé lors de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique provoqué par un champ magnétique externe lui est appliqué. Ce phénomène est de grande importance à la fois d'un point de vue théorique et pratique, il affecte le comportement dynamique des matériaux ferromagnétiques, et devrait donc être pris en compte dans les calculs techniques. Lors de la réalisation d'un modèle d'hystérésis, il faut prendre en compte la diversité des conditions de fonctionnement des systèmes telles que la variation de la fréquence du champ d'excitation[15]. De ce fait, Ce phénomène complexe fera l'objectif de ce chapitre; on présentera le banc d'essai expérimental réalisé au niveau du laboratoire de physique et d'électronique permettant le relevé et l'acquisition de données nécessaires pour la représentation des cycles d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques en forme torique.

II.2 Réalisation expérimentale de l'hystérésis a l'oscilloscope

Le banc d'essai a été conçu à travers plusieurs composants que nous disposons au niveau du laboratoire. Il comprend :

II.2.1 Un circuit magnétique fermé

Toute mesure des caractéristiques d'un matériau ferromagnétique nécessite impérativement l'utilisation d'un circuit magnétique fermé. Cependant, le matériau que nous avons étudié est un circuit de forme torique. Il s'agit également d'un circuit fermé pouvant être réalisé à partir d'un unique anneau massif ou d'un assemblage d'anneaux de tôles empilées. Le tore est généralement pourvu de deux enroulements régulièrement répartis sur sa circonférence formant ainsi un transformateur:

- Un bobinage d'excitation sur la section gauche du tore, supportant un bobinage primaire composé de N_1 spires.
- Un bobinage de mesure de flux d'induction, traversant une section droite du tore, est généralement situé au plus près du matériau. Il comporte N_2 spires et on l'appelle bobinage secondaire [3,4].

II.2.2 Un système d'alimentation

L'enroulement primaire est alimenté par un générateur de tension alternative (TBT) délivrant une fonction sinusoïdale.

II.2.3 Oscilloscope analogique

Permet la visualisation entre ses bornes du cycle d'hystérésis caractéristique du matériau formant le tore défini par la variation de l'induction B en fonction du champ magnétique externe H appliqué.

II.2.4 Une Rhéostat

Pour contrôler la valeur de tension de sortie (tension induite).

II.2.5 Un intégrateur (Résistance et capacité)

L'intégration de la tension U_s se fait par un circuit intégrateur RC Et un ampère mètre pour mesurer le courant généré par le générateur.

