

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière :Electrotechnique

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

*Présenté par*  
**Souad KOROGHLI**  
**Mohamed DAID**

Mémoire dirigé par **Azzouz MIOUAT**

Thème

# Etude Des Techniques et Dispositifs de Mesures des Caractéristique Magnétiques des Tôles Ferromagnétiques

*Mémoire soutenu publiquement le 26 septembre 2018 devant le jury composé de :*

**M Youcef BOUTORA**  
MCA, UMMTO, Président

**M Azzouz MIOUAT**  
MAA, UMMTO, Encadreur

**M Rabah KHALDI**  
MAA, MAA, Examineur

**M Abdelghani KIMOUCHE**  
MAA, UMMTO, Examineur

# Remerciements

*AU TERME DE CE MODESTE TRAVAIL, NOUS REMERCIONS DIEU LE TOUT  
PUISSANT DE NOUS ACCORDÉ LA FORCE; LA VOLONTÉ ET LA PATIENCE D'AVOIR  
ACCOMPLI CE TRAVAIL QUI PRÉSENTE LE FRUIT DE PLUSIEURS ANNÉES DE  
SACRIFICE.*

*NOUS TENONS À TÉMOIGNER NOTRE PROFONDE GRATITUDE ET NOS  
REMERCIEMENTS LES PLUS SINCÈRES À NOTRE PROMOTEUR MR MIOUAT DE NOUS  
AVOIR ENCADRÉE, SUIVIE ET SOUTENUE TOUT AU LONG DE CE TRAVAIL.*

*NOS VIFS REMERCIEMENTS À NOS FAMILLES POUR LES SACRIFICES QU'ELLES ONT  
FAITS POUR QUE NOUS TERMINIONS NOS ÉTUDES.*

*IL NOUS EST AGRÉABLE DE POUVOIR EXPRIMER NOS SENTIMENTS DE  
RECONNAISSANCE  
AUX ENSEIGNANTS ET PERSONNEL DE LA BIBLIOTHÈQUE DU DÉPARTEMENT DE  
GÉNIE ÉLECTRIQUE, AINSI QU'À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE  
LOIN À L'ÉLABORATION DE CE MODESTE TRAVAIL.*

*NOS CHALEUREUX REMERCIEMENTS À TOUS NOS AMIS POUR LEUR AIDE, LEUR  
PATIENCE, LEUR COMPRÉHENSION ET LEUR ENCOURAGEMENT.*

*ENFIN NOS SINCÈRES REMERCIEMENTS ET NOTRE PROFONDE GRATITUDE  
S'ADRESSENT  
ÉGALEMENT AUX MEMBRES DU JURY QUI NOUS FERONT L'HONNEUR DE JUGER  
NOTRE PROJET.*

**MERCI À TOUS.**

# DEDICACE

*Arrivé au terme de mes études par la grâce d'ALLAH c'est avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie mon travail à :*

- *Mes très chers parents, que Dieu les protèges de tout mal*
- *Mes frères, Saïd et Nacer*
- *L'âme de mon petit frère Hakím, que dieu l'accueille dans son vaste paradis*
- *Mes sœurs et leurs petites familles*
- *Mon neveu Walid*
- *Ma belle sœur*
- *Mes tentes, mes oncles et mes cousins (es)*
- *Mes chers amis (es), Lynda, Daby, Mustapha, Aghilas, Amine, Slimane*
- *Mon binôme Mohamed*
- *Tous les étudiants de ma promotion*

**Souad**

*Mes très chers parents, que Dieu les protèges de tout mal*

- *Mes frères et sœurs*
- *Mes tentes, mes oncles et mes cousins (es)*
- *Mes chers amis*
- *Mon binôme SOUAD*
- *Tous les étudiants de ma promotion*

**MOHAMED**

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Magnétisme et matériaux magnétique à base de fer</b> .....	03
I-1 Origine du magnétisme .....	03
I-1-1 Magnétisme a l'échelle atomique .....	03
I-1-1-1 Classe des matériaux magnétiques.....	05
I-1-2 Magnétisme a l'échelle microscopique .....	09
I-1-3 Magnétisme a l'échelle macroscopique .....	13
I-1-3-1 Courbe de première aimantation.....	13
I-1-3-2 Phénomène d'hystérésis .....	14
I-1-4 Classification des matériaux ferromagnétique .....	15
I-1-4-1 Matériaux magnétique doux.....	15
I-1-4-2 Matériaux magnétique durs .....	17
I-2 Les alliages à base de fer.....	20
I-2-1 Les alliages fer-silicium .....	21
I-3 Calcul des pertes .....	22
<b>Chapitre II : Mesure des caractéristiques magnétiques en 1D et 2D</b>	
II-1 Méthode et dispositifs utilisé pour mesurer les caractéristiques magnétiques en 1D et 2D .....	24
II-1-1 Principe de caractérisation .....	24
II-1-2 Présentation du circuit magnétique .....	26
II-1-2-1 Le tore .....	26
II-1-2-2 Le cadre d'Epstein .....	28
II-1-2-3 Cadre a bande unique .....	29

II-1-2-4 Cadre RSST300.....	30
II-1-3 Contrôle de forme d'onde B(t) et H(t).....	31
II-1-3-1 Technique simple d'excitation d'un circuit en régime sinusoïdal.....	32
II-1-3-2 Utilisation d'une alimentation électronique asservis .....	32
II-1-4 Choix des paramètres du circuit .....	33
II-1-5 Choix du matériau .....	34
II-2 Description de l'appareillage .....	34
 <b>Chapitre III : étude expérimentale et calcul théorique</b>	
Introduction.....	36
III-1 Méthode des deux bobines.....	36
III-1-1 Présentation de l'échantillon étudié .....	36
III-1-2 Caractéristique des deux bobines .....	36
III-1-3 Montage expérimentale .....	36
III-1-4 Relevé du cycle d'hystérésis.....	37
III-1-5 Mode opératoire .....	38
III-1-6 Résultats expérimentaux .....	38
III-2 le tore .....	47
III-2-1 Présentation de l'échantillon étudié .....	47
III-2-2 Montage expérimentale .....	48
III-2-3 Relevé du cycle d'hystérésis .....	48
III-2-4 Mode opératoire .....	49
III-2-5 Résultats expérimentaux .....	50
III-3 Cadre d'Epstein .....	57
III-3-1 Présentation de l'échantillon étudié .....	57

III-3-2 Montage expérimentale .....	57
III-3-3 Relevé du cycle d'hystérésis .....	58
III-3-4 Mode opératoire .....	58
III-3-5 Résultats expérimentaux .....	59
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>72</b>

## **Bibliographie**



# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## Introduction générale

La connaissance des performances des matériaux magnétiques constitue l'une des préoccupations majeures en Électrotechnique. Une conception rigoureuse des machines électriques impose une prise en compte du comportement réel des grandeurs magnétiques  $B$  et  $H$ . Les phénomènes magnétiques présentent des complexités et une interdépendance qui rend leur modélisation difficile. Ceci est d'autant plus vrai que dans la réalité on rencontre des conditions plus difficiles à reproduire sur les dispositifs d'instrumentation comme par exemple des situations où l'induction n'est plus unidirectionnelle suivant l'axe de laminage ou transverse mais tournante. Cela est vérifié dans le cas d'un transformateur

La caractérisation des matériaux magnétiques a deux objectifs majeurs dans la conception des machines électriques

- La détermination des grandeurs magnétique qui nous permet le calcul et la quantification des pertes dans le matériau
- L'identification du modèle de comportement (modèle d'hystérésis) de ces matériaux qui peuvent être introduit dans les logiciels de conception des machines

Ces deux objectifs passent obligatoirement par une caractérisation expérimentale du matériau en utilisant différents dispositifs de caractérisation

L'objectif de notre travail est la caractérisation des matériaux magnétiques à travers la réalisation et l'utilisation de différents dispositifs de caractérisation en utilisant les moyens disponibles dans notre laboratoire pour le relevé d'hystérésis magnétique des échantillons des matériaux

Dans ce but nous, avons structuré notre mémoire comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques généralités sur le domaine magnétique. L'interprétation du magnétisme à différentes échelles, à savoir l'échelle microscopique, mésoscopique et macroscopique, on terminera le chapitre par le calcul des pertes magnétique.
- Le second chapitre est consacré à l'étude des méthodes et dispositifs utilisés pour mesurer les caractéristiques magnétiques.
- Le dernier chapitre est consacré à la réalisation d'un banc de mesure du cycle d'hystérésis. Ce chapitre est décomposé en deux parties, la première la présente le banc d'essai expérimental réalisé au sein du laboratoire électrotechnique, pour la

caractérisation des tôles et le relevé de leurs caractéristiques magnétiques, et la deuxième partie présente les interprétations des résultats obtenus.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale, mettant en relief l'importance et l'intérêt de l'identification des paramètres pour la reconstitution du cycle d'hystérésis et pour caractériser les matériaux magnétiques. Nous y donnerons également les différentes perspectives ouvertes par notre travail.

A decorative border resembling a scroll, with a grey shaded area on the left side and a grey shaded area on the top right corner.

# CHAPITRE I :

MAGNÉTISME ET

MATERIAUX

MAGNETIQUES A BASE

DE FER

## Introduction

Les matériaux magnétiques sont essentiels à la production d'électricité, ils sont au cœur de la propulsion électrique et ils forment la base du stockage de l'information. Si ces trois domaines dominent le marché, il y a tout de même une liste interminable de mise en application de matériaux interagissant avec des champs magnétiques.

Dans le présent chapitre, on va étudier l'origine du magnétisme à différentes échelles, ainsi la classification des matériaux ferromagnétiques, et en fin le calcul des pertes.

### I-1. Origine du magnétisme :

#### I.1.1. magnétisme à l'échelle atomique

Le magnétisme d'un matériau est la conséquence des mouvements des électrons gravitant autour du noyau des atomes de ce matériau. [1]

Les électrons par leur déplacement sur leur orbite présentent un petit moment magnétique orbital perpendiculaire à leur orbite

Un électron tournant sur un orbital est une charge électrique en mouvement qui engendre un champ magnétique

Un électron tourne également sur lui-même et présente un autre petit moment magnétique dit « spin »

La rotation du spin engendrera aussi un champ magnétique

Le mouvement orbital et le spin génère donc des dipôles magnétiques qui seront influencés par l'application d'un champ magnétique extérieur (voir figure I.1)

Le moment magnétique orbital :

$$M_0 = m \cdot \mu_B \quad (\text{I.1})$$

$m$  : Nombre quantique magnétique associé à l'électron

$\mu_B$  : Magnéton de Bohr

Ou :

$$\mu_B = \frac{e.\hbar}{2m.e} \quad (\text{I.2})$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ (Constante de Planck)}$$

$$=(6,63.10^{-34}js)/2\pi$$

D'où :

$$\mu_B = \frac{e.h}{4\pi.m.e} \quad (\text{I.3})$$

$e$ : charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}c$ )

$m$ : masse de l'électron ( $9,11.10^{-31}kg$ )

L'influence des nucléons sur le moment magnétique peut être négligé a cause de la masse des nucléons comparativement a la masse de l'électron (le rapport entre les masse des nucléons et l'électron est de  $\frac{1}{1836,5}$  ).

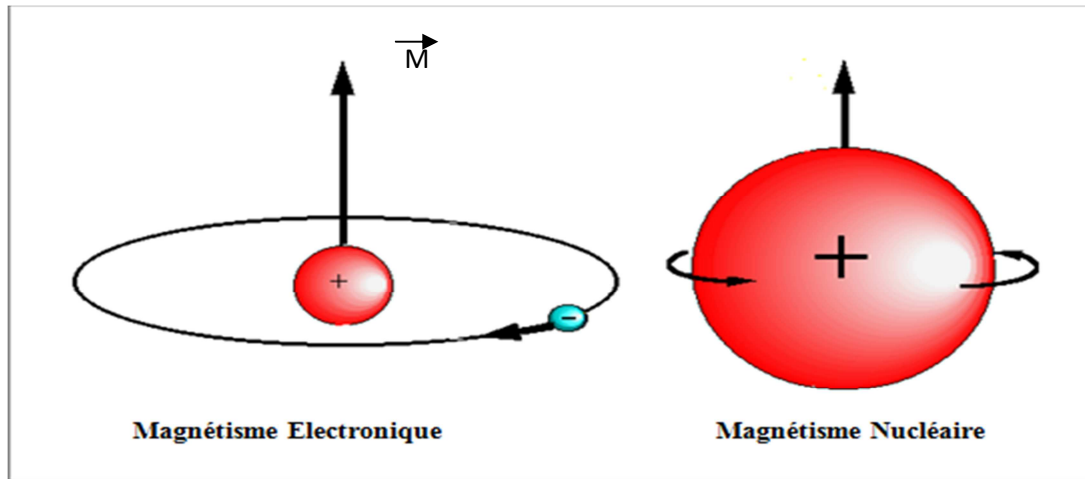
Le moment magnétique du spin est :

$$M_s = \pm\mu_b \left(\pm\frac{1}{2}\right) \quad (\text{I.4})$$

Le moment magnétique net de l'atome sera égal à la somme vectorielle des moments magnétiques orbitaux et de spin de tous les électrons gravitant autour du noyau de cet atome.

Si deux électrons sont appariés (c'est-à-dire ont de spin opposés), leur moment magnétique de spins sont des signes opposés et s'annulent, ces deux électrons ne contribuent pas au moment magnétique globale de l'atome.

De plus le moment magnétique résultant des électrons de toutes couche ou sous-couche électrique est nulle, le moment magnétique nette de l'atome dépendra donc seulement des électrons appartenant aux couche électroniques extérieur pour lesquelles la somme des nombres quantiques  $m$  n'est pas nulles [4]



**Figure I.1 : Origine du magnétisme dans la matière [1]**

### **I-1.1.1. Classe des matériaux magnétiques**

Dans certains cas, l'aimantation d'un matériau s'explique par la présence, au niveau atomique, du moment magnétique permanent. L'orientation de ces moments par rapport à un champ inducteur caractérise la réponse magnétique de ces matériaux à un champ extérieur. En terme magnétique, ils peuvent donc être classés en fonction de cette réponse.

Cette orientation peut être facile (le matériau est alors dit ferromagnétique) ou bien difficile (le matériau est alors dit paramagnétique). Dans l'autre cas, ces moments apparaissent qu'en présence d'un champ (ils sont alors dit induits). Il en est ainsi pour les matériaux diamagnétiques [8].

#### **I.1.1.1.1 Diamagnétisme**

Dans la théorie classique, le mouvement d'un électron autour d'un atome est modélisé par une spire supraconductrice, c'est-à-dire sans résistance. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, ce modèle permet de comprendre la modification du courant dans la spire par application de la loi de Lenz. Cette modification est telle qu'il en résulte un flux s'opposant au champ inducteur. [2]

Il apparaît donc un moment magnétique atomique. La somme de tout les moments induits se traduit par une aimantation globale du corps dite diamagnétisme et qui en opposition au champ inducteur (voir figure I.2).

Le magnétisme est une réponse de l'ensemble des atomes de la matière à une excitation magnétique. Toutefois, lorsque le matériau est exposé à un champ, une aimantation induite

s'oppose a la direction du champ magnétique et donc la susceptibilité est négative, et varie entre  $10^{-6}$  et  $10^{-4}$ , selon le matériau (voir tableau I.1) [8]

**Tab I.1 : Susceptibilité  $\chi_r$  de certains matériaux diamagnétiques ( $\mu_r < 1 \Rightarrow \chi_r < 0$ )**

Matière	$\chi_r$	Matière	$\chi_r$
Si	$-1,2 \cdot 10^{-6}$	Se	$-4,0 \cdot 10^{-6}$
Cu	$-1,08 \cdot 10^{-6}$	Ag	$-2,4 \cdot 10^{-6}$
Zn	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	Pb	$-1,4 \cdot 10^{-6}$
Ge	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$-3,5 \cdot 10^{-6}$



a) Aucun moment magnétique b) M et H de signe contraire

**Figure I.2 : Comportement des matériaux diamagnétiques**

### I.1.1.1.2 Paramagnétisme :

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité  $\chi_r$  positive variant en fonction inverse de la température T (suivant la loi de Curie)

$$\chi_r = C/T \quad (I.5)$$

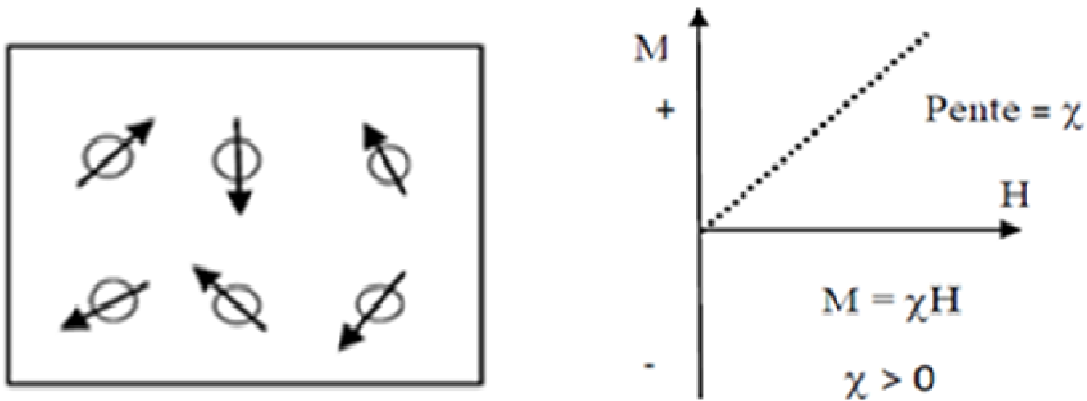
C : constante de Curie

Sa valeur est comprise entre  $10^{-6}$  et  $10^{-3}$  (Tab I.2). Il se rencontre dans les substances dont les atomes possèdent un moment magnétique résultant permanent (lorsque ces moments ne sont pas coulés les uns aux autres). Sous l'action d'un champ magnétique, ces moments tendent à

s'aligner. La polarisation résultante demeure faible car l'effet de l'agitation thermique qui oriente aléatoirement les moments magnétiques restent prépondérant. La plupart des gaz sont paramagnétiques (air, oxygène ...), certains métaux (métaux alcalins), quelques sels, les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques lorsqu'ils sont chauffés au dessus de leur températures de Curie (voir figure I.3) [8]

**Tab I.2 : Susceptibilité  $\chi_r$  de certains matériaux paramagnétiques [8]**

Matière	$\chi_r$	Matière	$\chi_r$
Na	$8,6.10^{-6}$	Pt	$1,2.10^{-5}$
Al	$7,7.10^{-6}$	U	$3,3.10^{-5}$
Mn	$1,2.10^{-6}$	CoO	$0,75.10^{-3}$
Ta	$1,1.10^{-6}$	Fe	$3,7.10^{-5}$
W	$3,5.10^{-6}$	C ( $\theta = 1000^\circ\text{C}$ )	$3,7.10^{-5}$



a) Orientation aléatoire du moment magnétique

b) M et H de même signe

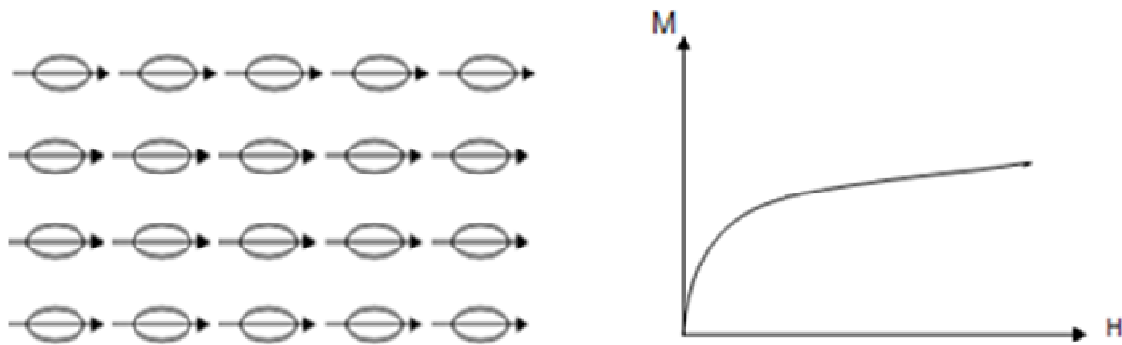
**Figure I.3 : comportement des matériaux paramagnétiques**

### I.1.1.1.3 Ferromagnétisme :

Les atomes des matériaux ferromagnétiques possèdent des moments permanents. Du fait des fortes interactions entre moments proches, l'orientation d'un moment est liée à celle de ses voisins et par suite, elle est négligeable ment influencée Par l'agitation thermique. En l'absence de champ, ces moments s'orientent de sorte à minimiser l'énergie magnétostatique globale, c'est à dire que le matériau présente une

aimantation globale quasi-nulle. Par contre, en présence d'un champ excitateur, chaque moment tend à s'aligner facilement dans la direction du champ et y est maintenu par ses voisins.

Les matériaux ferromagnétiques sont donc faciles à aimanter, même en présence d'un champ faible. En conséquence, leur susceptibilité est importante, de 100 à 10<sup>6</sup>. Lorsque tous les moments sont alignés, un niveau de saturation est atteint. La susceptibilité est alors proche de 0 [2]



a) Moment magnétique permanents paralleles

b) M et H de meme signe

**Figure I.4 : Comportement des matériaux ferromagnétiques [8]**

#### 1.2.3.4 Antiferromagnétiques

Pour les substances antiferromagnétiques, les moments magnétiques des ions du réseau cristallin sont orientés deux à deux en sens contraire ; l'aimantation de l'ensemble est alors nulle (figure (1.5)). Dans un champ magnétique, il se produit une légère aimantation comme celle des paramagnétiques. On trouve parmi les corps antiferromagnétiques le Chrome, l'Oxyde de Fer « FeO », le Fluorure de Manganèse 'MnF<sub>2</sub>' et le Sulfure de Manganèse 'MnS', [12]

#### 1.2.3.5 Ferrimagnétiques

Pour les substances ferrimagnétiques, les moments magnétiques des ions du réseau cristallin sont opposés et parallèles, mais ils sont inégaux donc le moment magnétiques de l'ensemble es t non nul, comme illustré dans la figure (1.6), c'est le cas des composés de ferrites qui sont très intéressants en électrotechnique, parce qui' ils sont pratiquement isolants. Lorsqu'ils sont placés dans un champ, ils sont aimantés à saturation et d'une manière

spontanée. L'aimantation à saturation est plus faible que dans les substances ferromagnétiques.