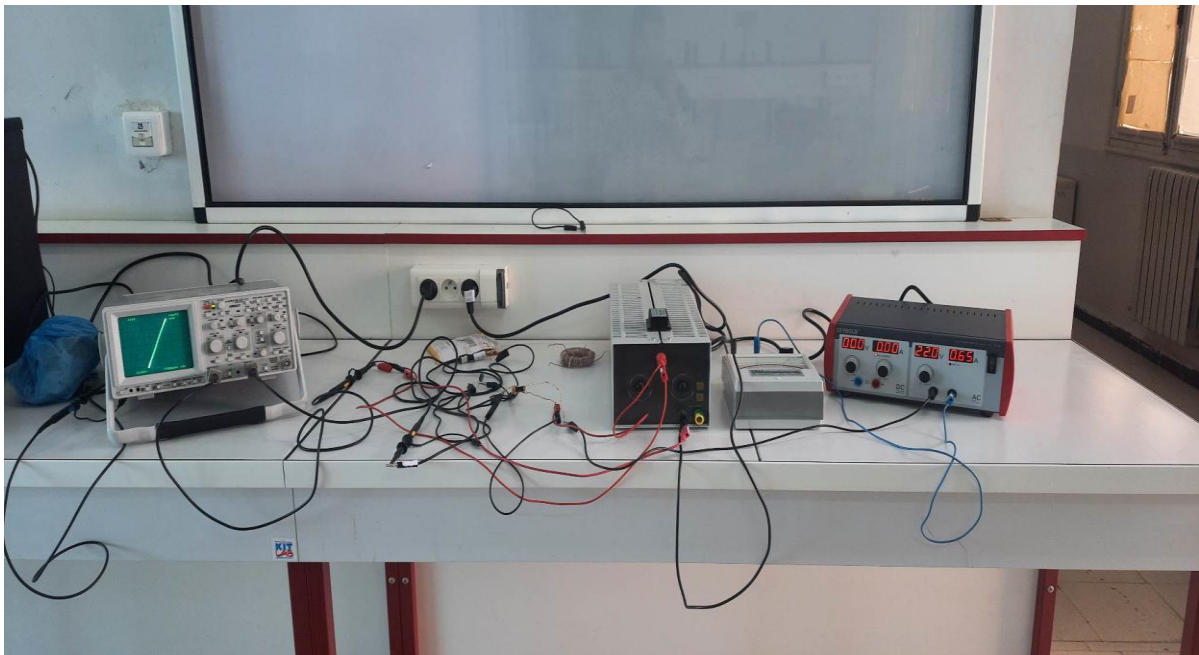


Figure II- 1 : Banc d'essai réalisé au laboratoire

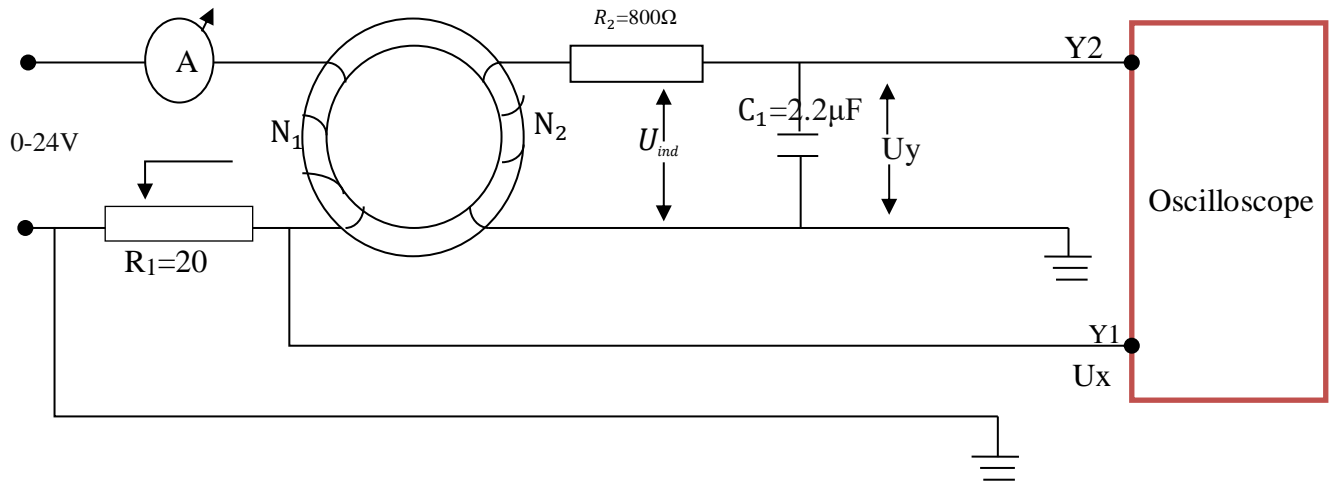


Figure II- 2 : Schéma représentatif montage expérimental

II.3 Echantillons toriques de dimensions variées

Nous avons mis en étude deux circuits toriques de dimensions différentes. Pour ce matériau en fer(Fe), les bobinages primaires et secondaires sont enroulés directement sur le tore magnétique en utilisant un fil de cuivre isolé fermés possèdent :

- Le circuit magnétique fermé (échantillon 1) est un inducteur à anneau magnétique que nous l'avons converti en transformateur torique, il possède un diamètre intérieur ($d_i = 3.5\text{mm}$) et extérieur ($d_e = 2\text{cm}$), un nombre de spires primaires $N_1 = 7$ spires et un nombre de spires secondaires $N_2 = 13$ spires, sa hauteur $h = 3\text{mm}$ et de section rectangulaire.
- Le deuxième circuit magnétique (échantillon2) possède un diamètre intérieur ($d_i = 4\text{mm}$) et extérieur ($d_e = 6\text{cm}$), un nombre de spires primaires $N_1 = 29$ spires et un nombre de spires secondaires $N_2 = 80$ spires, sa hauteur $h = 1\text{cm}$.

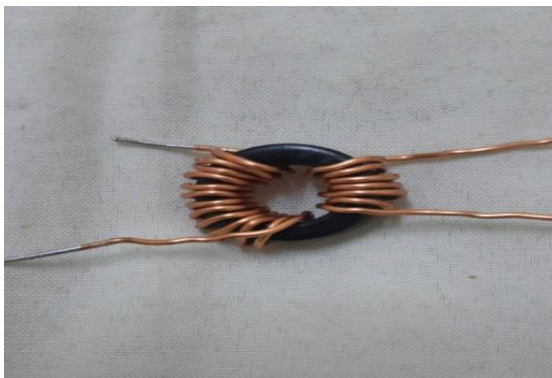


Figure II- 4 :Echantillon test (1)



Figure II- 3 : Echantillon test (2)

II.4 Principe et relations mathématiques nécessaire pour la détermination de \mathbf{B} et \mathbf{H}

L'étude suivante est effectuée sur un noyau torique magnétique fermé. Dans ce cas ; on fait passer un courant magnétisant I dans une rhéostat $\mathbf{R}_1 = 20\Omega$, une tension \mathbf{U}_x est obtenue aux bornes de celle-ci, elle est envoyée aux bornes de la chaîne \mathbf{Y}_1 de oscilloscope. Elle peut être calculée au moyen de la relation [16].

$$\mathbf{U}_x = \mathbf{R}_1 \cdot I \quad (\text{II-13})$$

Ce courant circule dans le circuit primaire de \mathbf{N}_1 spires et génère un champ magnétique \mathbf{H} donc le matériau ferromagnétique est alors soumis à un champ magnétisant.

On suppose que le module du champ magnétisant \mathbf{H} est uniforme dans le tore. Par raison de symétrie, ce champ magnétisant est constamment normal aux sections droites du tore, et on peut calculer la circulation sur le cercle que décrit le centre \mathbf{C} . D'après le théorème d'Ampère:

$$\mathbf{H}\pi \frac{(d_i+d_e)}{2} = \mathbf{N}_1 \cdot I \quad (\text{II-14})$$

En tenant en compte, les relations (II - 1) et (II - 2) :

Le champ magnétisant peut-être calculé à partir de la relation suivante :

$$\mathbf{H} = \frac{2\mathbf{N}_1}{(d_i+d_e)\pi R_p} \mathbf{U}_x \quad (\text{II-15})$$

Les variations du flux ainsi créée par les variations du courant magnétisant est recueillie par le circuit secondaire de \mathbf{N}_2 spires, induisent aux ses bornes une tension induite \mathbf{U}_{ind} , tel que :

$$\mathbf{U}_{ind}(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II-16})$$

le flux ϕ qui traverse les \mathbf{N}_2 spires de l'enroulement secondaire est :

$$\phi = -\int \mathbf{U}_{ind}(t) dt \quad (\text{II-17})$$

On considère que le circuit a une perméabilité relative grande, il concentre parfaitement toutes les lignes d'induction, il vient aisé d'exprimer l'induction \mathbf{B} en fonction du flux ϕ , soit :

$$\phi = \mathbf{N}_2 \mathbf{S} \mathbf{B} \quad (\text{II-18})$$

Où \mathbf{S} est la surface de la section du circuit magnétique donnée par :

$$\mathbf{S} = \frac{(d_e-d_i)}{2} \mathbf{h} \quad (\text{II-19})$$

On déduit \mathbf{B} :

$$B = -\frac{2}{N_2(d_e-d_i)h} \int U_{ind}(t) dt \quad (II-20)$$

L'intégrale par rapport au temps de la tension $U_{ind}(t)$ induit aux bornes du secondaire est bien proportionnelle à B . Pour réaliser l'intégration de la tension $U_{ind}(t)$ on peut utiliser un simple circuit de résistance et capacité en série. Soit le circuit intégrateur :