La forme générale de ces corps  $X.Fe_3.O_4$  où X représente un ou plusieurs métaux bivalents (Cuivre, Zinc, Nickel, Manganèse, ....)[12]

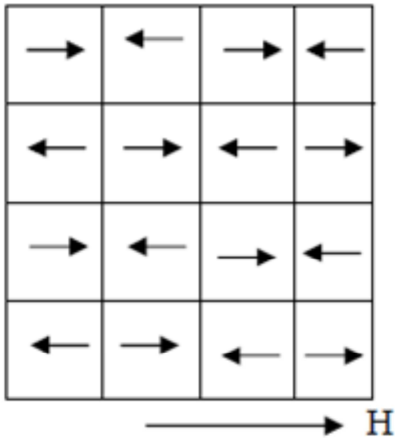


Figure I-5 Antiferromagnétisme

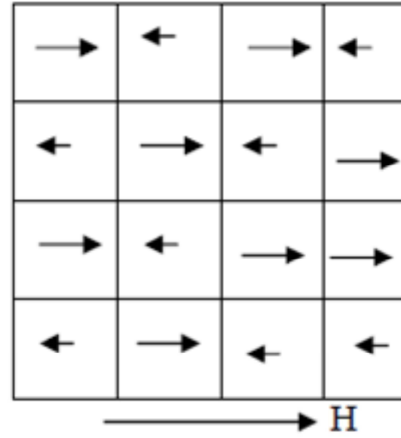


Figure -6 Ferrimagnétisme

### I.1.2 Magnétisme a l'échelle microscopique

Comment expliquons-nous la nécessité d'un champ extérieur pour aimanter un ferromagnétique si ce dernier possède sa propre aimantation ? La réponse a été formulée par **Pierre Weiss** en 1907. En effet, les moments magnétiques de chaque matériau se regroupent dans des volumes qui s'appellent "domaines", selon leurs différentes orientations. Les domaines possédant une orientation aléatoire annulent le champ macroscopique.

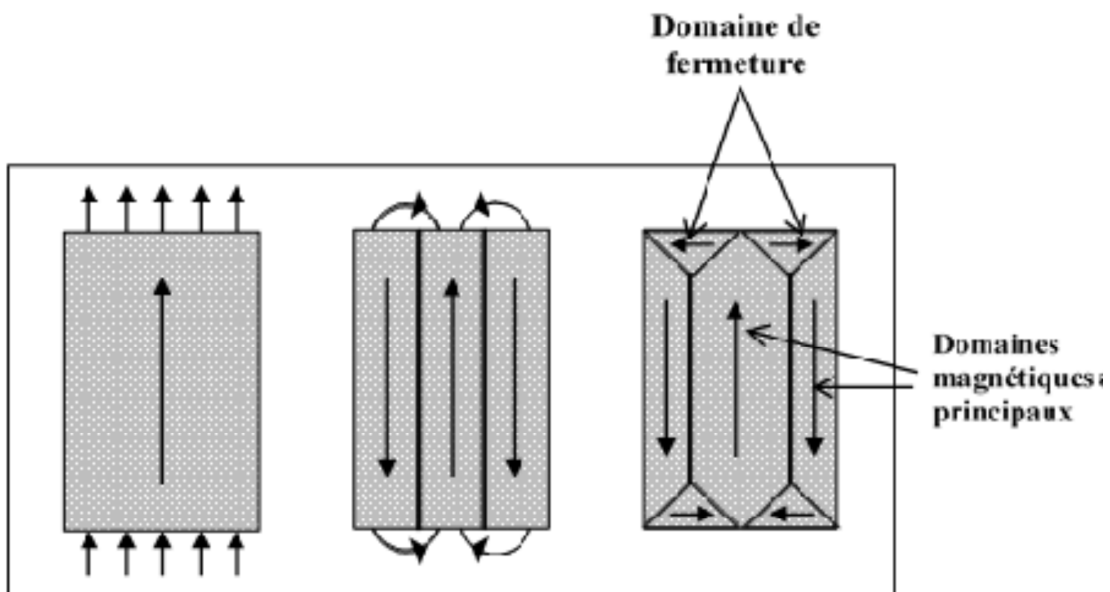
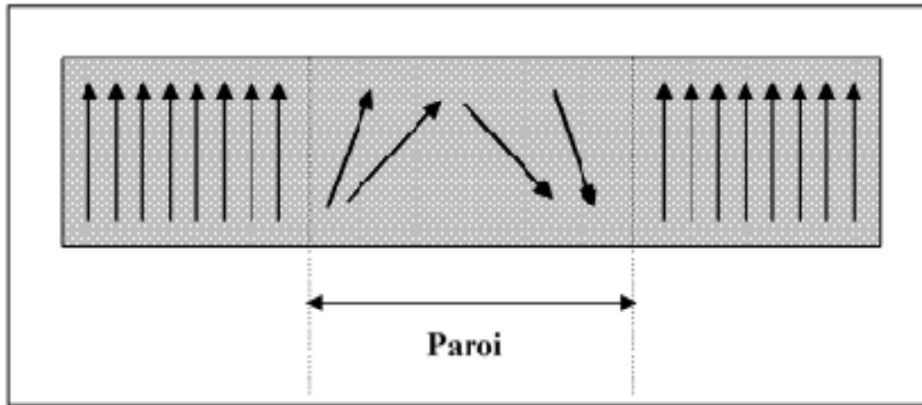


Figure I.7 : Configuration en domaines dans le matériau ferromagnétique

Les domaines de **Weiss** sont séparés entre eux par des parois. On peut donc imaginer une subdivision de ces domaines et l'apparition de parois (figure-I.7). Cela fait appel à une énergie compensant celle qui devrait être à l'extérieur si tous les moments étaient alignés



**Figure I.8: La paroi de Bloch**

Les parois ont une épaisseur de l'ordre de quelques centaines d'Angström. A l'intérieur de la paroi, le changement d'orientation de l'aimantation se fait quasi continûment. Les moments des différents domaines étant dirigés dans toutes les directions, l'aimantation macroscopique globale est alors nulle, ceci malgré l'aimantation spontanée à saturation de chaque domaine pris séparément. Pour obtenir une aimantation macroscopique, un champ appliqué est alors indispensable. [10]

En effet, sous un champ magnétique, tous les domaines dont l'orientation est proche de celle du champ se trouvent favorisés énergiquement : leurs parois se déplacent, les domaines orientés dans le sens du champ croissent au détriment des autres. En outre, les moments des autres domaines tentent de s'orienter dans la même direction que le champ appliqué

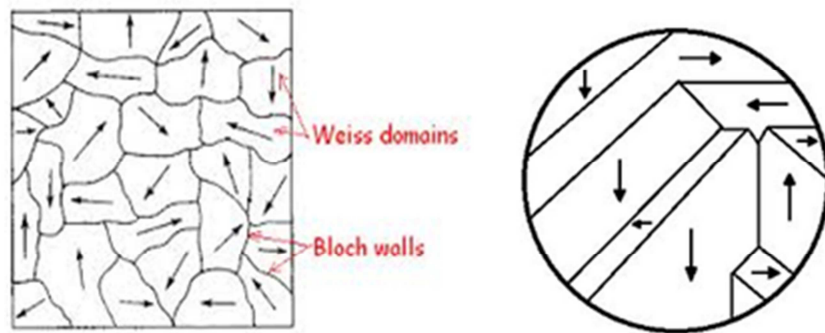
Ces phénomènes contribuent à l'aimantation macroscopique du matériau, ceci dans le même sens que le champ excitant. Si on augmente davantage ce dernier, la substance tend alors vers un domaine unique, et l'aimantation tend à la saturation.

### **I.1.2.1 Domaines magnétiques**

Des techniques d'observations appropriées permettent la mise en évidence de la répartition de la polarisation magnétique dans la matière. Elles révèlent qu'un échantillon de taille macroscopique est généralement subdivisé en nombreuses régions polarisées.

L'orientation de la polarisation change d'une région à une autre et la polarisation globale de l'échantillon peut être nulle. On appelle domaine magnétique ou de Weiss toute région dans laquelle tous les domaines magnétiques atomiques sont alignés parallèlement les uns aux autres. La valeur du module de polarisation spontanée, est la même dans tous les domaines magnétiques d'un matériau homogène sous température uniforme.

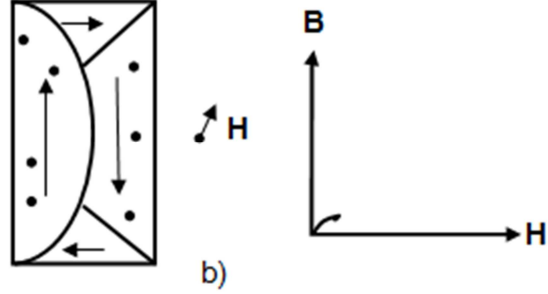
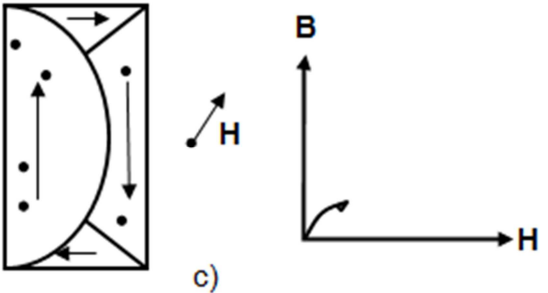
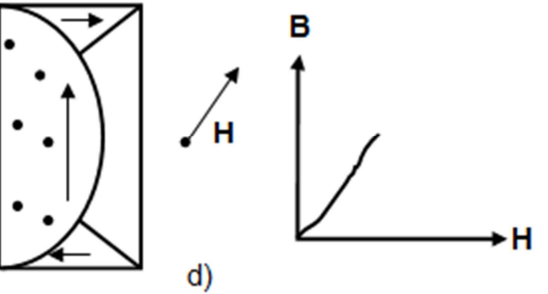
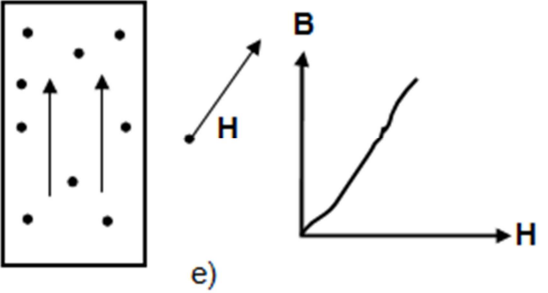
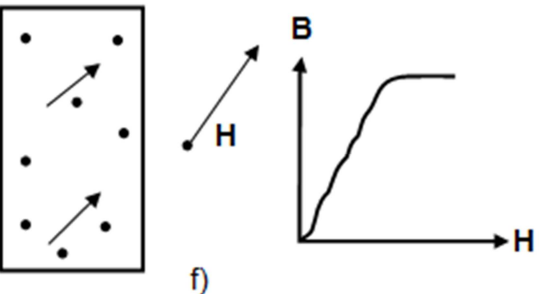
Chaque domaine est séparé d'un voisin par une zone de transition dans laquelle l'orientation des moments magnétique passe progressivement de la direction de polarisation dans l'un des domaines, à celle régnant dans l'autre domaine (Figure I.9)



**Figure I.9: Domaines magnétiques**

Cette zone de transition, sorte d'enveloppe délimitant les domaines magnétiques porte le nom de paroi de Bloch. Toutes les propriétés magnétiques des matériaux (perméabilité, hystérésis,...) dépendent de la structure des domaines magnétique et surtout de la variabilité plus ou moins grande de cette structure sous l'effet d'un champ extérieur.

<p>a)</p>	<p>Sur cette structure en domaines typiques, les parois de Bloch, épinglées par les défauts, apparaissent rectilignes.</p>
-----------	--

 <p>b)</p>	<p>Un champ faible provoque une déformation réversible des parois qui se comportent comme des membranes élastiques. Les points d'épinglage ne changent pas</p>
 <p>c)</p>	<p>A champs moyen la pression sur les parois fais céder les points d'épinglage. Les parois se déplacent par une série de sauts mis en évidence par l'expérience de Barkhausie. Ces mouvements de parois sont irréversibles.</p>
 <p>d)</p>	<p>La pente de <math>B=f(H)</math> est maximum.</p>
 <p>e)</p>	<p>La polarisation est maintenue parallèle à la direction d'aimantation facile la plus proche de H. l'augmentation de la polarisation par déplacements irréversibles des parois est terminée.</p>
 <p>f)</p>	<p>H augmentant encore, la polarisation s'écarte de la direction d'aimantation facile pour s'aligner sur H. ce phénomène est à nouveau réversible.</p>

Tab. I.3 : Effet des défauts sur le déplacement des parois de Bloch [8]

### I.1.3 Magnétisme a l'échelle macroscopique

#### I.1.3.1 Courbe de première aimantation

La fonction  $B(H)$  observée à champ magnétique  $H$  croissant sur un échantillon n'ayant jamais été polarisé porte le nom de courbe de première aimantation (Figure I.10).

Seule une élévation de la température de l'échantillon au-dessus du point de curie permet de décrire une nouvelle fois la courbe de la première aimantation. La matière garde en quelque sorte la mémoire des polarisations subies.

A champ décroissant, la fonction  $B(H)$  s'écarte de la courbe de première aimantation, en raison du caractère irréversible. En régime périodique, elle prend la forme d'un cycle d'hystérésis principal celui observé lors d'une variation sinusoïdale de  $H$ , d'amplitude suffisante pour conduire à la saturation.

Schématiquement, le diagramme  $B-H$  est subdivisé en trois zones :

- La zone des champs faibles (TAB. b) caractérisé par un comportement quasi linéaire de la matière ainsi que des perméabilités modérées
- La zone des champs moyens (TAB. c, d, e) dans laquelle les effets non linéaires s'accroissent fortement, tandis que la perméabilité passe par sa valeur maximale [8]
- La zone des champs forts (TAB. f) ou zone de saturation où la perméabilité décroît et tend vers la perméabilité du vide.

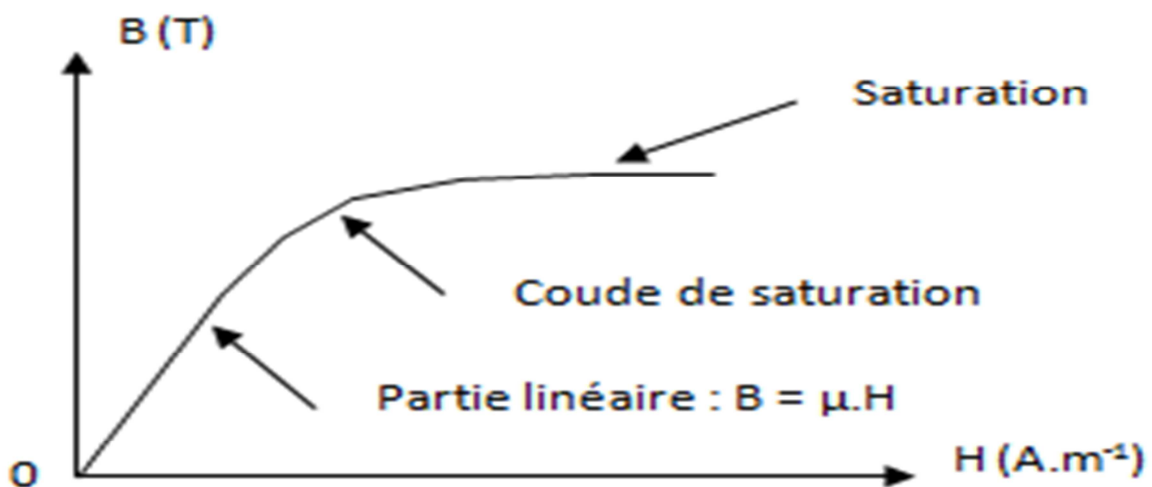


Figure I.10 : Courbe de première aimantation

**Remarque**

On remarque dans la (Fig.10) que le corps n’était initialement pas aimanté ( $B = 0$  lorsque  $H = 0$ ), d’où le nom de première aimantation.

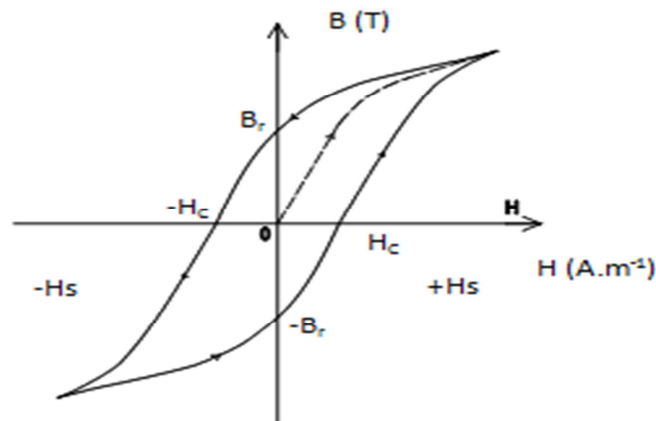
**I-1.3.2 Phénomène d’hystérésis**

Le cycle d’hystérèse illustre la relation existant entre l’aimantation  $M \vec{}$  (ou l’induction  $B \vec{}$ ) en fonction du champ magnétique appliqué  $H \vec{}$  (Fig.8). Il caractérise chaque corps ferromagnétique et sa forme dépend en outre de la géométrie de l’échantillon, des contraintes mécaniques auxquelles ce dernier est soumis, de sa température, etc. On y distingue :

- la courbe de première aimantation
- la valeur  $H_s$  du champ de saturation (pour lequel tous les domaines de Weiss ont une même direction)
- la valeur  $B_r$  de l’induction rémanente
- la valeur  $H_c$  du champ coercitif
- la symétrie du cycle (des points  $P' (-H_s)$  et  $P (H_s)$  par rapport à O)

Si on annule l’excitation magnétique d’un corps ferromagnétique aimanté, celui-ci garde une certaine aimantation, traduite par la présence d’une induction magnétique  $B_R$  appelé induction rémanente. C’est le phénomène d’hystérésis.

Pour annuler l’induction magnétique rémanente, il faut imposer une excitation magnétique négative  $-H_C$ , appelée excitation coercitive. [8]

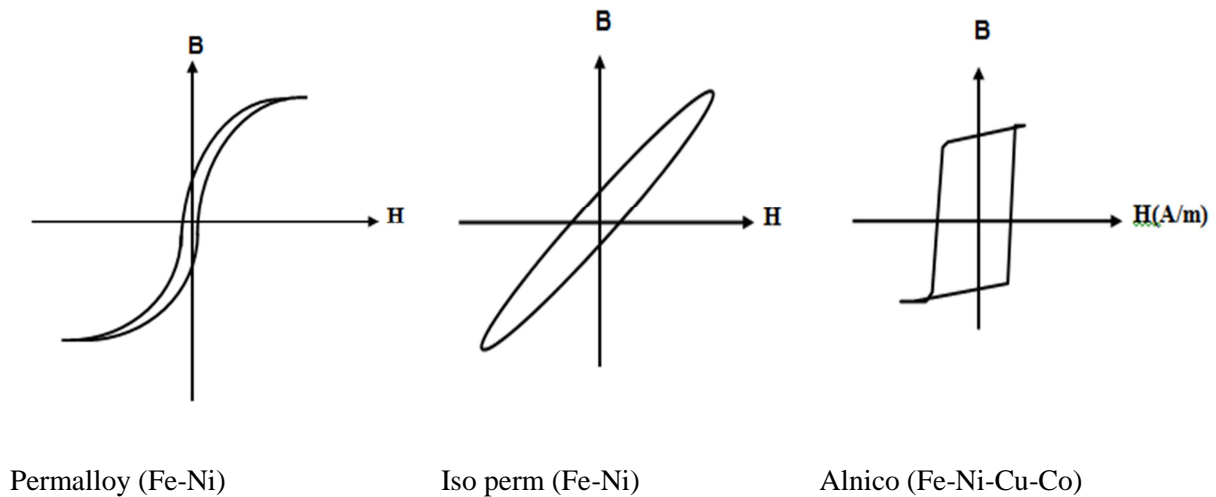


**Figure I.11: Cycle d’hystérésis**

On appelle induction rémanente  $B_r$ , l'induction qui subsiste dans l'échantillon après décroissance de H jusqu'à la valeur égale à zéro.

On appelle champ coercitif  $H_c$  le champ magnétique nécessaire pour annuler l'induction rémanente  $B_r$  (figure I.11) .L'induction maximale est l'induction de saturation  $B_{sat}$ .

La forme du diagramme  $B=f(H)$ , peut fortement varier d'un matériau magnétique à un autre. Pour un matériau donné, elle varie en fonction des conditions d'utilisation et plus particulièrement en fonction de l'amplitude du champ magnétique H (Figure I.12.)



**Figure I.12: cycle d'hystérésis de quelques matériaux ferromagnétique [8]**

### I.1.4 Classification des matériaux ferromagnétiques

Lors de la suppression du champ magnétique extérieur, l'aimantation persiste plus ou moins. A ce stade, plusieurs types de comportements sont possibles : durs ou doux.

#### I.1.4.1 matériaux magnétiques doux :

Les matériaux magnétiques doux ont une réponse unique à un niveau d'excitation et lorsque cette excitation est supprimée, ils perdent leur aimantation. Dit autrement, l'orientation des moments revient dans un état comparable à l'état initial.

Aimantés, l'influence de ces matériaux sur le champ extérieur est importante.