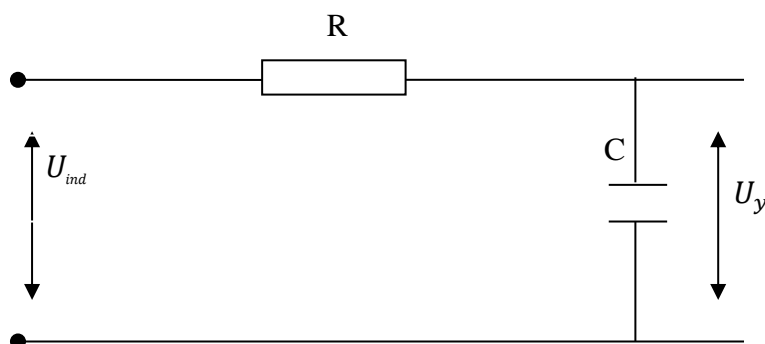


Figure II- 5 : Circuit intégrateur

Le courant qui circule dans le circuit intégrateur $i(t)$ s'exprime par :

$$i(t) = \frac{(U_{ind}-U_y)}{R_2} = C_2 \frac{dU_y}{dt} \quad (II-21)$$

On peut déduire la tension U_y

$$U_y = \frac{1}{R_2 C_2} \int U_{ind}(t) dt \quad (II-22)$$

A condition que la tension appliquée aux bornes de la chaîne Y_2 de l'oscilloscope notée U_y soit toujours négligeable par rapport à la tension induite U_{ind} . Il faut donc choisir des valeurs de résistance R_2 et de capacité C_2 très grande.

L'induction prise par le tore est proportionnelle à la tension $U_y(t)$

La tension $U_s(t)$ est alors appliquée à l'entrée Y_1 de l'oscilloscope la déviation verticale du spot est donc bien proportionnelle à l'induction B prise par le tore selon la relation:

$$B = \frac{2R_2 C}{N_2(d_e-d_i)h} U_y \quad (II-23)$$

En terme de perméabilité, l'induction magnétique se réécrit par :

$$B(t) = \mu_0 \mu_r H(t) = \mu_0 \mu_r \frac{2N.I(t)}{\pi(d_i+d_e)} \quad (II-24)$$

μ_0 est une constante magnétique, c'est la perméabilité du vide, elle vaut $4. \pi. 10^{-7} \text{ (H. m}^{-1}\text{)}$.

μ_r est la perméabilité relative du matériau, dans le vide elle est égale à 1.

II.5 Cycle d'hystérésis des échantillons toriques

La courbe ($B - H$) représentant le phénomène d'hystérésis ferromagnétiques, des deux noyaux toriques révèle des courbes de forme étroites, dont l'air du cycle hystérésis est faible et le champ coercitif également petit. Il peut être attribué à des matériaux ferromagnétiques doux. On a constaté que la forme du cycle dépend : de la géométrie de l'échantillon, de la fréquence et le flux.

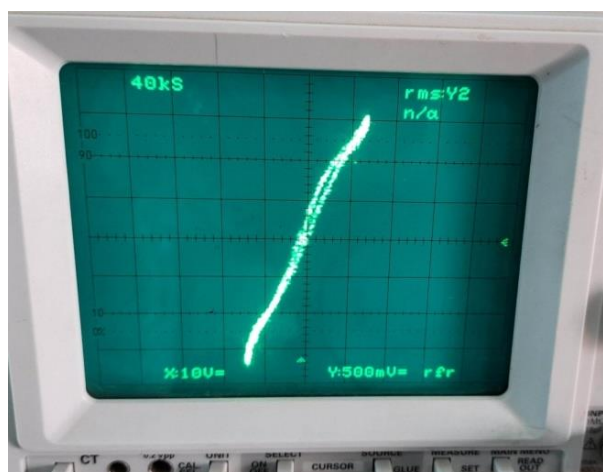


Figure II- 7 : Cycle d'hystérésis pour le premier échantillon

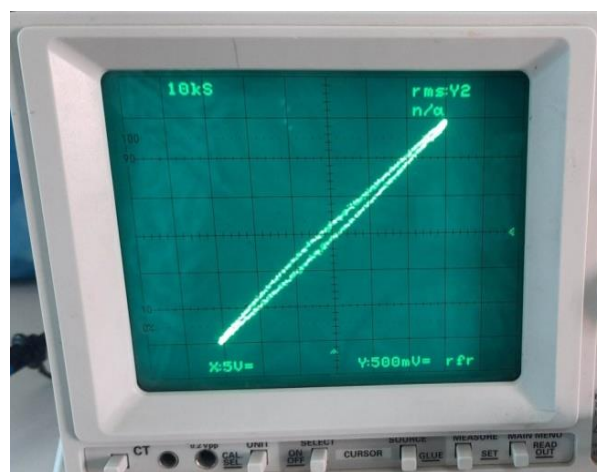


Figure II- 6 : Cycle d'hystérésis pour le deuxième échantillon

Les paramètres magnétiques relevés à partir des points caractéristiques sur le cycle $B = f(H)$ sont les suivantes :