En effet, il est énergétiquement beaucoup plus facile pour le champ magnétique de les traverser que de traverser le vide ou l'air (figure I.13). Ils sont donc très couramment utilisés pour canaliser ou concentrer le champ.

Dans les matériaux magnétiques doux, le champ coercitif  $H_c$  est petit et  $B_r$  élevé. La surface de leur cycle d'hystérésis est faible voir inexistant ( $10^{-2} A/m < H_c < 100 A/m$ ). Ils sont en générale feuilletés et a base de fer (du fer pur est très importante).

On distingue essentiellement :

- Les aciers électriques au silicium ( $f=50$  Hz) ;
- Les alliages fer nickel au cobalt ( $f < 100$  KHz) ;
- Les ferrites (oxydes de fer ( $f < 1000$  KHz)).

#### **I.1.4.1.1 Aciers électriques**

Ils sont constitués de tôles en acier allié au silicium (1 à 5%). Ce qui a l'avantage d'augmenter la résistivité mais l'inconvénient de rendre les tôles cassantes. Ils sont utilisés essentiellement dans les machines électriques travaillant aux fréquences industrielles (transformateurs et machines tournantes).

- Les tôles classique a grains non orientés ( $C_{fer} \approx 5$  W / kg), sont utilisés dans les machines tournantes et transformateurs a faible puissance ( $< 100$  KW) ;
- Les tôles a grains orientés ( $C_{fer} \approx 1$  W/ kg), a propriétés magnétiques optimales (forte perméabilité, induction a saturation importante et très faibles pertes fer), sont essentiellement utilisées dans les transformateurs de forte puissance ( $> 1$  MW).

#### **I.1.4.1.2 Alliages fer nickel ou fer cobalt**

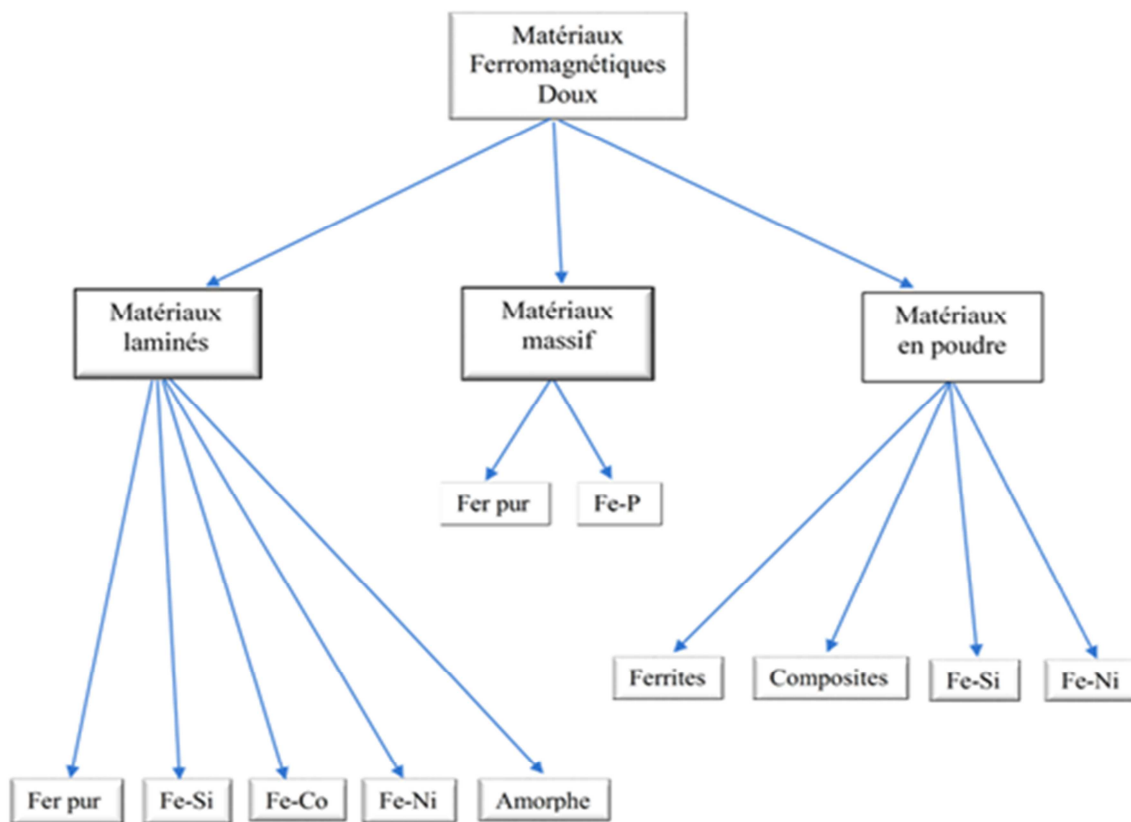
Le nickel et surtout le cobalt sont des matériaux onéreux et sont alliés au fer dans des proportions importantes (30 à 80 %) ce qui rend ces alliages beaucoup plus chers que les aciers électriques. Ils sont essentiellement utilisés en moyenne fréquence ( $f < 100$  KHz) et généralement dans les domaines ou la puissance mise en jeu est plutôt faible :

- Electrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, relais,....) ;
- Téléphonie
- Dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique)

#### **I.1.4.1.3 Ferrites douces**

Ce sont des céramiques ferromagnétiques a base d'oxydes de fer ( $XFe_{12}O_{19}$ , avec X : Mn, Ni ou Zn). Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage a haute température ( $\approx 1200^\circ C$ ), le matériau obtenu est doté d'une très grande résistivité, il est massif, mais malheureusement très cassant. Elles sont très utilisés en

électronique de puissance et particulièrement dans les alimentations où la fréquence de fonctionnement est très élevée ( $f > 100$  KHz).



**Figure I.13: Classification des principaux types de matériaux ferromagnétiques doux**

#### I.1.4.2 matériaux durs

Les matériaux magnétiques durs, communément appelés aimants, présentent une forte hystérésis. Ainsi, lorsque le champ excitateur est retiré, de nombreux moments restent orientés (effet mémoire). Ces matériaux créent alors leur propre champ magnétique, dit permanent. Ils sont donc utilisés en tant que sources de champ magnétique.

Tous les matériaux ferromagnétiques sont fortement attirés par les zones de champs forts. En effet, leur présence diminue significativement l'énergie magnétostatique requise pour aimanter le milieu.

Dans les matériaux magnétiques durs, le champ coercitif  $H_C$  est élevé et  $B_r$  importante. La surface de leur cycle principal d'hystérésis est très large ( $10^4$  A/m < matériaux), les parois de Bloch sont fortement épinglées. Ils sont utilisés pour faire des aimants permanents (ex : acier).

On les utilise dans le 4ème quadrant ( $B > 0$  et  $H < 0$ ).  $H_c$  devient alors le champ démagnétisant à ne pas dépasser.

On distingue essentiellement :

- Ferrites dures (moins chères et plus utilisées) ;
- Alliages a base de terres rares (très performants et en expansion) ;
- Alnico (alliages fer+ Al Ni Co) en perte de vitesse

#### **I.1.4.2.1 Alnico**

Ce sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt (les meilleures performances sont obtenues pour les alliages riches en cobalt) ; ils ont une très bonne tenue en température ainsi qu'une bonne solidité mécanique. Leur induction rémanente est assez élevée, mais leur aimantation chute très rapidement de manière irréversible en présence d'un champ démagnétisant (augmentation de l'entrefer). Ils sont utilisés dans les applications où les aimants sont exposés à des sollicitations mécaniques.

#### **I.1.4.2.2 Ferrites dures :**

Ce sont des céramiques à base d'oxydes ferriques ( $Fe_2O_3$ ) associées à du Baryum (Ba) ou du strontium (Sr). Elles présentent le meilleur rapport qualité prix. Par contre leur induction rémanente est assez faible (0.5 T) et leur aimantation chute assez rapidement de manière irréversible en présence d'un champ démagnétisant (idem alnico). De plus les céramiques obtenues sont très dures et cassantes ce qui interdit l'usinage des produits finis.

#### **I.1.4.2.3 Aimants à base de terres rares**

elles ont une densité d'énergie spécifique de  $350 \text{ kJ/m}^3$  ( $50 \text{ kJ/m}^3$  pour les alnico), ce qui permet une diminution importante du poids et du volume à induction et entrefer donnés. Le champ coercitif est très élevé avec une aimantation quasi constante, ce qui rend très difficile une désaimantation de l'aimant. Il existe deux types d'alliages : samarium-cobalt et néodyme-fer-bore. Ces produits sont relativement chers et n'ont pas une bonne tenue en température. Ils sont réservés à des applications spécifiques où l'encombrement est le paramètre majeur.

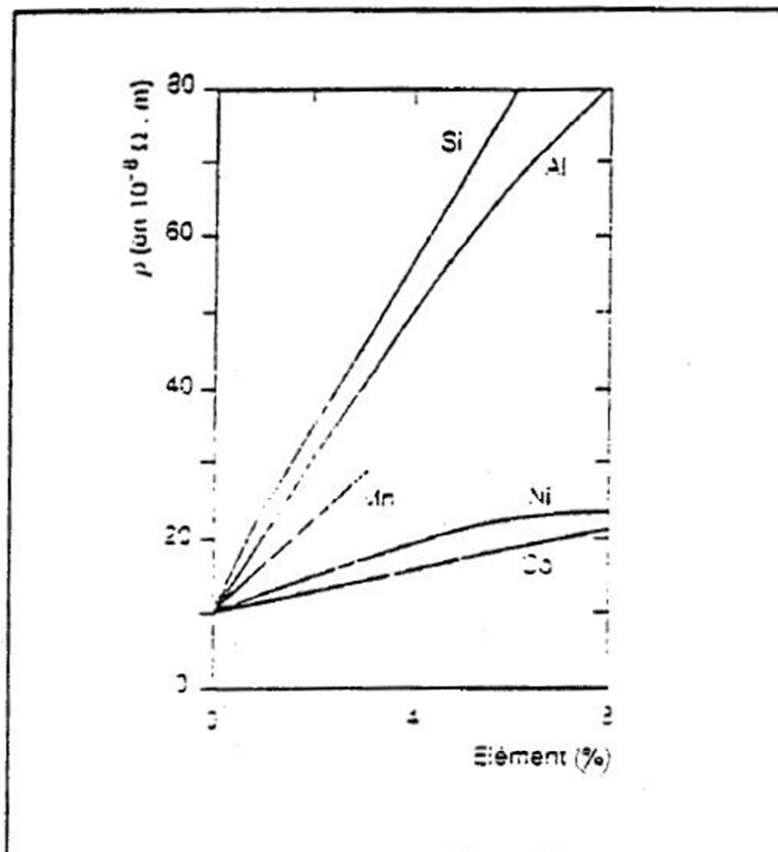
### **I.2.1 Les alliages fer-silicium.**

#### **I.2.1.1. 1: Effet de l'addition de silicium sur les propriétés Électromagnétiques (et autres) de fer**

La présence d'atomes de **silicium (Si)** dans le **fer** augmente considérablement sa résistivité, comme le montre (la figure-I.14). Cette augmentation diminue les pertes dus aux

courants de Foucault. Cependant l'addition **de silicium** ne peut franchir un pourcentage (3 à 4%) imposé par des contraintes technologiques (Laminage à froid).

De plus, les caractéristiques mécaniques du matériau se trouvent améliorées au fur et à mesure que le pourcentage **de silicium** augmente. L'addition **de silicium** fait croître la dureté des matériaux et améliore leur résistance mécanique à la traction. [9]



**Figure-I.14 : Résistivité électrique de différents alliages à base de fer en fonction Du pourcentage en éléments à température ambiante [6.7]**

Le côté négatif de l'ajout **de silicium** (ou autres matériaux) réside dans la détérioration de la principale propriété magnétique, l'aimantation à saturation qui se trouve réduite (figure-I.15). Un compromis s'impose en conséquence entre les avantages et les inconvénients de l'addition **de Silicium** (ou autre type). L'addition **de Silicium** n'est pas seul responsable de la dégradation des propriétés des matériaux magnétiques. La nature et la concentration des impuretés influent considérablement sur les pertes. Des études [9] ont montré que le soufre et

l'oxygène sont plus nocifs que l'azote. Il est donc indispensable de préparer un acier d'une grande pureté durant son processus de traitement.

L'augmentation de la température peut réduire également les pertes par hystérésis. Par contre, cette augmentation réduit l'induction  $B$  liée à la réduction de l'aimantation à saturation  $M_s$ . Ceci est vrai quand  $H$  est au-delà d'une valeur donnée. Au-dessous de cette valeur,  $B$  devient proportionnel à la température.

D'autres études ont contredit le résultat précédant, leurs conclusions étant que la proportionnalité entre l'induction et la température n'obéit pas à une loi déterminée (variation aléatoire).

Toutefois, il y a toute une "gamme" de paramètres qui agissent sur les propriétés magnétiques, tels que l'induction, la fréquence, la forme de la tôle, etc.....

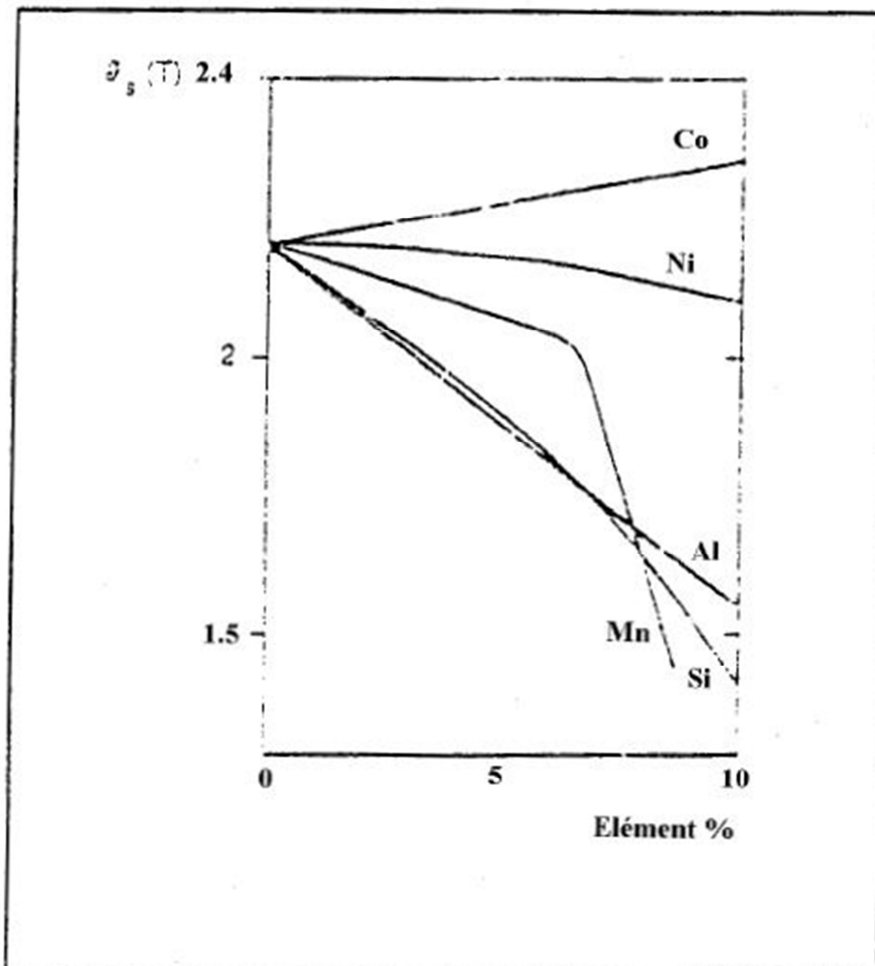


Figure-I.15 : Aimantation à saturation de différents alliages à base de fer en fonction du pourcentage en éléments à température ambiante [6.7]

Le **fer pur** a un comportement cristallographique compliqué, puisqu'il change de structure cristalline entre 910 et 1400°C. Il passe de l'état cubique centré (**ferrite ou Fe $\alpha$** ) à l'état cubique à faces centrées (**austénite ou Fe $\gamma$** ). L'addition de **silicium** augmente la stabilité de la phase  $\delta$  alors que d'autres impuretés comme le carbone provoquent l'effet inverse. Pour une concentration pondérale en **silicium** suffisante ( $CSi > 2,4 \%$  et  $CC < 0,05 \%$ ), le changement de phase  $\alpha \Leftrightarrow \gamma$  disparaît. Le fait que le métal conserve sa structure  $\alpha$  quelle que soit la température facilite les traitements thermiques de l'alliage. [9]

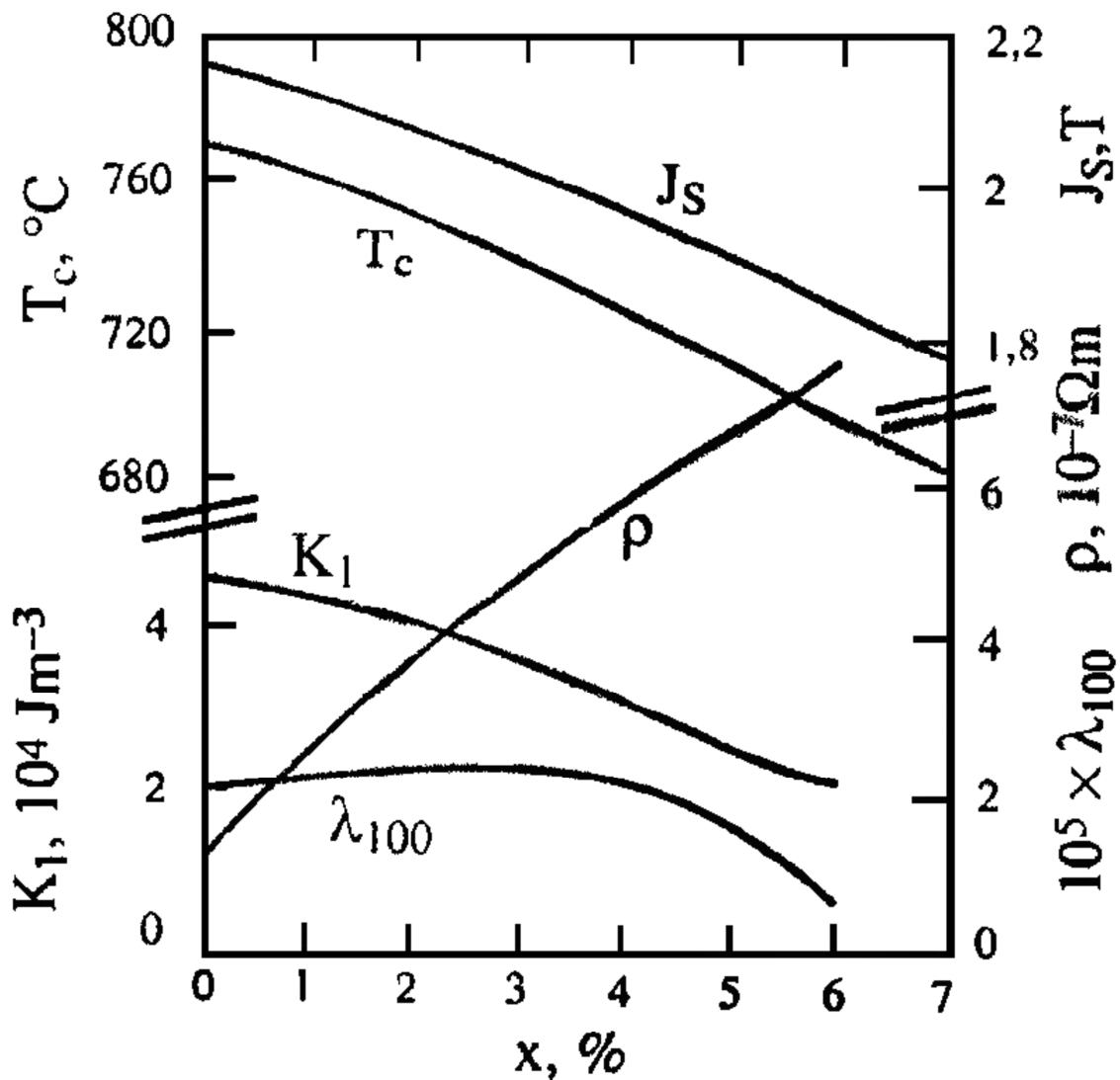


Figure I-16: Effet de l'addition de Silicium sur les propriétés Électromagnétiques du fer à 20°C.

$x$  : pourcentage de silicium (en masse)

$K_1$  : constante d'anisotropie magnéto cristalline.

$\lambda_{100}$ : Magnetostructuration.

$\rho$  : Résistivité.

$J_s$  : Polarisation à saturation.

$T_c$  : température de Curie.

### **I-3.1.2 Méthode de calcul des pertes magnétique.**

Toute variation d'induction dans un matériau magnétique provoque, à l'intérieur de celui-ci, une dissipation d'énergie apparaissant sous forme de chaleur et n'est généralement pas récupérable, d'où l'expression de pertes magnétique. Il existe trois type de pertes magnétiques :

#### **I.3.1.2.1 Pertes par hystérésis**

Elles sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de BLOCH en mouvement. Elles sont maximales quand les forces d'épinglage sont les plus grandes (dans les matériaux durs).les pertes par hystérésis correspondent au travail nécessaire pour parcourir lentement le diagramme B-H du matériau .Elles sont donc proportionnelles à la fréquence :

$$P_h = \alpha . B_m . f \quad (\text{I.13})$$

Dans le cadre des transformateurs, on utilise des matériaux doux pour cette simple raison.

#### **I-3.1.2.2.Pertes par courant de Foucault**

La variation du champ magnétique dans la matière génèrent par induction des courants induits qui se rebouclent sur eux mêmes.il y a donc échauffement par effet joule. Cette fois-ci ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence et inversement proportionnelles à la résistivité du matériau  $p$  :

$$P_f = \beta . B_m . f^2 \quad (\text{I.14})$$

Afin de les limiter, on cherche à réduire le parcours des courants induits, c'est pour cette raison que l'on utilise des circuits magnétiques feuilletés isolés.