l'échantillon	Le champ magnétique maximal $H_{max}(A/m)$	L'induction de rémanente $B_r(T)$	L'induction magnétique à saturation $B_s(T)$	Le champ coercitif $H_c(A/m)$
(1)	123.26	0.24	3.72	17.6
(2)	54.8	0.08	1.33	39.82

Tableau (II- 1) : Les paramètres magnétiques de cycle d'hystérésis

Chapitre II : Réalisation expérimental de l'hystérésis ferromagnétique

Les dispositifs que nous avons utilisés dans la réalisation de ce montage ont une grande marge d'erreur, cela nous ne nous permis pas de comparer les valeurs obtenues avec d'autres obtenus dans des études antérieures.

La forme de ce cycle d'hystérésis montre également que l'énergie dissipée sous forme de chaleur est faible.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, une recherche bibliographique a été assignée à des notions de base concernant, les matériaux magnétiques et le magnétisme. Dont nous avons présenté une étude plus ou moins détaillée du comportement de la matière à l'échelle microscopique, ce qui a permis de classer les matériaux magnétiques en divers catégories. Une description du phénomène de l'hystérésis magnétique, ses types et modèles ainsi que les pertes dans les matériaux ferromagnétiques a été aussi présentée.

À travers ce travail, nous avons tenté de mettre en œuvre un montage pratique permettant l'étude du phénomène d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques doux ; selon les moyens disponibles dans notre laboratoire. Une représentation de la variation de l'aimantation B en fonction du champ magnétique H de deux noyaux toriques fermé en fer de dimensions différentes a été obtenues. Par ailleurs, l'étude de cette courbe a permis de révéler les grandeurs magnétiques standards caractéristiques des matériaux ferromagnétiques tel que : champ coercitif, induction maximale, induction rémanente.

On conclue que la courbe $B - H$ peut varier d'un matériau à un autre. Etant donnée, pour un matériau précis la forme de la courbe dépend fortement des conditions de l'expérience tel que l'amplitude du champ magnétique, de la température, de la géométrie de l'échantillon, la fréquence du signal et la tension d'excitation. Or, la prise en compte de tous ces facteurs à la fois n'est pas évident, il faut alors étudier chacun de ces effets à part.

Lors de la réalisation pratique de ce montage, nous avons rencontrés des difficultés notamment la qualité des appareils et fils de connexion disponible au niveau des laboratoires. Ce qui empêche une comparaison des résultats obtenus. Les fils de bobinages et noyaux toriques sont difficilement à les trouver sur le marché et nécessite du temps.

Comme perspective, on suggère de mettre en étude d'autres noyaux toriques ferromagnétiques de nature différente en utilisant le même montage expérimental après l'avoir amélioré, en ajoutant d'autre composant également utiliser une alimentation permettant de tester des fréquences élevées et délivre une tension plus élevée pour que le matériau atteint sa saturation opposée augmenter le nombre de spire dans le transformateur. Cela nous permettre à effectuer une étude plus avancée.