**I-3.1.2.3. Pertes magnétiques ou pertes fer**

Les pertes par hystérésis et par courant de Foucault prennent naissance à l'intérieur du matériau. Elles sont très souvent cumulées et prénommées « pertes magnétiques ou pertes fer » :

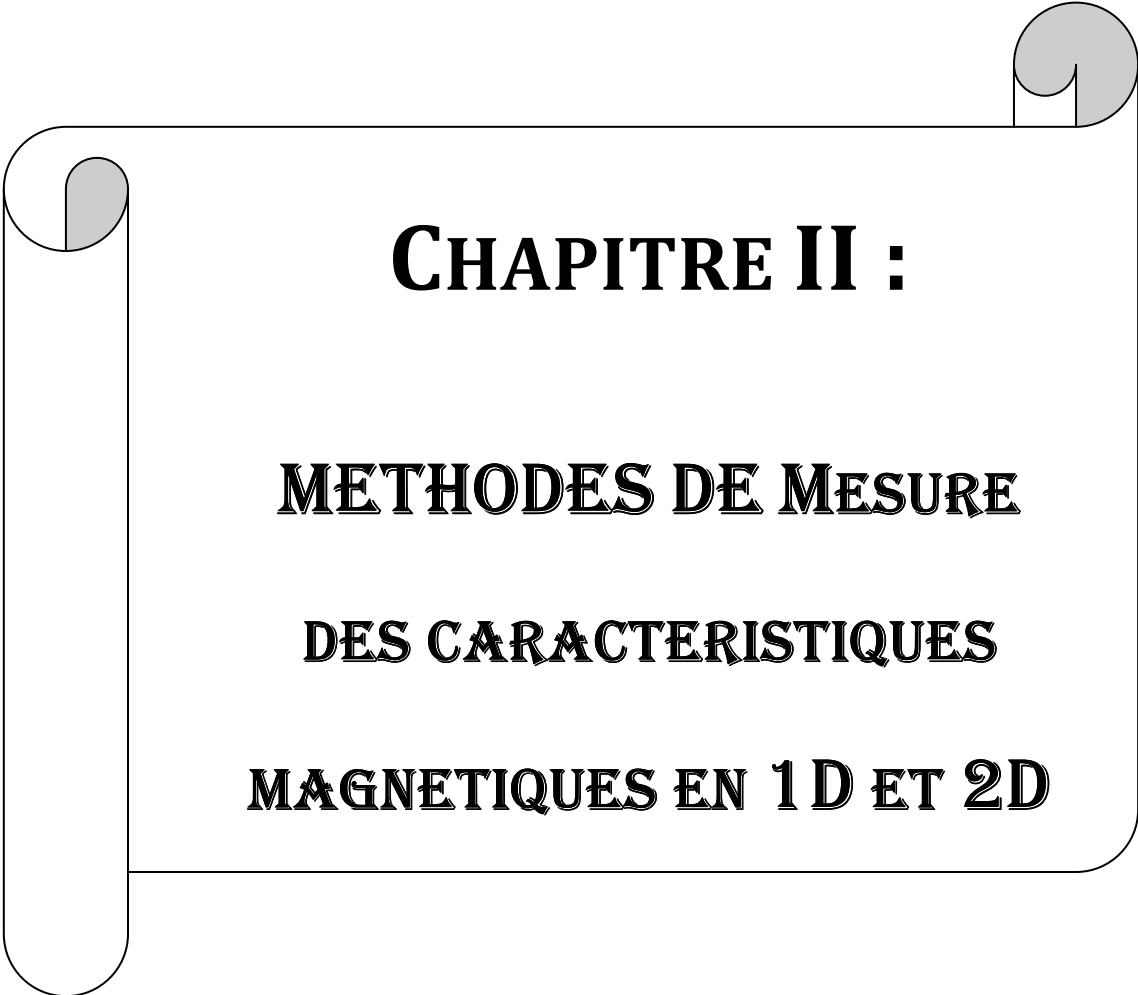
$$P_m = M \cdot C_{fer} * \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \left(\frac{B_m}{B_{m0}}\right)^2 \quad (\text{I.15})$$

$C_{fer}$  : Coefficient de pertes fer en w/Kg

M : masse du circuit,  $f_0=50$  Hz,  $B_{m0}=1$ T,  $1.5 < k < 2$

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté un rappel théorique sur l'origine du magnétisme à différentes échelles, à savoir l'échelle atomique, microscopique et macroscopique. On a étudié la classification des matériaux magnétiques et les différents matériaux à base de fer ainsi que la méthode de calcul des pertes magnétiques.

A decorative scroll graphic with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the text.

**CHAPITRE II :**

**METHODES DE MESURE**

**DES CARACTERISTIQUES**

**MAGNETIQUES EN 1D ET 2D**

## Introduction

Un matériau doux idéal est celui qui peut acquérir une polarisation magnétique de très grand module, disons plusieurs Teslas, dans un champ d'excitation très réduit, Il possède donc ce qu'on appelle communément une très grande perméabilité, En outre, et c'est une qualité secondaire, ce matériau idéal n'aurait aucune perte en fonctionnement dynamique, Malgré les progrès considérables réalisés depuis les débuts de la construction électrique, progrès qui se poursuivent d'ailleurs sans relâche, les matériaux doux utilisés en construction électrique sont encore loin de satisfaire cet idéal. Leurs caractéristiques précises intéressent en particulier les constructeurs, puisqu'elles jouent un rôle déterminant dans les performances des machines électriques. D'ailleurs ces matériaux magnétiques sont commercialisés avec des spécifications garanties

Dans ce présent chapitre nous exposerons les méthodes et les dispositifs utilisés pour mesurer les caractéristiques magnétiques

### II-1 : méthodes et dispositifs utilisés pour mesurer les caractéristiques magnétiques en 1D et 2D :

#### II.1.1 Principe de caractérisation :

Les propriétés d'un matériau magnétique sont généralement représentées par sa courbe de première aimantation et son cycle d'hystérésis, à partir desquelles on peut avoir quelques paramètres importants tels que le champ coercitif  $H_c$ , le champ maximal  $H_{max}$ , l'induction rémanente  $B_r$ , l'induction à saturation  $B_s$ , et la perméabilité, Ces paramètres peuvent être utilisés pour la quantification des pertes dans le matériau, pour une excitation bien déterminée, ainsi que pour identifier un modèle de son cycle d'hystérésis qui est souvent introduit dans le calcul de champ par la méthode des éléments finis (MEF) [13].

Afin de déterminer les propriétés magnétiques d'un matériau, il existe plusieurs méthodes et moyens bien connues :

- Les méthodes basées sur la force exercée sur un matériau magnétique placé dans un gradient de champ [13]. Les appareillages utilisant ces méthodes, appelées balance de Faraday, sont précis et sensibles, mais très délicats à utiliser. Ils sont réservés à l'usage des laboratoires spécialisés, plus particulièrement des matériaux faiblement magnétiques [1].

- Les méthodes basées sur la loi de l'induction, de loin les plus nombreuses. Il s'agit dans ce cas de mesurer la variation du flux issue de l'échantillon, ce qui est obtenu en mesurant la tension induite dans une bobine de lecture. [13]

Deux types de moyens sont plus particulièrement utilisés :

- Perméamétrie aussi appelé « cadre une bande » : la mesure consiste à employer un circuit magnétique externe aux propriétés connues refermé sur une tôle de matériau à caractériser. [14]
- Hystérésigraphe : la mesure consiste à employer un circuit magnétique fermé constitué du matériau à caractériser. On utilise généralement de circuit torique ou des cadres Epstein. [14].

Dans notre travail on se base sur la méthode classique, qui consiste à mesurer le champ magnétique  $B$  et l'induction magnétique  $H$  à partir de cycle d'hystérésis obtenue. La valeur de la tension débitée par l'oscilloscope nous permet de calculer le courant en insérant une résistance :

Dans un premier temps il s'agit d'établir une courbe d'hystérésis  $\Phi(i)$  du noyau associé à un nombre de spires  $N$  (flux total en fonction du courant dans l'enroulement), la plus précise possible à partir de mesures temporelles de courant et de tension. Il s'agit d'une méthode classique réalisée par la mesure du courant d'excitation du noyau et de sa tension induite dont l'intégration donne l'image du flux : Courbe  $\Phi(i)$  tracée à partir de  $i(t)$  et de  $f(t) = \int v \times dt$ . Cette méthode, simple en apparence, exige aussi bien des précautions de mesure, que des traitements de données qui seront décrits en détail : moyens, suppression du biais en tension par calcul, suppression du biais de courant par calcul ou par calibration, détermination de la valeur initiale de flux. Concernant la courbe d'hystérésis, il est possible de la représenter sous forme brute  $(\Phi_n, I_n)$ , ( $\Phi_n$  : flux total pour  $N$  spires,  $I_n$  courant du bobinage) sans erreur supplémentaire, ce qui reste nécessaire pour estimer et comparer les pertes fer réelles de noyaux, correspondants à différentes solutions de composants magnétiques (encombrement identique, mais avec noyaux, matériaux et enroulements différents). On peut aussi revenir à la forme classique  $(B, H)$  en prenant en compte la géométrie du noyau et le nombre de spires.

$$\mathbf{H} = \frac{n \cdot I_n}{l_e} \text{ et } \mathbf{B} = \frac{\Phi_n}{(N \cdot S)} \quad (\text{II. 1})$$

Cette forme habituelle adaptée à la comparaison stricte des performances des matériaux n'est pas directe et peut conduire à des erreurs si les paramètres géométriques sont mal maîtrisés (cas de petits noyaux), ou si le matériau est fortement dépendant du foisonnement du matériau (tores à bande), ou encore pour des géométries complexes où il y a inhomogénéité du champ. Cette démarche sera limitée aux exemples toriques et seules les données géométriques du constructeur seront utilisées pour cette présentation. [15]

### II.1.2. Présentation du circuit magnétique :

Toute mesure des caractéristiques d'un matériau ferromagnétique doux nécessite impérativement l'utilisation d'un circuit magnétique fermé. Cette obligation vient du fait que, dans tout circuit ouvert, l'échantillon est soumis à un champ démagnétisant interne, indésirable mais trop important et il est inhomogène le plus souvent [16]. Pour ces raisons, il y a certaines formes de circuits qui sont recommandées pour la caractérisation des matériaux ferromagnétiques doux ; leur fonctionnement est basé sur la loi de l'induction et ils possèdent en commun deux enroulements, le premier pour l'excitation et le deuxième pour la mesure [13].

#### II.1.2.1 Le tore :

Le procédé le plus pertinent pour relever les caractéristiques magnétiques d'un matériau est de réaliser avec ce dernier un circuit torique circulaire tel que le rayon moyen  $\alpha$  y soit grand vis-à-vis de l'épaisseur  $\beta$  (figure II.1) [13].

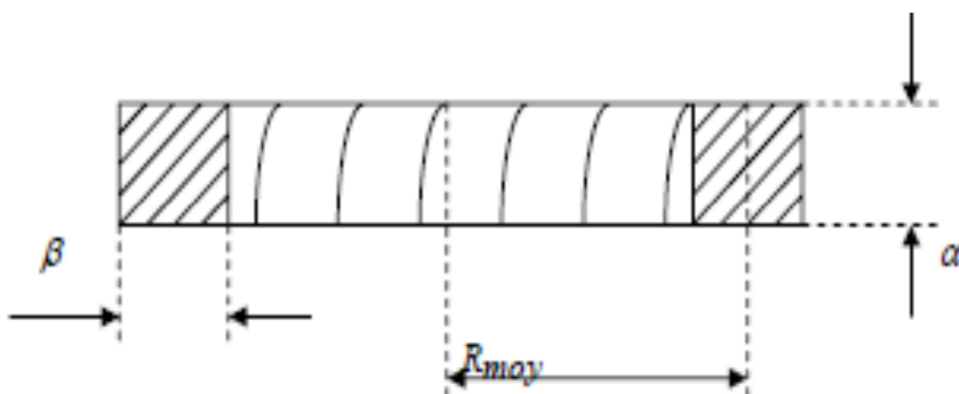


Figure II.1 - coupe dans un circuit torique [13]

Le tore est généralement pourvu de deux enroulements (voir figure II.2) régulièrement répartis sur sa circonférence :

-Un bobinage d'excitation : comportant  $N_1$  spires, qualifié d'enroulement primaire et parcouru par un courant d'excitation  $I_1$ . Le champ appliqué en un point situé à la distance  $r$  de l'axe tangentiel déduit du théorème d'Ampère, Son module varie donc comme  $1/r$  entre le rayon intérieur  $r_i$  et le rayon extérieur  $r_e$  du tore. Pour limiter ces variations on opère généralement sur tores relativement minces :  $r_e / r_i < 1,1$ .

-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 enroulement secondaire [16].

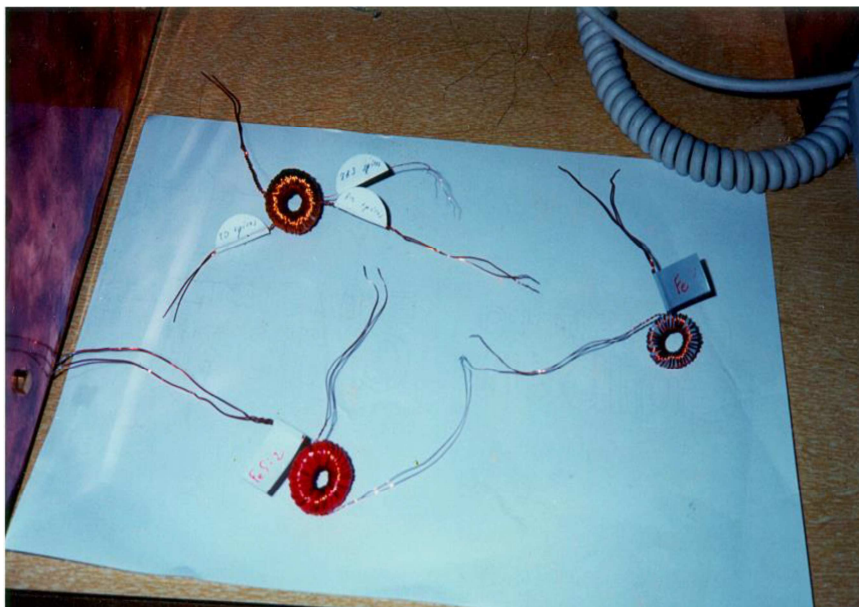
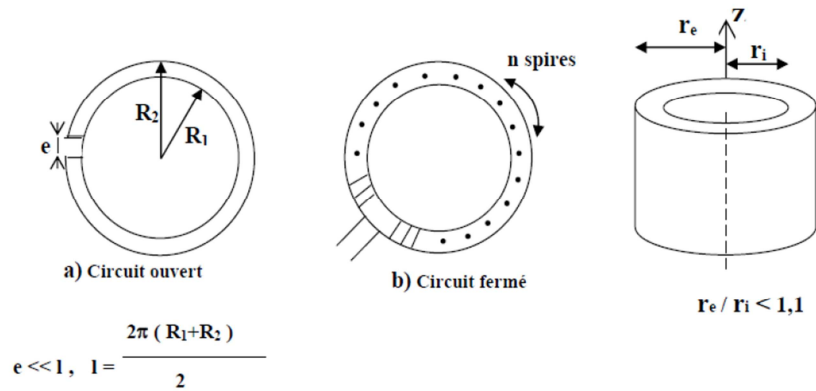


Figure-II.2. Le tore.

### II.1.2.2 le cadre d'Epstein :

C'est un circuit fermé démontable, de forme carrée, utilisé dans le monde entier pour caractériser les tôles magnétiques (figure-II.3). Sa construction a été soigneusement codifiée par de nombreux organismes de normalisation (CEI, AFNOR,.... etc.).

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

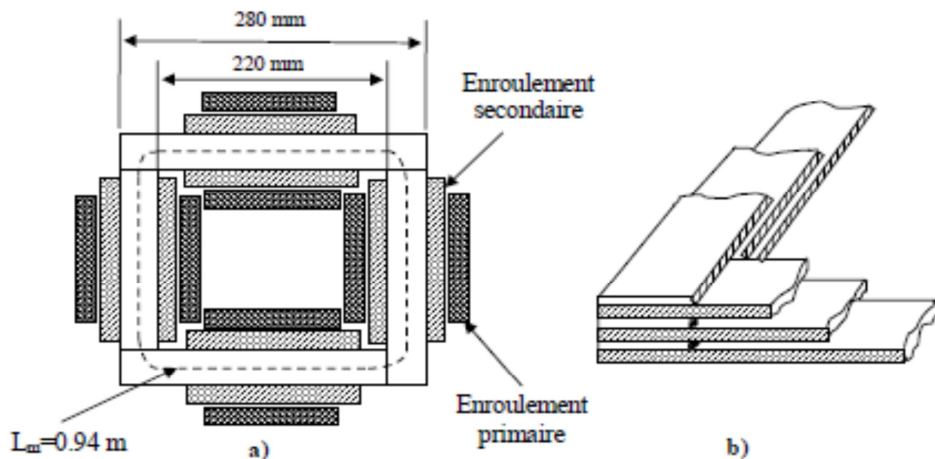


Figure II.3 - Cadre Epstein, a) dimensions, b) joints de recouvrement [17]

Les quatre prismes du cadre Epstein sont munis chacun de deux enroulements; primaire et secondaire. L'enroulement primaire est parcouru par le courant d'excitation  $I_1(t)$ . La variation du flux induit dans l'enroulement secondaire une tension  $V_2(t)$ . Dans ce cas le champ magnétique est relié au courant primaire  $I_1(t)$  par la relation

$$H(t) = \frac{N_1}{L_m} I_1(t) \quad (\text{II. 2})$$

Où  $N_1$  est le nombre de spires de l'enroulement primaire, et  $L_m$  la longueur moyenne du circuit magnétique. L'induction magnétique est obtenue en intégrant la tension secondaire  $V_2(t)$ ;

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int V_2 dt \quad (\text{II. 3})$$

Où,  $N_2$  est le nombre de spires de l'enroulement secondaire, et  $S$  la section du circuit magnétique du cadre.

Actuellement, le cadre Epstein est utilisé avec des équipements d'acquisitions de donnée permettant l'analyse des résultats directement sur ordinateur

### II.1.2.3 Le cadre à bande unique

L'échantillon de mesure est constitué par une seule tôle, de forme carrée ou rectangulaire, et de dimensions suffisantes pour représenter un lot commercial [18]. La fermeture du circuit magnétique aux deux extrémités de la bande est assurée par un, ou de préférence deux culasses mobiles, construites en matériau de grande perméabilité (figure II.4).

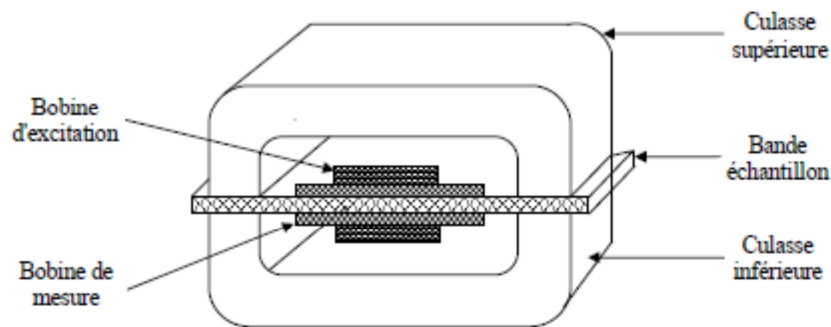


Figure II.4 - Schéma de principe d'un cadre a bande unique comportant deux culasses de fermeture de flux [17]

La section des culasses est choisie très supérieure à celle de l'échantillon, par exemple 30 fois ou 50 fois plus grande. En utilisation dynamique, les culasses doivent être feuilletées. Elles peuvent être réalisées en tôles FeSi de bonne qualité, ou mieux en alliage FeNi à haute perméabilité. Si on choisit d'effectuer les mesures sur des tôles échantillon de grandes dimensions, par exemple 500 x 500 mm<sup>2</sup> (norme CEI 68-404-3), alors les culasses sont obligatoirement très lourdes.

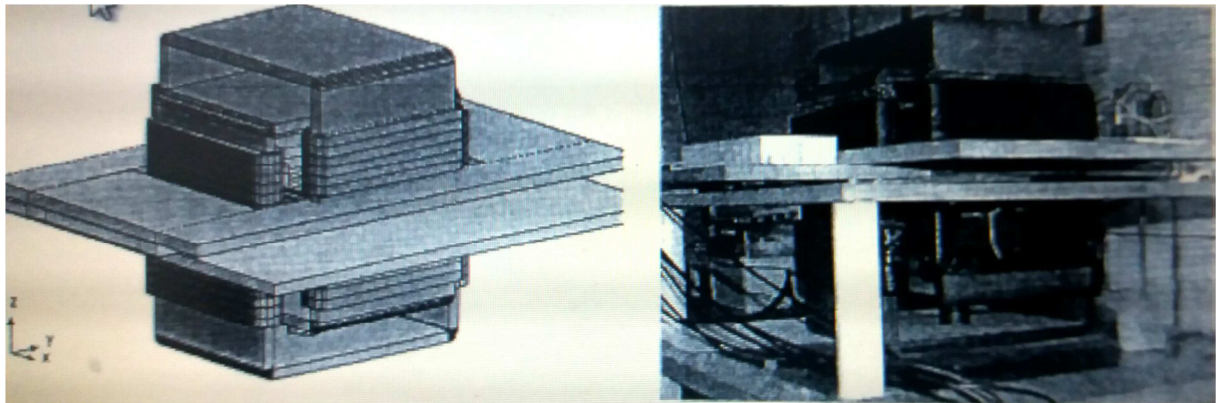
Une bonne fermeture du circuit magnétique, avec contrôle du parallélisme des faces d'appui et contrôle de la pression d'appui nécessite une construction mécanique très soignée. Pour la mise en place d'une bande échantillon, on commence par ouvrir le circuit magnétique, puis on

glisse la bande dans un fourreau qui supporte les bobinages d'excitation et de mesure, et on referme ensuite le circuit. L'aimantation de la bande est uniforme par construction dans sa partie centrale.

Parfaitement réalisé, le cadre à bande unique constitue avec ses accessoires un dispositif complexe mais très performant. Il permet en particulier la mesure absolue de toutes les grandeurs magnétiques caractéristiques des matériaux doux.

#### II.1.2.4 Cadre RSST300

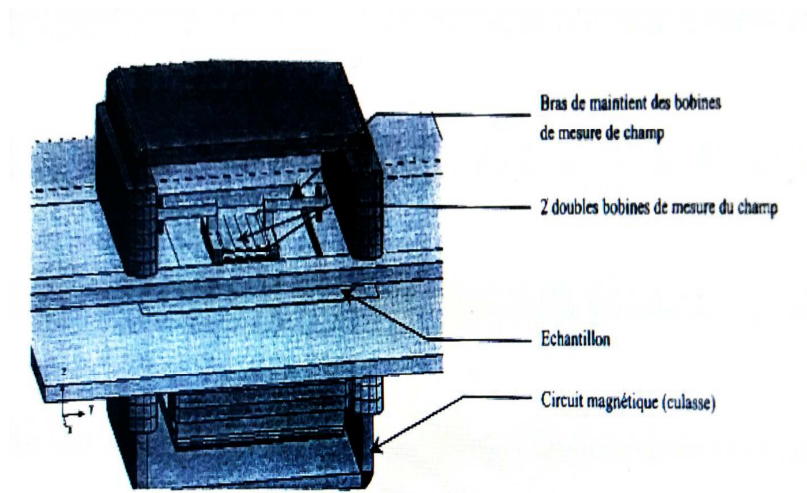
Les mesures vectorielles effectuées au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble ont été faites à partir d'un dispositif de caractérisation en 2D appelé RSST300 (Rotational Single Sheet Tester). Les échantillons testés doivent alors être des tôles carrées de 300mm de côté.



**FIGURE II.5 : Cadre à champ tournant. [19]**

Le circuit magnétique est constitué de quatre culasses et de l'échantillon. Deux culasses conduisent un champ suivant l'axe longitudinal (axe X) et les deux autres conduisent le champ transversal (axe y). Le champ magnétique est généré par huit bobines (deux par culasse) (voir figure II.5). L'excitation est choisie de sorte à ce que le champ se referme dans l'échantillon.

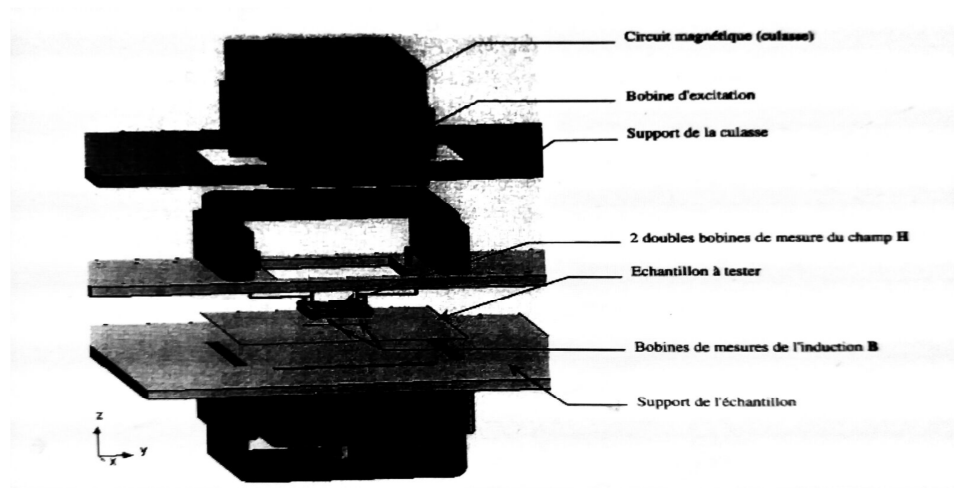
Un entrefer de 1,5mm est imposé à l'aide de cales (non représentées sur les figures) entre l'échantillon et les culasses enfin d'obtenir un champ plus uniforme dans l'échantillon. Sur la figure II.6, une culasse a été supprimée pour montrer plus clairement comment se dispose la tôle et les dispositifs de mesure. [9]



**FIGURE II.6 : Cadre à champ tournant sans la culasse supérieure. [19]**

L'induction  $B$  dans l'échantillon est mesuré à partir de deux bobines (d'axe  $X$  et  $Y$ ) entourant l'échantillon sur une longueur de  $2l$ . Elles sont représentées en figure II.7. Le champ magnétique  $H$  est mesuré dans l'air, près de la tôle: deux bobines (d'axe  $X$  et  $Y$ ) sont placées à une distance  $Z1$  de la tôle et deux autres à une distance  $Z2$ . A partir de la mesure du Champ à la distance  $Z1$  et  $Z2$ , il est possible d'approcher finement le champ au niveau de la tôle.

La figure II.7 montre la disposition des bobines de mesure du champ. [8]

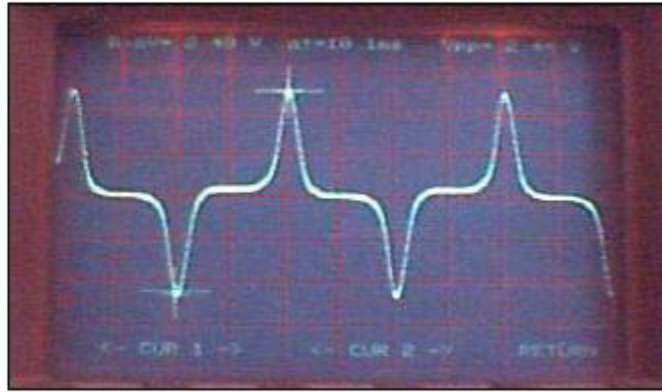


**FIGURE II.7 : Cadre à champ tournant, vue éclatée. [19]**

### II.1.3 Contrôle de la forme d'onde $B(t)$ et $H(t)$

Les propriétés magnétiques d'un matériau quelconque en régime dynamique dépendent de ses conditions d'excitation. On peut indifféremment imposer l'onde d'excitation  $H(t)$  à laquelle le matériau répond par une certaine polarisation  $J(t)$  et une certaine induction  $B(t)$ , ou

inversement imposer l'onde d'induction  $B(t)$ . Les constructeurs électriciens s'intéressent de façon privilégiée au fonctionnement des circuits magnétiques en régime d'induction sinusoïdale. Imposer une Induction  $B(t)$  sinusoïdale,  $H(t)$  est alors une fonction périodique très riche en harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7 .....  $(2n+1)$ ), comme l'indique la figure (II.8). Elle est d'autant plus riche quand on approche la saturation



**Figure II.8 - Allure du champ d'excitation  $H(t)$  pour une induction sinusoïdale [16]**

### II.1.3.1 Technique simple d'excitation d'un circuit en régime sinusoïdal

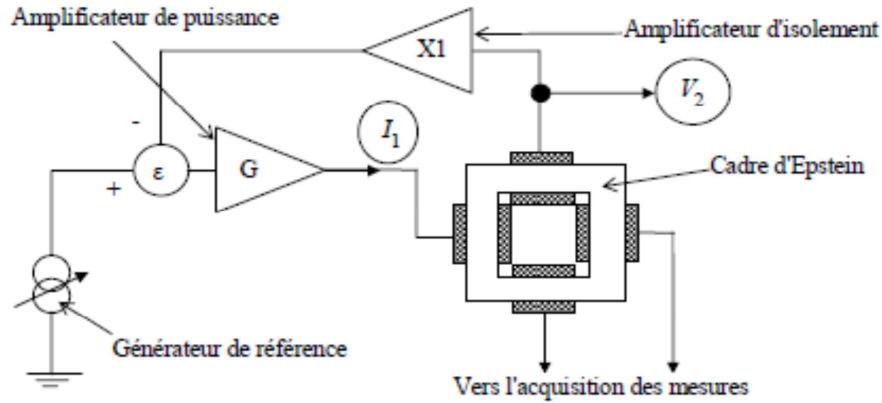
Pour assurer une induction  $B(t)$  sinusoïdale, il suffit d'alimenter l'enroulement primaire par un générateur de force électromotrice sinusoïdale à la fréquence désirée, et d'impédance interne négligeable. Par application de la loi d'Ohm, il vient en effet:

(2.4) Où 'e' désigne la force électromotrice du générateur,  $\Phi_1$  le flux magnétique d'induction embrassé par le circuit primaire de résistance totale  $R_1$  et  $I_1$  l'intensité du courant qui le parcourt.  $B(t)$  est sinusoïdal tant que le produit  $R_1 \cdot I_1$  peut être considéré comme négligeable vis-à-vis de 'e'. On peut s'assurer que  $B(t)$  est bien sinusoïdal en procédant à une analyse de Fourier de la tension  $V_2(t)$  induite dans l'enroulement secondaire. Une pratique courante consiste aussi à faire une mesure simultanée des valeurs moyenne ( $V_2$ ) et efficace ( $V_{2\text{eff}}$ ), par des appareils de grande précision [16]

### II.1.3.2 Utilisation d'une alimentation électronique asservie

Lorsque l'induction approche la saturation  $B_s$ , le courant d'excitation augmente très vite, comme le montre la figure (II.9). Alors il arrive un moment où la condition  $R_1 \cdot I_1$  négligeable devant  $\frac{d\Phi}{dt}$ , exposée précédemment, ne peut plus être satisfaite.  $B(t)$  commence à se déformer et le facteur de forme de  $V_2(t)$  augmente. Pour retrouver des conditions

d'expérience acceptables jusqu'à des valeurs  $B_{max}$  de l'ordre de 1,9T dans le cas des tôles fer-silicium à grains orientés et 1,7 ou 1,8 T dans le cas des tôles fer-silicium non orientés, on utilise généralement une alimentation électronique asservie. La figure (II.9) indique le principe d'une telle alimentation. [16]



**Figure II.9 - Schéma de principe du dispositif de contrôle de la forme d'onde au secondaire [16]**

Le résultat obtenu dépend en tout premier lieu des performances de l'amplificateur de puissance utilisé qui doit être capable de délivrer des pointes de courants très importantes, et qui n'amène aucune composante continue. Le générateur de référence, en principe parfaitement stable en tension et fréquence, assure la pureté harmonique de l'onde  $B(t)$ . Cette même disposition permet, en modifiant l'allure de tension délivrée par le générateur de référence, d'imposer des contraintes  $B(t)$  ou  $H(t)$  très variées, et en particulier de désaimanter l'échantillon avant toute mesure.

#### II-1.4 : Choix des paramètres du circuit.

La première fonction est la transformation de la tension d'alimentation en flux magnétique par l'enroulement primaire.

Alimentée sous une tension  $U_1$ , la bobine sera parcourue par un courant  $I_1$  et induira une induction magnétique  $B$  :

$$B = \mu_0 * N_1^2 * I_1 / L \quad (\text{II. 4})$$

$$U_1 = \mu_0 * N_1^2 * I_1 * \omega * S / L \quad (\text{II. 5})$$

Cela aura pour conséquence une bobine de dimensions importantes si l'on dispose d'un matériau de perméabilité relative  $\mu_r$

$$U_1 = \mu_0 * \mu_r * N_1 * I_1 * \omega * S / L \quad (\text{II. 6})$$

- de sorte que le courant sera divisé par  $\mu_r$

Si l'on s'intéresse aux valeurs maximal ( $B_m, H_m$ ) caractéristiques d'un cycle d'hystérésis d'un matériau, prenons la loi de Lenz (3) et le théorème d'Ampère (4)

$$B_m = \sqrt{2} * U_1 / N_1 * \omega * S \quad (\text{II. 7})$$

$$H_m = \sqrt{2} * N_1 * I_1 / L \quad (\text{II. 8})$$

On peut voir qu'une induction élevée obtenue sous champs  $H_m$  petit son avantage à tout point de vue : on gagne sur la section  $S$  du circuit et sur le courant  $I_1$ . On utilise des matériaux pouvant travailler à haute induction avec  $\mu_r$  autant élevée que possible. [4]

$$\mu_r = B_m / \mu_0 * H_m \quad (\text{II.9})$$

### II-1.5 : Choix du matériau.

La quantité  $\mu_r$  est en fait très dépendante de l'induction  $B_m$  à laquelle travaille le matériau et se dégrade rapidement à partir d'une certaine valeur appelé coude de saturation égale à **1 Tesla pour le fer**. On dimensionne donc avec la relation (7) le circuit magnétique de sorte que le matériau travaille à une valeur voisine de **1 T**, ce qui garantit un  $\mu_r$  de l'ordre de **5000** pour les tôles classiques. En plus de l'utilisation d'un circuit fermé, il sera en **fer**.

### II-2 : Description de l'appareillage

Pour observer expérimentalement la dynamique des parois dans un ferromagnétique on a choisi un dispositif de mesure des cycles d'hystérésis à fréquence et amplitude variables. On a branché un circuit magnétique comme un transformateur, en prenant les valeurs de  $H(t)$  du coté primaire et  $B(t)$  du coté secondaire simultanément. Le signal que l'on choisit triangulaire, ceci afin d'avoir une variation temporelle du champ appliqué constante, est fourni par un générateur de fonctions à fréquence et amplitude variable. Ces deux grandeurs seront nos paramètres principaux. Suit un amplificateur linéaire de puissance, et deux résistances mises en série avec le bobinage primaire de l'échantillon. Les résistances ont deux fonctions : d'abord elles servent à lier les grandeurs  $I_{prim}(t)$  et  $U_{prim}(t)$  de la façon la plus proche d'une dépendance linéaire possible. Ensuite  $R_{shn}$  sert aussi à mesurer le courant primaire.

Du côté secondaire on trouve une chaîne d'amplificateurs, représentée par un seul dans le schéma. Comme il s'agit d'une tension induite, celle-ci est proportionnelle à la variation temporelle de l'induction dans le ferromagnétique. On a donc mis un intégrateur RC avant

d'arriver à la carte d'acquisition. L'intégrateur avait une constante de temps assez grande pour être suffisamment linéaire dans le domaine des fréquences appliquées, [19]

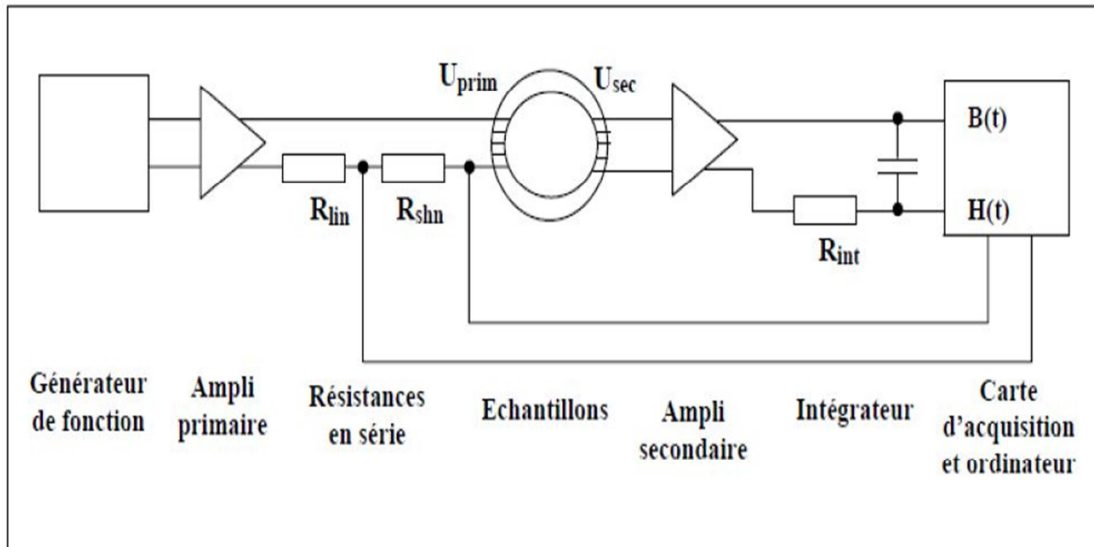
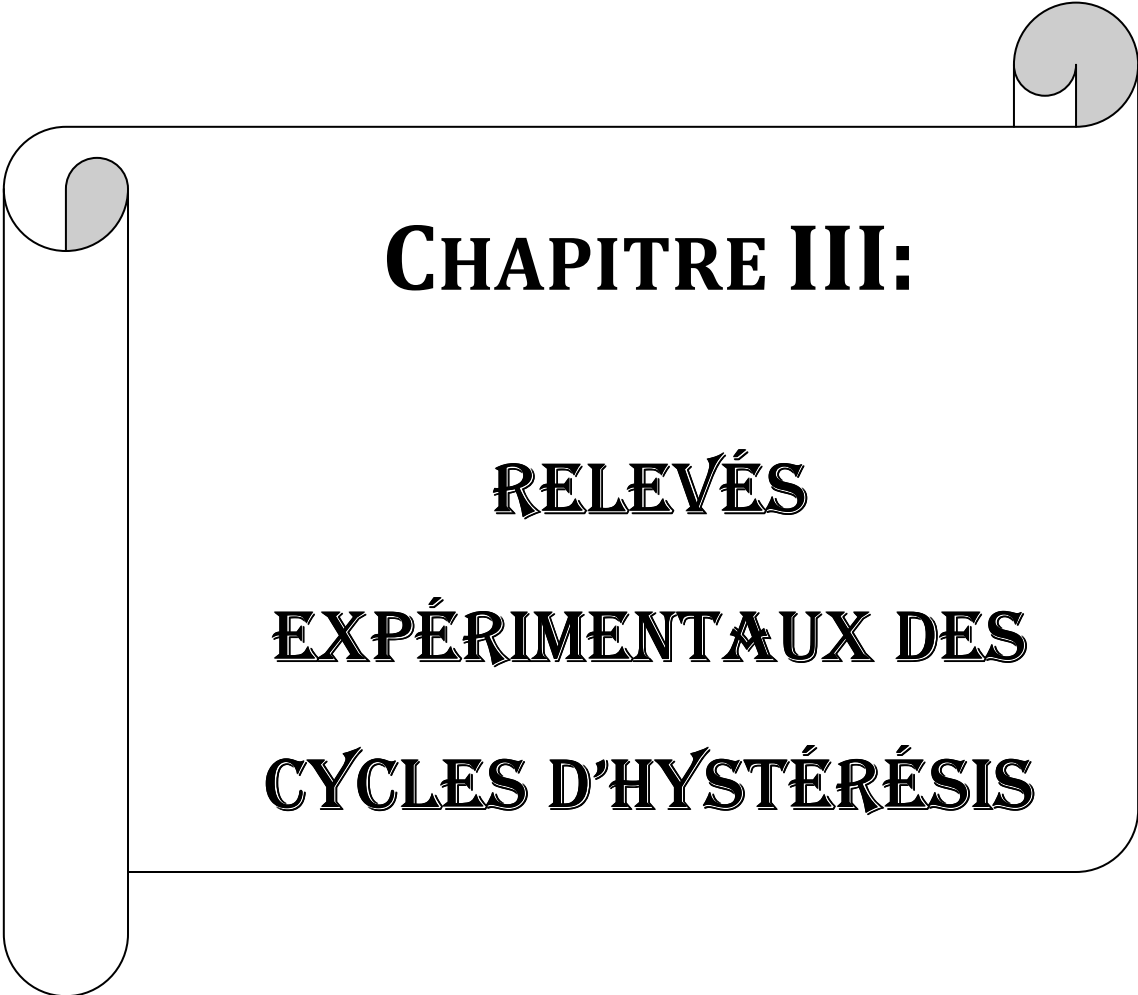


Figure-II.10. Schéma des dispositifs de mesure.

## Conclusion

Dans ce deuxième chapitre on a présenté les différentes méthodes et dispositifs pour mesurer les caractéristiques magnétiques des matériaux ferromagnétiques en 1D et 2D ainsi que les techniques de contrôle de la forme des signaux du champ et de l'induction magnétiques.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top. The scroll is outlined in black and has grey shaded areas where the scroll is unrolled.

**CHAPITRE III:**

**RELEVÉS**

**EXPÉRIMENTAUX DES**

**CYCLES D'HYSTÉRÉSIS**

**Introduction :**

Pour répondre aux besoins des industriels dans les domaines des inductions proches de la saturation, les laboratoires spécialisés s'orientent (dès 1995) vers l'acquisition de données. Une bonne connaissance des grandeurs simultanées  $B(t)$  et  $H(t)$  permet d'accéder ensuite à de nombreuses caractéristiques [6].