RÉFÉRENCES

Conclusion Générale

- [1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/mesures-et-essais-en-electrotechnique-42247210/mesures-magnetiques-d1505/>.
- [2] M. TOUSIGNANT « Modélisation de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les circuits magnétiques par la méthode des éléments finis », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016, p 189.
- [3] A. MANSRI, « Processus d'aimantation dans les matériaux doux a base de fer-représentation des pertes en régime dynamique », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014, p 126.
- [4] M. TOTO JAMIL, « Caractérisation et investigation des effets de la température d'utilisation sur les propriétés électromagnétiques des aciers magnétiques doux- application à la roue polaire de la machine a griffes - », Thèse de doctorat, Université De Lille, 2021, p 200.
- [5] N. KISSA, « Modélisation de l'hystérésis magnétique en vue de son intégration dans un code de calcul de champ électromagnétique » Thèse de doctorat, Université De Batna, 2006, p 103.
- [6] M. MORDJAOUI, « Modélisation des effets électromagnétiques apport de la logique floue et neuro-floue », Thèse de doctorat, Université De Batna, 2008, p 217.
- [7] A. NOURDINE, «Modélisation de l'hystérésis dans les matériaux magnétiques et introduction de modèles dans le logiciel de simulation aux éléments finis flux3d», Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2002, p 205.
- [8] R. RAMAROTAFIKA, « Modélisation stochastique de la variabilité des propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques : application sur des stators de machines électriques ». Thèse de doctorat, Laboratoire D'électrotechnique Et D'électronique De Puissance De Lille, 2012, p 170.
- [9] N. NAHOULI, « Étude et réalisation d'un hystérésis-graphe d'un système de mesure du cycle d'hystérésis », Thèse de doctorat, Université Libanaise, 2014, p 96.
- [10] M. BUI ANH TUAN, « Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique », Thèse de doctorat, l'université Claude Bernard Lyon (1), 2011, p 126.
- [11] M. HAMIMID, « Modèles de l'hystérésis magnétique et leurs implémentations par la méthode des volumes finis dans les dispositifs électromagnétiques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2011, p 144.
- [12] I. BELGASMI, « Caractérisation et modélisation du comportement hystérétique des matériaux ferromagnétiques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2022, p 183.

Conclusion Générale

[13] F. MAZALEYRAT, « Matériaux magnétiques doux pour la conversion d'énergie », Culture Sciences De L'ingénieur, <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay> Édité le 05/01/2021, p 20.

[14] S. HAMADA, « Modélisation dynamique des matériaux magnétiques soumis à des champs moyenne fréquence étude du chauffage par induction tenant compte de l'impact de la variation de la courbe b(h) en fonction de la fréquence », Thèse de doctorat, Université Chahid Mustapha Ben Boulaid Batna (2), 2017, p 203.

[15] B. KOPRIVICA, « Mathematical modeling of frequency-dependent hysteresis and energy loss of FeBSic amorphous alloy », Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, 422(37–42), 2017.

[16] M. JANNIN et al, Cycle d'hystérésis magnétique, 651, Bulletin de l'union des physiciens.

[17] <https://couleur-science.eu/?d=262e6c--ferromagnétisme-diamagnétisme-paramagnétisme>.

[18] B. DELABRE « Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique », Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016, p 153.

ملخص البحث

تعد المواد المغناطيسية حاليًا في صميم التطور العلمي والتكنولوجي. امتد استخدامها إلى مجالات التطبيق الأكثر ابتكارًا. قمنا بإنجاز تركيب عملي على مستوى مخبر الفيزياء، يسمح بدراسة سلوك المواد المغناطيسية الحديدية تحت تأثير حقل مغناطيسي، عن طريق قياس دورة التباطؤ الخاصة بهم والوصول إلى الوسائط المميزة للمادة المعنية.

كلمات مفتاحية

المواد المغناطيسية, التباطؤ المغناطيسي.

Résumé

Les matériaux magnétiques sont actuellement au cœur du développement scientifique et technologique. Leur utilisation s'est étendue aux domaines d'application les plus innovateurs. Une réalisation pratique a été effectuée au niveau de notre laboratoire permettant l'étude du comportement des matériaux ferromagnétiques soumis à un champ magnétique, par mesure de leur cycle d'hystérésis et y accéder aux grandeurs caractéristiques au matériau en question.

Les mots clés

Matériaux magnétique, l'hystérésis ferromagnétique.

Abstract

Magnetic materials are currently at the heart of scientific and technological development. Their use has extended to the most innovative fields of application. A practical realization has been carried out at the level of our laboratory allowing the study of the behavior of ferromagnetic materials subjected to a magnetic field, by measuring their hysteresis cycle and accessing the characteristic quantities of the material in question.

Key words

Magnetic materials, ferromagnetic hysteresis