Dans ce chapitre on présentera les bancs d'essais expérimentaux réalisés au laboratoire électrotechnique, permettant l'acquisition de données nécessaires pour la caractérisation des tôles magnétiques, et le relevé du cycle d'hystérésis

**III-1 Méthode des deux bobines :**

**III-1-1 Présentation de l'échantillon étudié :**

L'échantillon étudié comporte deux bobines de  $N$  spire

$N_1$  : nombre de spire de la première bobine tel que  $N_1=600$

$N_2$  : nombre de spire de la deuxième bobine tel que  $N_2=900$

**III-1-2 Caractéristique des deux bobines :**

Nombre de spire $N_1$	Nombre de spire $N_2$	$S$ (m <sup>2</sup> )	$L$ (m)
600	900	0.00087	0.35

**Tableau III-01 : caractéristique des deux bobines**

**III-1-3 Montage expérimentale :**



**Figure III-1 : schéma de montage pour le relevé du cycle d'hystérésis**

Le schéma comprend :

- Une source de tension alternative variable
- Oscilloscope
- Résistance  $R_1=5 \Omega$
- 1 voltmètre et 1 ampèremètre
- Deux bobine ( $N_1=600$  spires et  $N_2=900$  spires)
- Un circuit intégrateur formé par Resistance  $R_2=30 \text{ k} \Omega$ , Capacité  $C=2 \mu\text{F}$

### III-1-4 Relevé du cycle d'hystérésis :

#### III-1-4-1 mode opératoire :

On fait varier la tension E pour avoir l'induction magnétique maximale désirée

- La voie CH1 de l'oscilloscope représente les valeurs de la tension crêtes du champ magnétique
- la voie CH2 de l'oscilloscope représente les valeurs de la tension crêtes de l'induction magnétique

Pour calculer les grandeurs H(t) et B(t), on utilise l'Excel et MATLAB, on introduisant les formules suivantes :

- Pour le champ magnétique H(t) :

$$H(t) = \frac{N_1}{L R_1} V_H(t) \dots \dots \dots (III.01)$$

Ou :

$N_1$  : Le nombre de spire de l'enroulement primaire

L : Longueur en [m]

$R_1$  : Résistance de  $5[\Omega]$

$V_{Hcc}$  : La valeur crête de la tension du champ magnétique mesuré

- Pour l'induction magnétique B(t) :

$$B(t) = \frac{C R_2}{N_2 S} V_B(t) \dots \dots \dots (III.02)$$

$C$  : La capacité en  $\mu F$

$R_2$  : La résistance de 30 [k  $\Omega$ ]

$N_2$  : Nombre de spire de l'enroulement secondaire

$S$  : La section du matériau en [m<sup>2</sup>]

$V_B(t)$  : La valeur crêtes de la tension de l'induction magnétique

### III-I-5 Résultats expérimentaux :

Les résultats de calcul pour les différentes valeurs de l'induction maximale sont représentés dans les figures suivantes :

#### III-1-5-1 Images des cycles :

Les images des cycles obtenus de l'oscilloscope sont représentées dans les figures suivantes :

#### Cycle 01 :

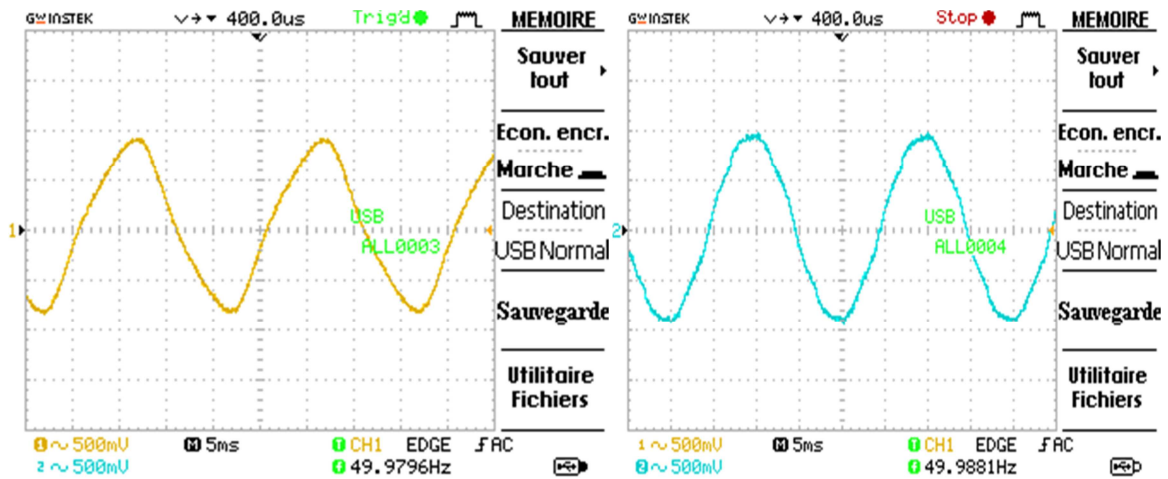


Figure III-2 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 01

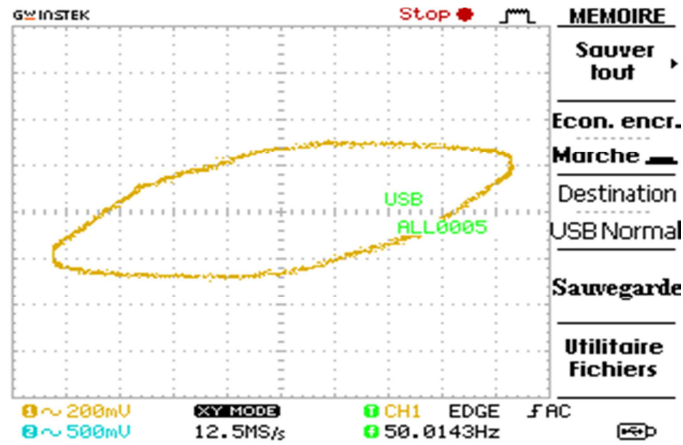


Figure III-3 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 01

Cycle 02 :

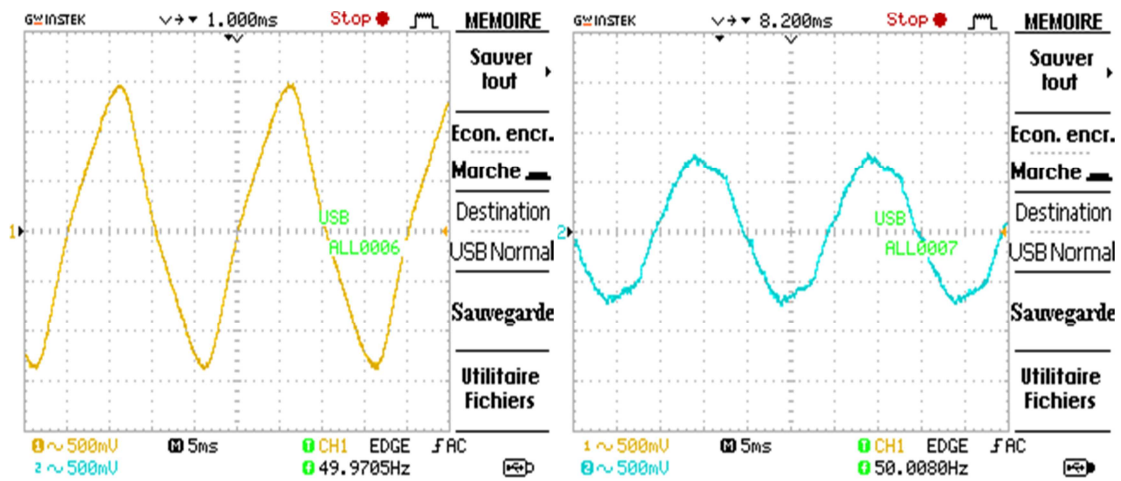


Figure III-4 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 02

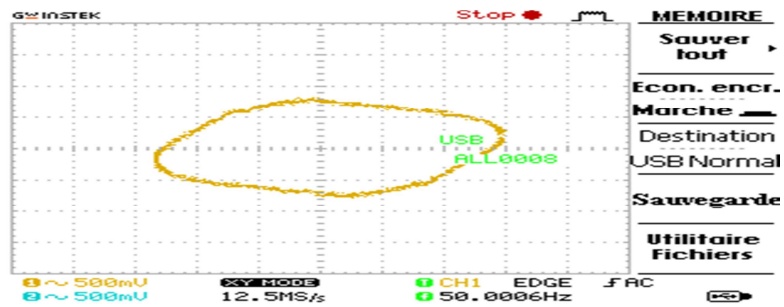


Figure III-5 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 02

Cycle 03 :

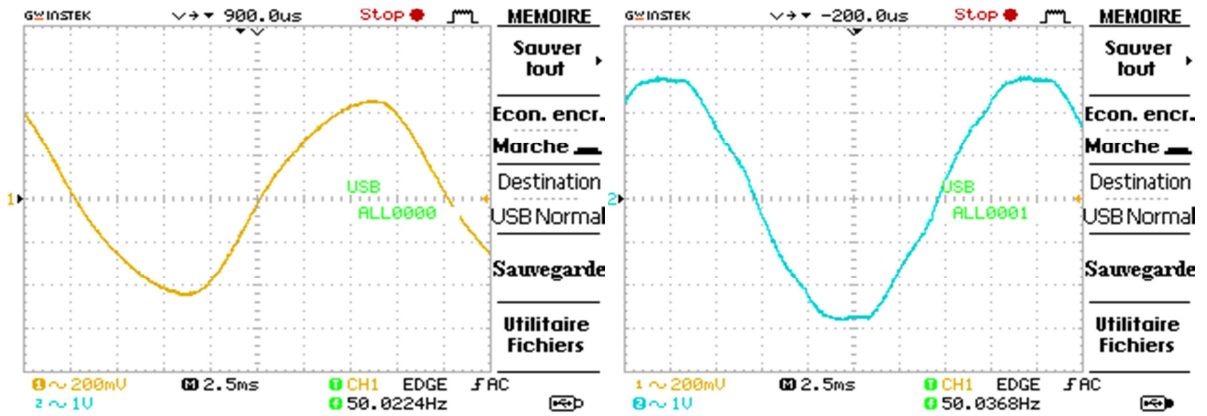


Figure III-6 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 03

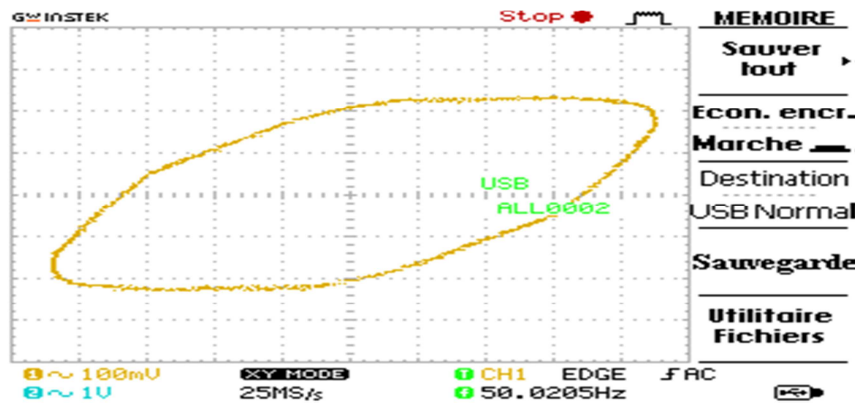


Figure III-7 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 03

Cycle 04 :

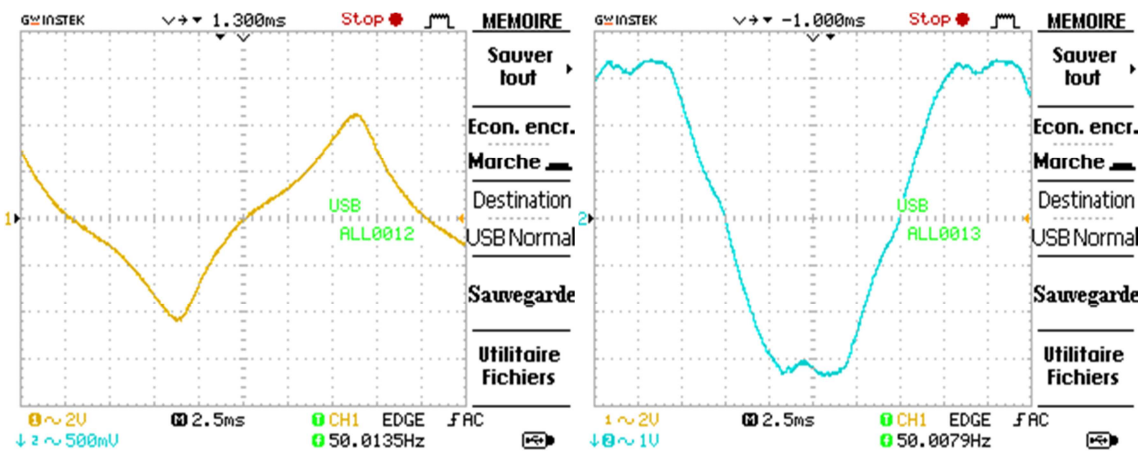


Figure III-8 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 04

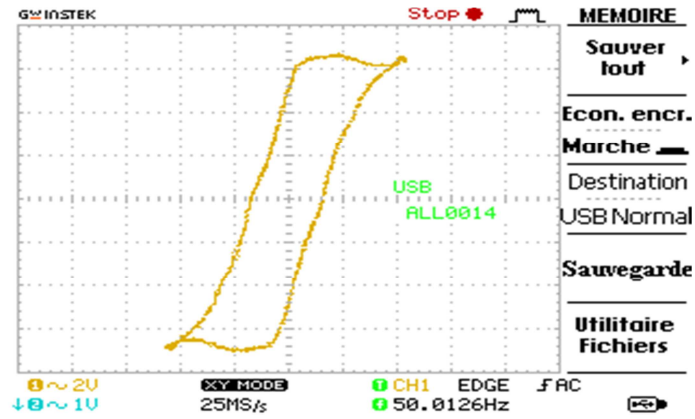


Figure III-9 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 04

Cycle 05 :

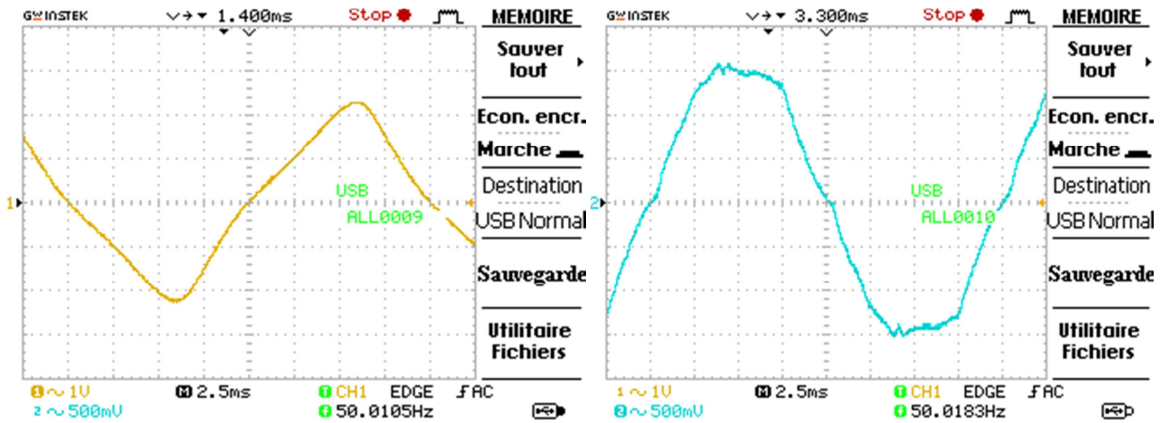


Figure III-10: l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 04

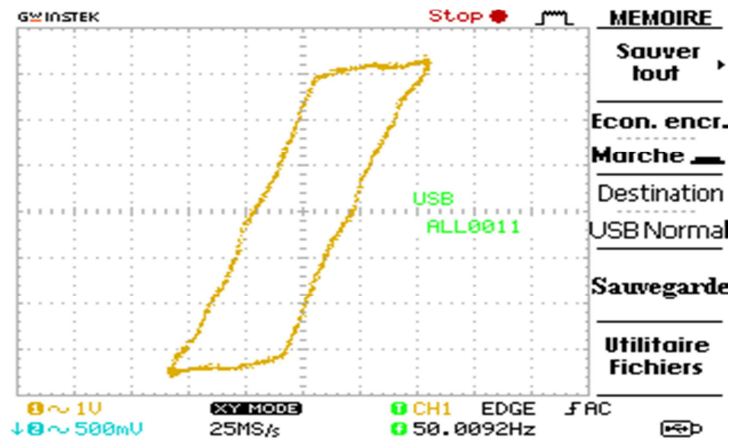


Figure III-11 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 05

### III-1-5-2 Allures et cycle d'hystérésis :

Les allures des champs H et d'inductions B, ainsi que leur cycle d'hystérésis, pour les différentes valeurs de  $B_{max}$  sont représentées dans les figures suivantes :

Pour  $B_{max}=0.44$  T :

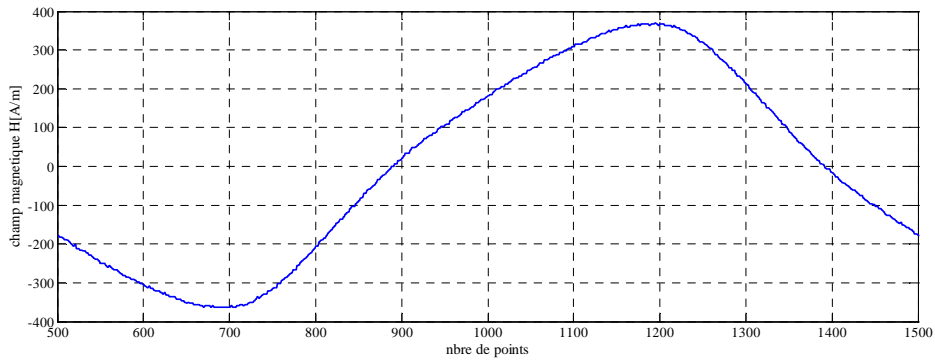


Figure III-12 : Allure du champ magnétique H (t)

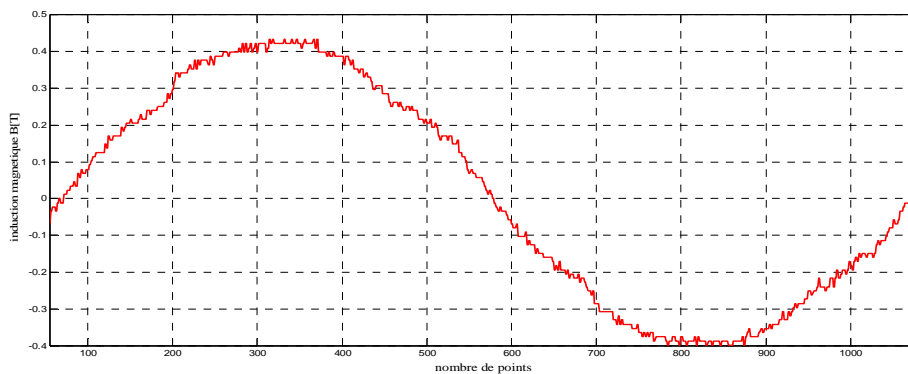


Figure III-13 : Allure de l'induction magnétique B(t)

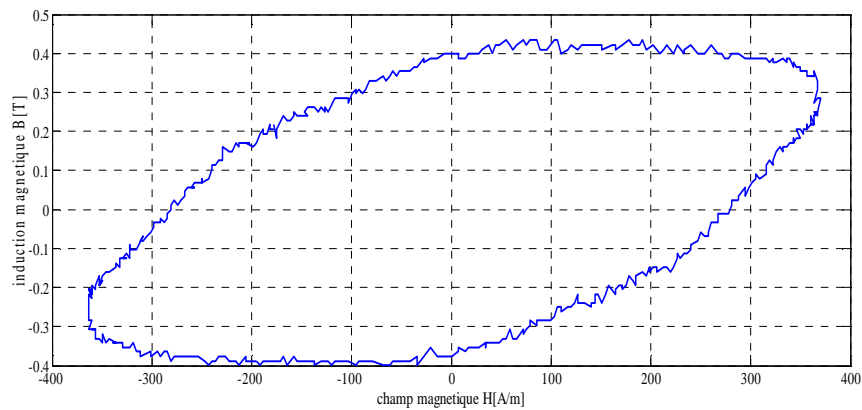


Figure III-14 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.44$  T

Pour  $B_{max}=0.62$  :

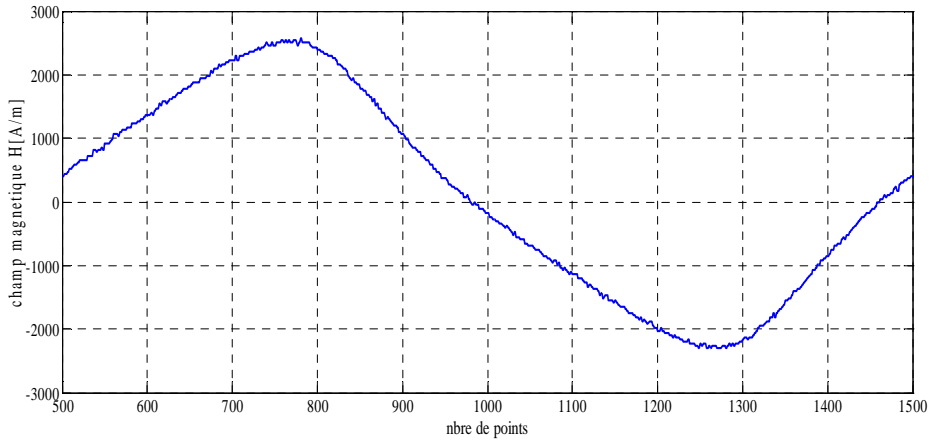


Figure III-15 : Allure du champ magnétique H (t)

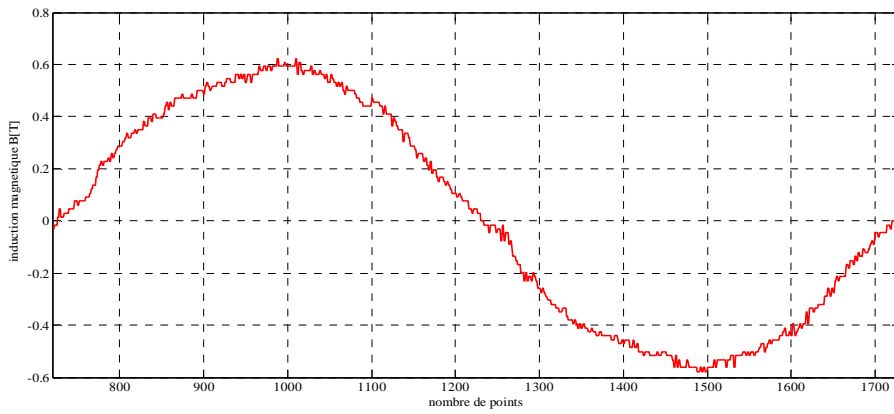


Figure III-16 : Allure de l'induction magnétique B(t)

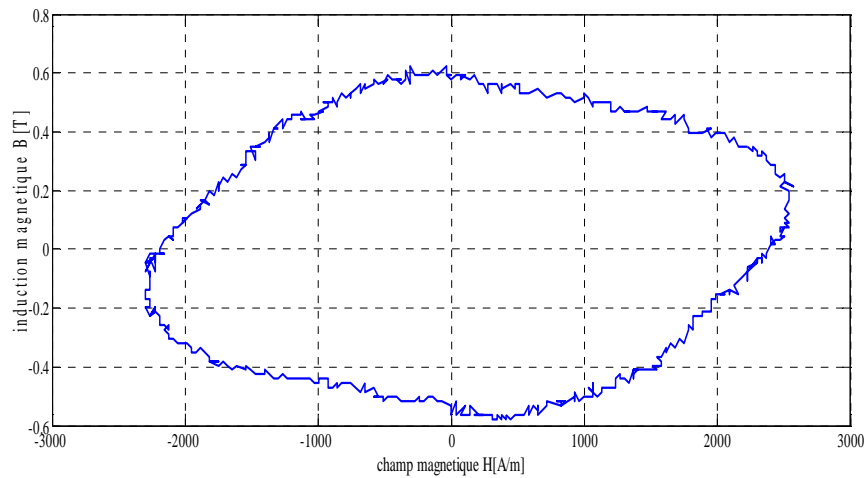


Figure III-17: cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.62$  T

Pour  $B_{max}=0.89$  :

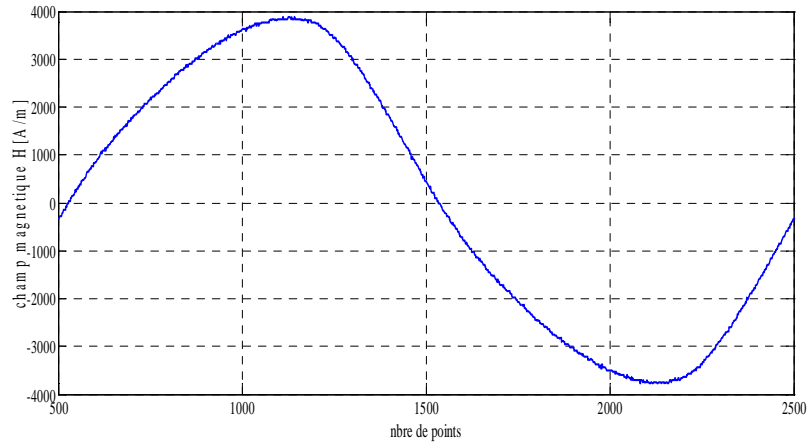


Figure III-18 : Allure du champ magnétique H (t)

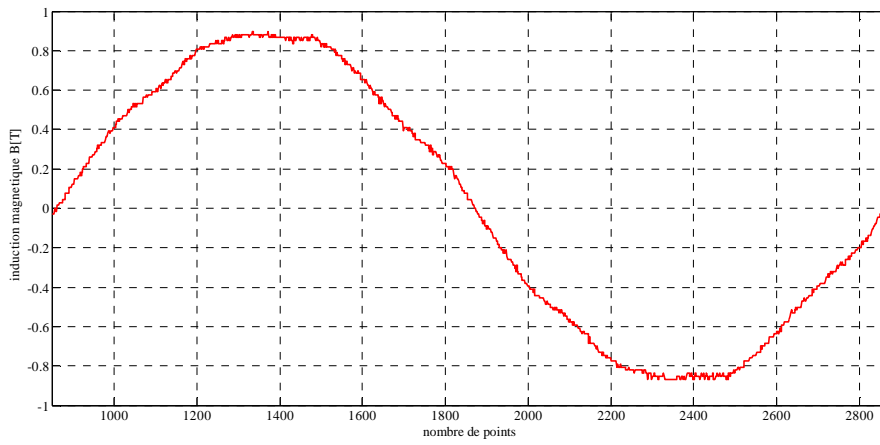


Figure III-19 : Allure de l'induction magnétique B(t)

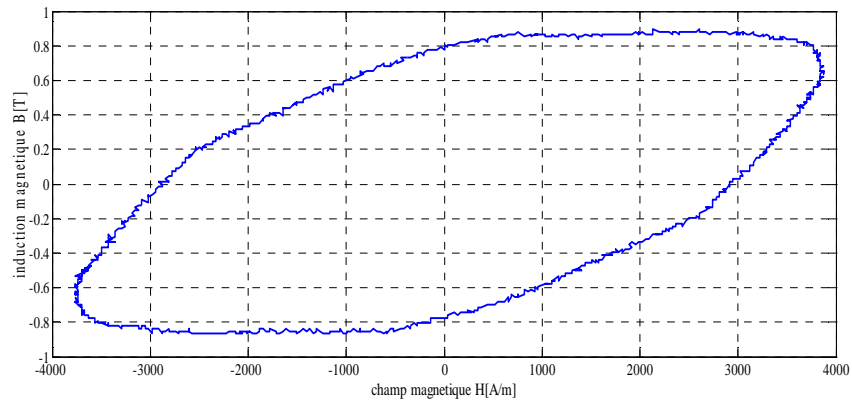


Figure III-20 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.89$  T

Pour  $B_{max}=1.27$  T:

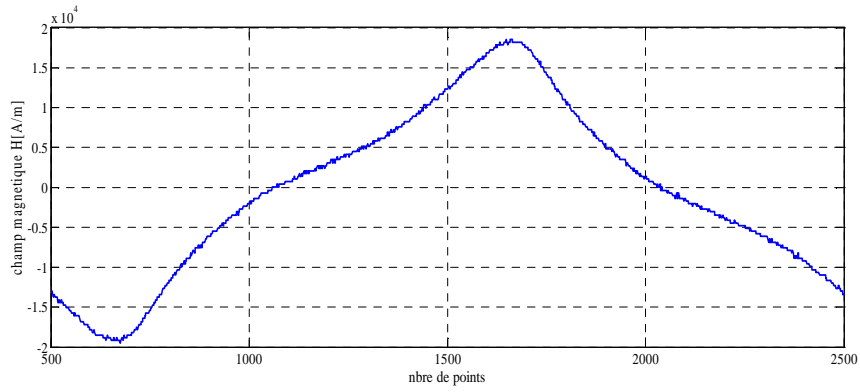


Figure III-21 : Allure du champ magnétique H (t)

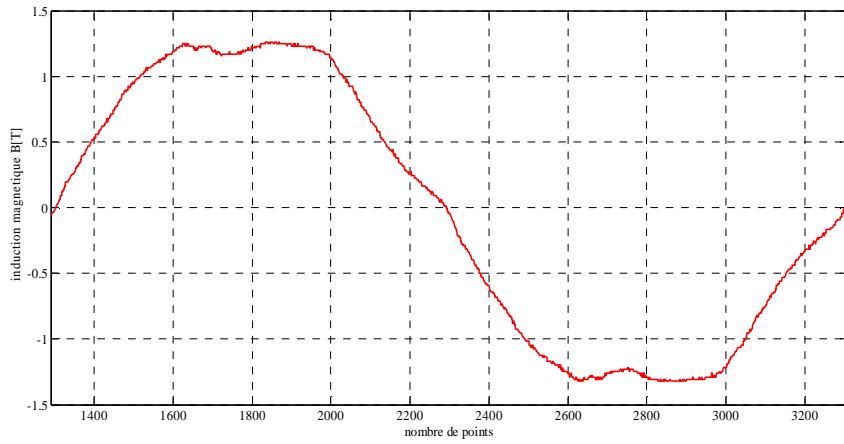


Figure III-22: Allure de l'induction magnétique B(t)

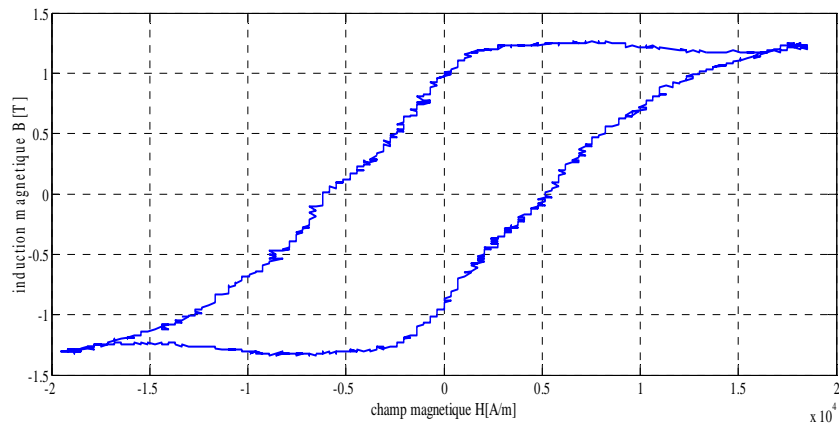


Figure III-23 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=1.27$

Pour  $B_{max}=1.3\text{ T}$  :

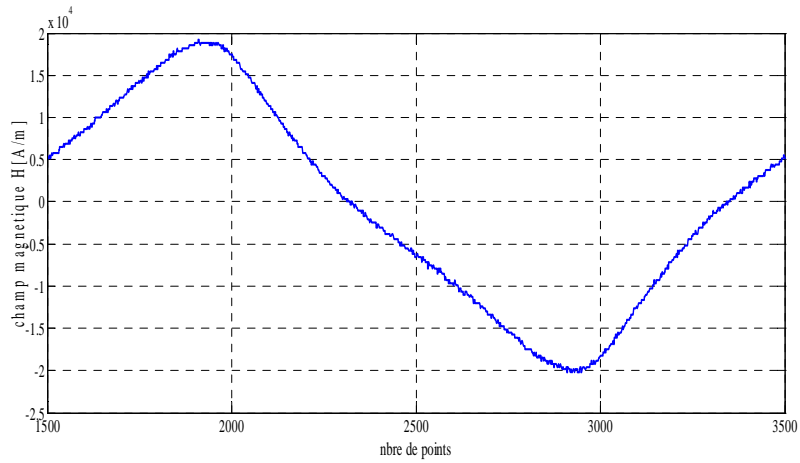


Figure III-24 : Allure du champ magnétique H (t)

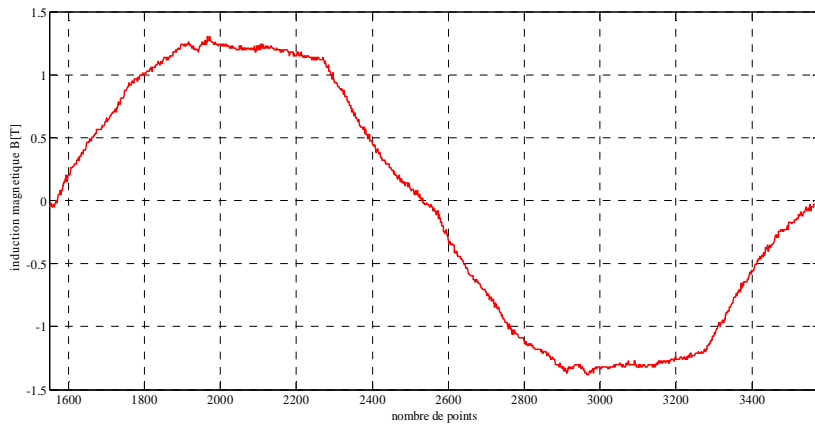


Figure III-25 : Allure de l'induction magnétique B(t)

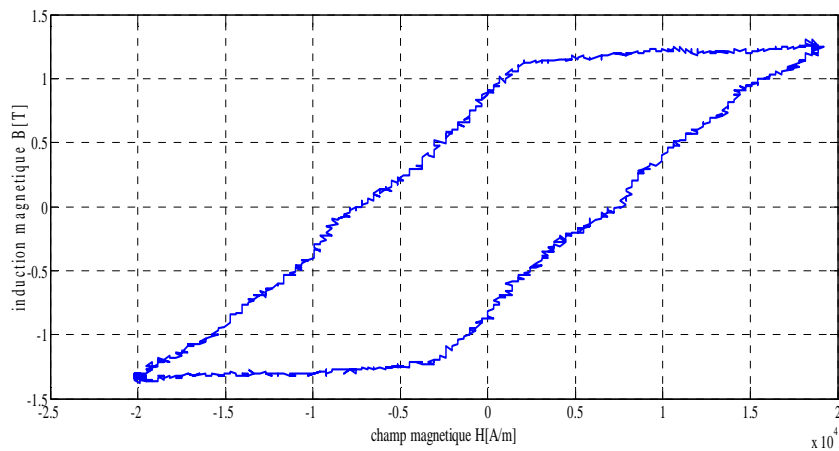


Figure III-26 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=1.3\text{ T}$

### III-2 Le tore

#### III-2-1 Présentation de l'échantillon étudié :

Le matériau étudié est un échantillon en acier ordinaire ayant la forme d'un tore, de section rectangulaire (figure III-1)

Ce tore porte deux enroulements :

- Un enroulement de magnétisation de  $N_1$  spires (constitue le primaire)
- Un enroulement de mesure d'induction de  $N_2$  spires (constituant le secondaire)

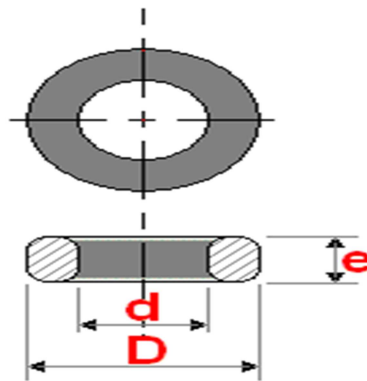


Figure III-27: Dimension du tore

#### III-2-2 caractéristique du tore

Les caractéristiques du tore sont résumées dans le tableau III.1

Nombre de spire $N_1$	Nombre de spire $N_2$	$S$ (m <sup>2</sup> )	$L_{moy}$ (m)	$D$ (m)	$d$ (m)	$e$ (m)
325	300	$16 \cdot 10^{-5}$	$37.07 \cdot 10^{-2}$	$12.6 \cdot 10^{-2}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

Tableau III-1 : Caractéristique du tore

$N_1$  : Nombre de spires de l'enroulement primaire

$N_2$  : Nombre de spires de l'enroulement secondaire

$S$  : section droite du tore

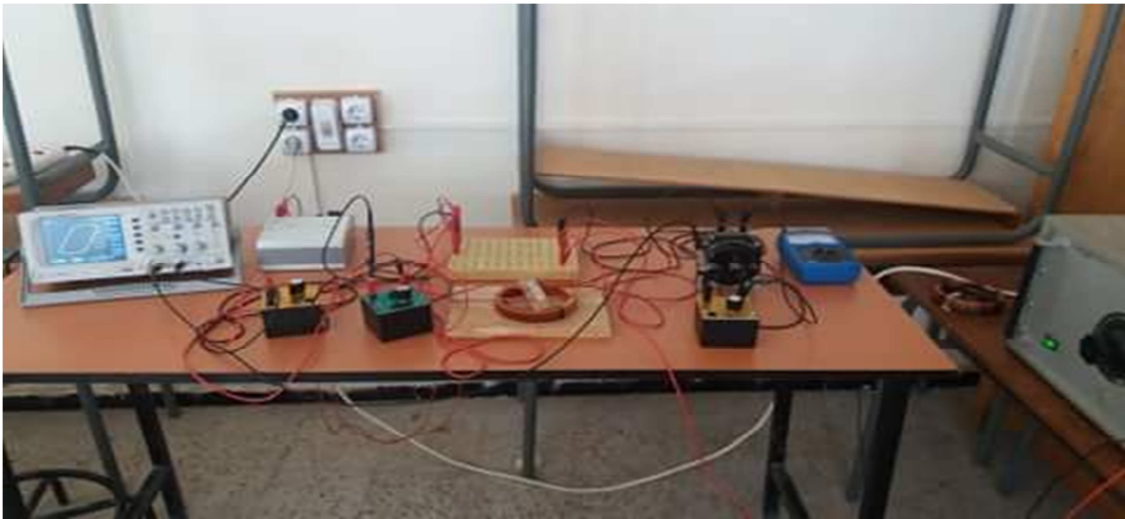
$d$  : Diamètre intérieur du tore

$D$  : Diamètre extérieur du tore

$e$  : hauteur du tore

$L_{moy}$  : Longueur moyenne du tore

### III-2-3 Montage expérimentale :



Le montage comprend :

- Une source de tension alternative variable  $E$
- Un ampèremètre (A)
- Un Voltmètre
- Un oscilloscope
- Un circuit intégrateur formé par Résistance  $R_2=30\text{ k}\Omega$ , Capacité  $C=2\text{ }\mu\text{F}$
- Résistance  $R_1=5\text{ }\Omega$
- Un tore
- Un transformateur

### III-2-4 Relevé Du cycle d'hystérésis :

#### III-2-4-1 mode opératoire :

On utilise le même principe qu'on a utilisé pour les deux bobines, sauf dans ce derniers cas on introduit un transformateur. Puis on fait varier la tension E pour avoir l'induction magnétique maximale désirée

- La voie CH1 de l'oscilloscope représente les valeurs de la tension crêtes du champ magnétique
- la voie CH2 de l'oscilloscope représente les valeurs de la tension crêtes de l'induction magnétique

Pour calculer les grandeurs H(t) et B(t), on utilise l'Excel et MATLAB, on introduisant les formules suivantes :

- Pour le champ magnétique H(t) :

$$H(t) = \frac{N_1}{L R_1} V_H(t) \dots \dots \dots (III.01)$$

Ou :

$N_1$  : Le nombre de spire de l'enroulement primaire

$L$  : Longueur en [m]

$R_1$  : Résistance de 5[Ω]

$V_H(t)$  : La valeur crête de la tension du champ magnétique mesuré

- Pour l'induction magnétique B(t) :

$$B(t) = \frac{C R_2}{N_2 S} V_B(t) \dots \dots \dots (III.02)$$

$C$  : La capacité en  $\mu F$

$R_2$  : La résistance de 30 [k Ω]

$N_2$  : Nombre de spire de l'enroulement secondaire

$S$  : La section en [m]

$V_B(t)$  : La valeur crêtes de la tension de l'induction magnétique

### III-1-5 Résultats expérimentaux :

Les résultats de calcul pour les différentes valeurs de l'induction maximale sont représentés dans les figures suivantes :

#### III-1-5-1 Les images des cycles :

Les images des cycles obtenus de l'oscilloscope sont représentées dans les figures suivantes :

##### Cycle 01 :

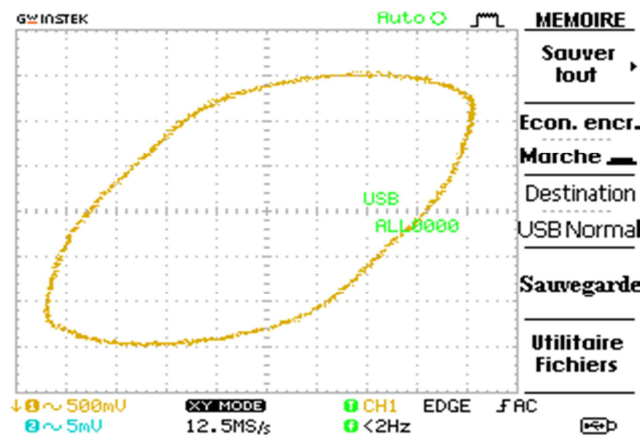


Figure III-29 : Image du cycle d'hystérésis pour le cycle 01

##### Cycle 02 :

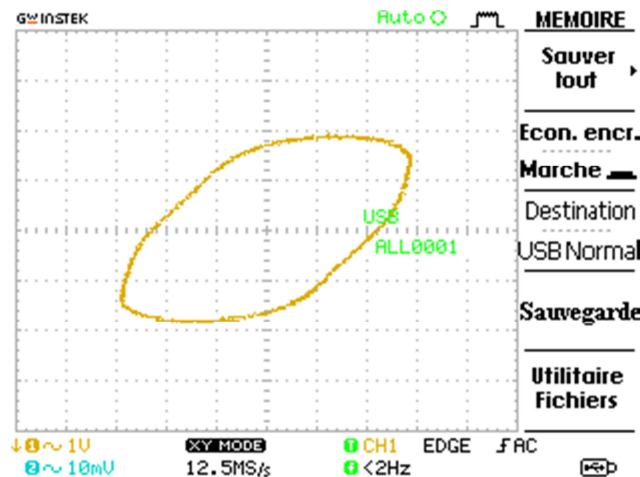


Figure III-30 : Image du cycle d'hystérésis pour le cycle 02

##### Cycle 03 :

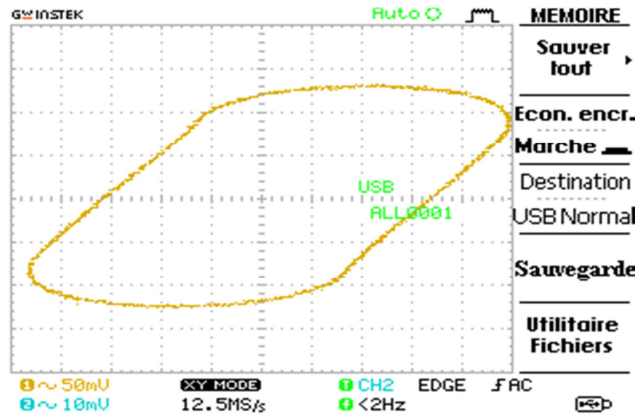


Figure III-30 : Image du cycle d'hystérésis pour le cycle 03

Cycle 04 :

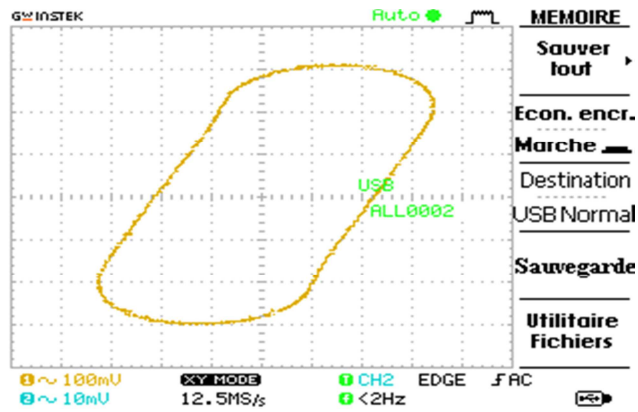


Figure III-31 : Image du cycle d'hystérésis pour le cycle 04

Cycle 05 :

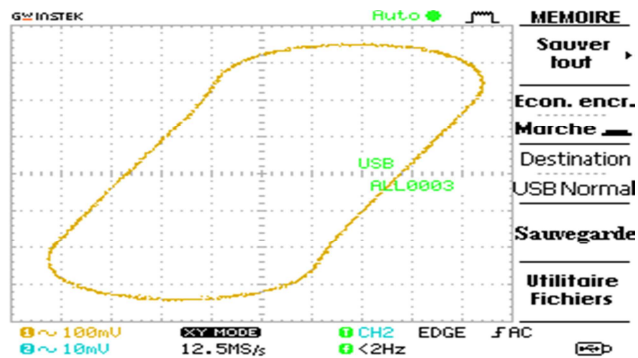


Figure III-32 : Image du cycle d'hystérésis pour le cycle 05

### III-1-5-2 Allures et cycle d'hystérésis

Les allures des champs H et d'inductions B, ainsi que leurs cycles d'hystérésis, pour les différentes valeurs de  $B_{max}$  sont représentées sur les figures suivantes :

Pour  $B_{max}=0.48$  T

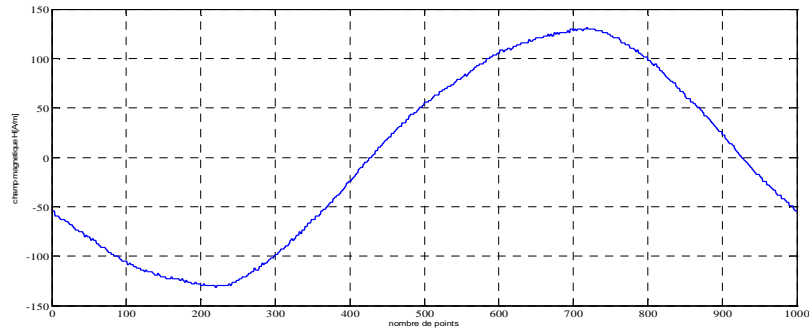


Figure III-32 : Allure du champ magnétique H (t)

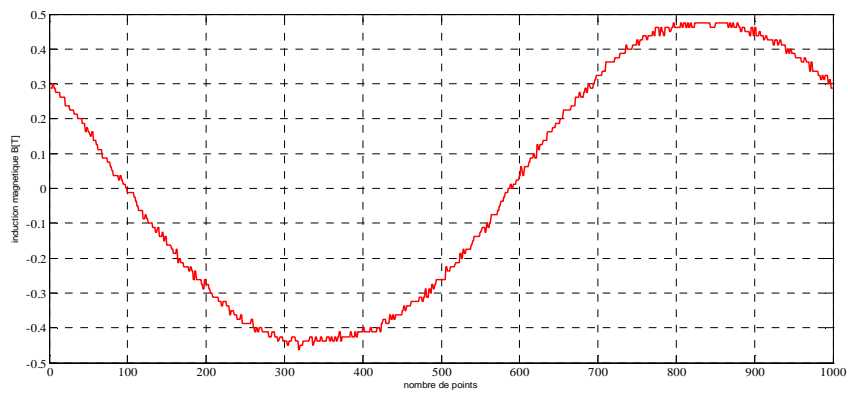


Figure III-33 : Allure de l'induction magnétique B(t)

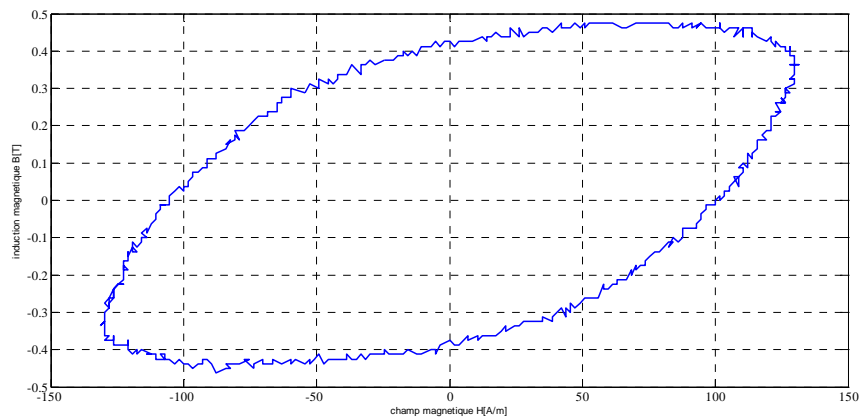


Figure III-34 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.48$  T

Pour  $B_{max}=0.63\text{ T}$  :

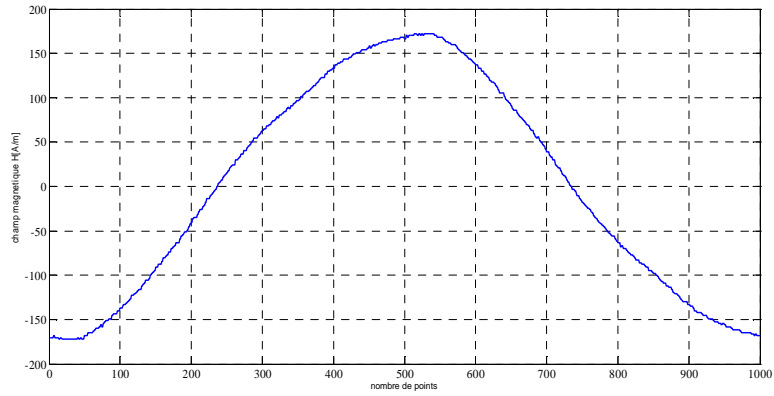


Figure III-35 : Allure du champ magnétique H (t)

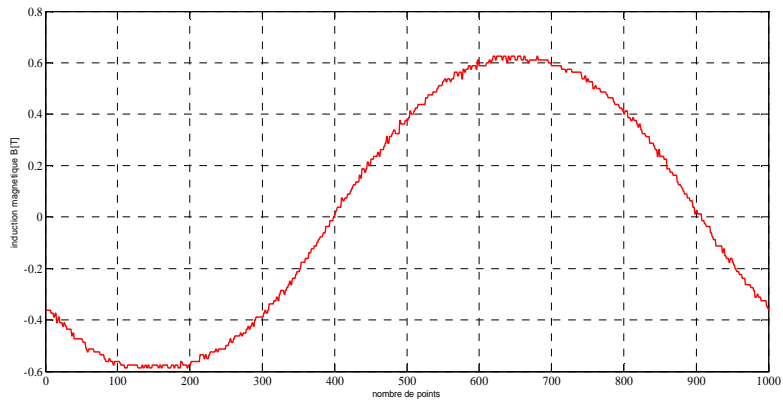


Figure III-36 : Allure de l'induction magnétique B(t)

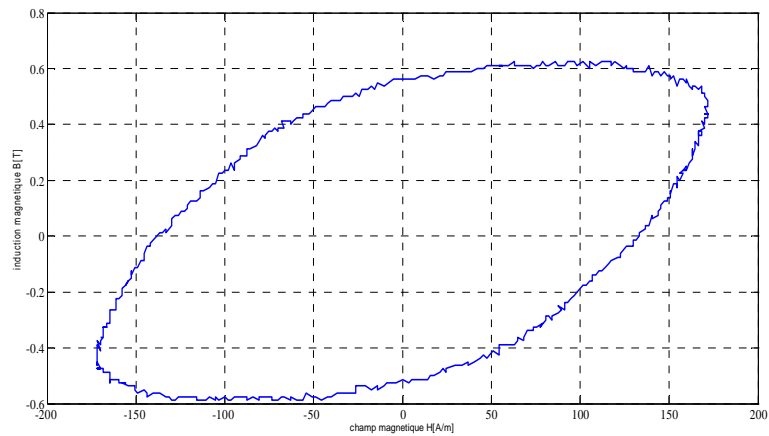


Figure III-37 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.63\text{T}$

Pour  $B_{max}=0.82\text{ T}$  :

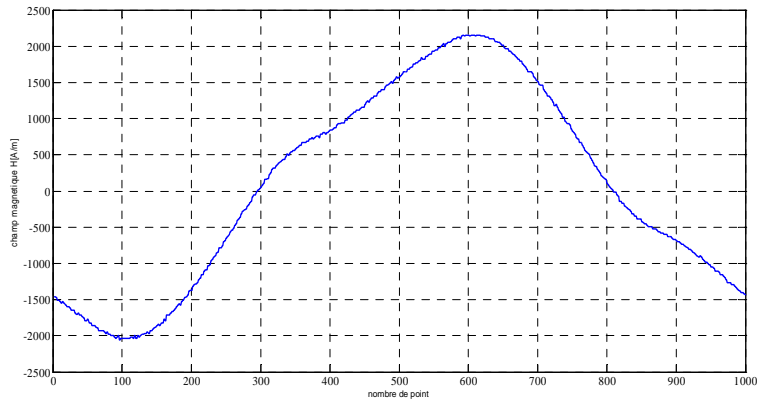


Figure III-38 : Allure du champ magnétique H (t)

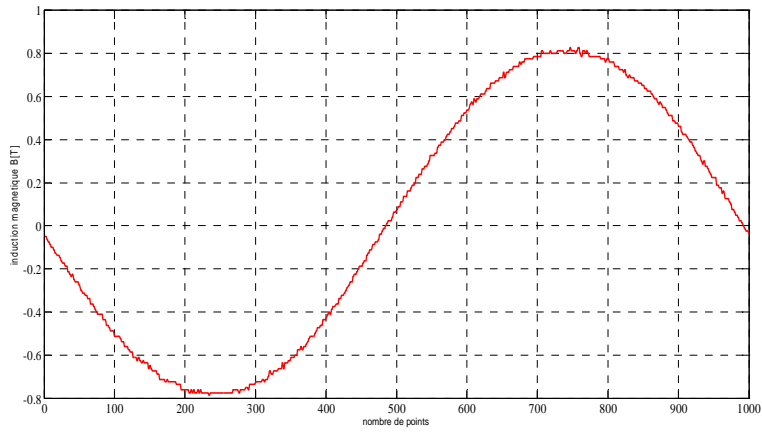


Figure III-39 : Allure de l'induction magnétique B(t)

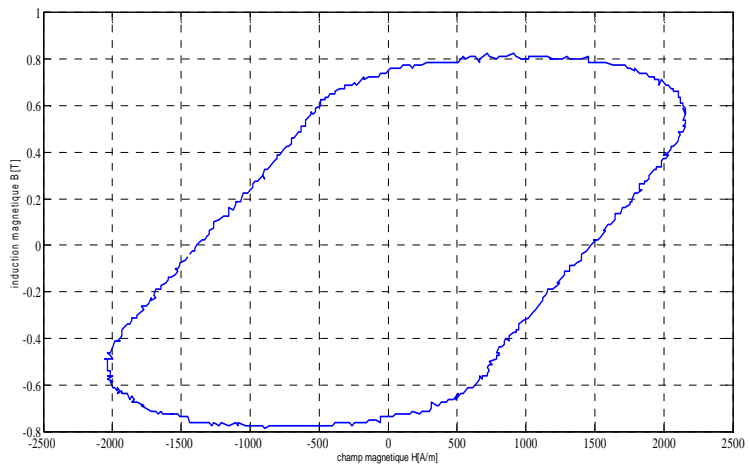


Figure III-40 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.82\text{ T}$

Pour  $B_{max}=0.9\text{ T}$  :

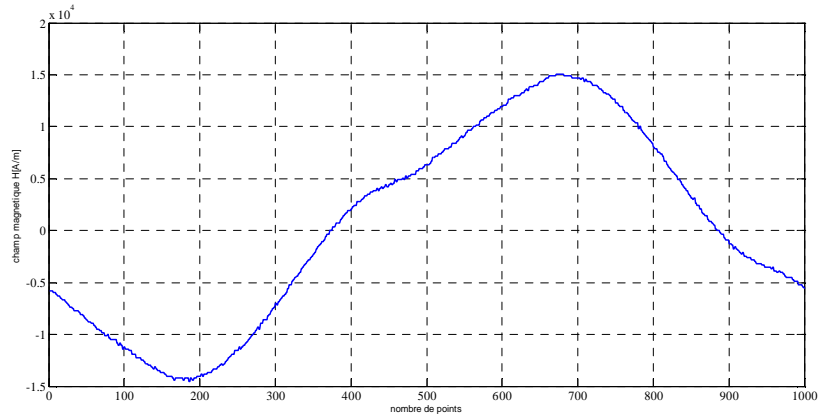


Figure III-41 : Allure du champ magnétique H (t)

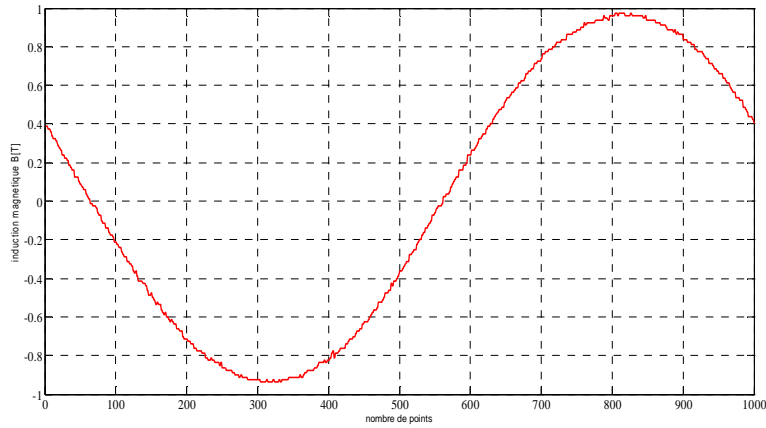


Figure III-42 : Allure de l'induction magnétique B(t)

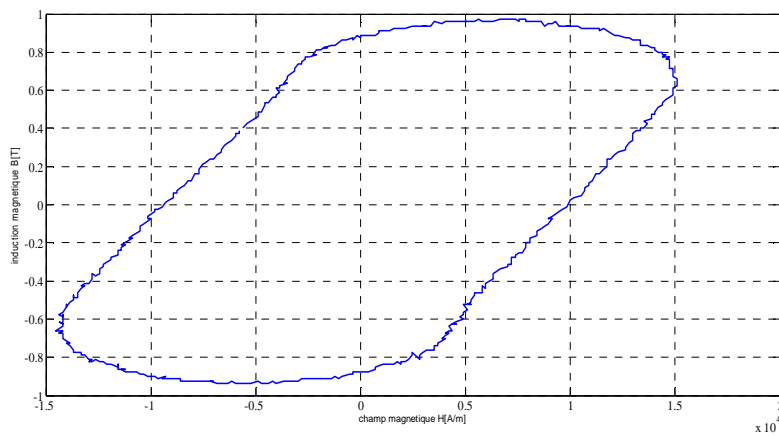


Figure III-43 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.9\text{ T}$

Pour  $B_{max}=1.1\text{ T}$  :

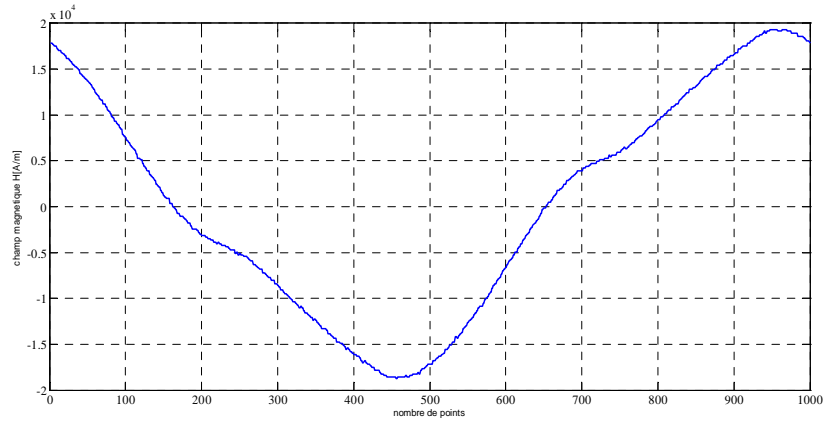


Figure III-44 : Allure du champ magnétique H (t)

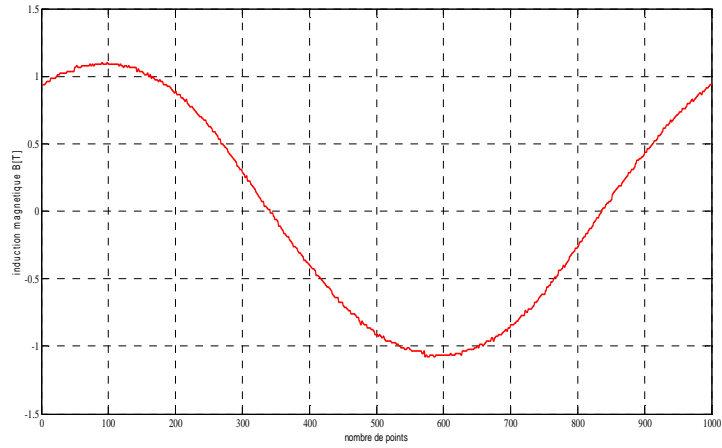


Figure III-45 : Allure de l'induction magnétique

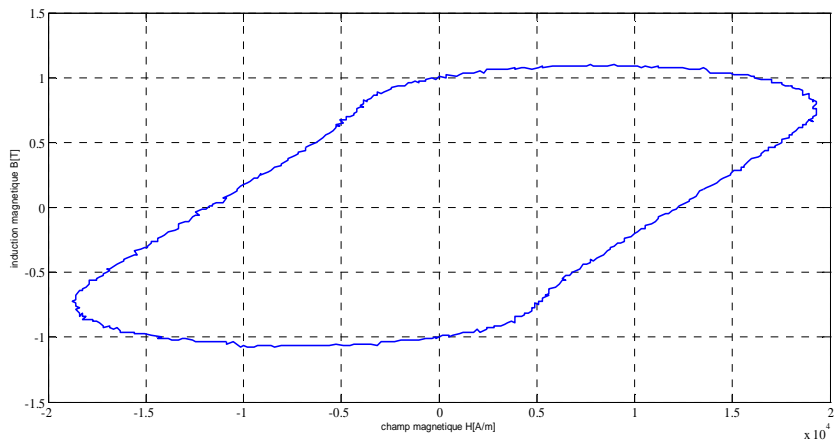


Figure III-46 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=1.1\text{ T}$

**III-3 cadre d'Epstein :**

**III-3-1 Présentation de l'échantillon :**

L'échantillon étudié se présente sous la forme d'un cadre carré constitué de plusieurs tôles de fer silicium d'épaisseur 0.3 mm isolée entre elles.

Les caractéristiques du cadre sont consignées dans le tableau suivant :

Nombre de N1	Nombre de N2	S (m <sup>2</sup> )	$L_{ex}$ (cm)	$L_{int}$ (cm)	e (mm)	$L_{moy}$ (m)
300	450	$1.0725 \cdot 10^{-4}$	$126 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$	0.3	0.94

**Tableau III-02: caractéristique du cadre d'Epstein**

N1 : nombre de spires de l'enroulement primaire

N2 : nombre de spires de l'enroulement secondaire

S : section des tôles

$L_{int}$  : Longueur intérieure

$L_{ex}$  : Longueur extérieure

e : Épaisseur d'une tôle

$L_{moy}$  : Longueur moyenne du cadre

**III-3-2 Montage expérimentale :**



**Figure III-47 : schéma de montage pour le relevé du cycle d'hystérésis**

Le montage comprend :

Une source de tension alternative variable

- Oscilloscope
- Résistance  $R_1=5 \Omega$
- Un circuit intégrateur formé par Resistance  $R_2=30 \text{ k} \Omega$ , Capacité  $C=2 \mu\text{F}$
- 1 voltmètre et 1 ampèremètre
- Cadre d'Epstein

**III-3-3 Relevé du cycle d'hystérésis :**

**III-3-3-1 Mode opératoire :**

Après avoir réalisé le montage on a fait augmenter les valeurs d'excitation pour avoir l'induction magnétique désirée (entre 0.13 T à 0.66 T).

- Le signal de la tension  $V_H$ , prélevé aux bornes de la résistance  $R_1$  est injecté à la voie CH1 de l'oscilloscope.
- Le signal de la tension  $V_b$ , prélevé a la sortie de l'enroulement  $N_2$  est injecté a la voie CHII de l'oscilloscope.

Pour calculer les grandeurs  $H(t)$  et  $B(t)$ , a l'aide de logiciel MATLAB et Excel, on a utilisé les formules suivantes :

- Pour le champ magnétique  $H(t)$  :

$$H(t) = \frac{N_1}{L_{moy} R_1} V_H(t) \dots\dots\dots(III.03)$$

Ou :

$N_1$  : Le nombre de spire de l'enroulement primaire

$L_{moy}$  : Longueur moyenne du cadre

$R_1$  : Résistance de  $5 \Omega$

$V_H(t)$  : La valeur crête de la tension du champ magnétique mesuré

- Pour l'induction magnétique  $B(t)$  :

$$B(t) = \frac{CR_2}{N_2S} V_B(t) \dots \dots \dots (III.04)$$

C : La capacité en  $\mu F$

$R_2$  : La résistance de 30 k $\Omega$

$N_2$  : Nombre de spire de l'enroulement secondaire

S : La section du cadre

$V_B(t)$  : La valeur crêtes de la tension de l'induction magnétique

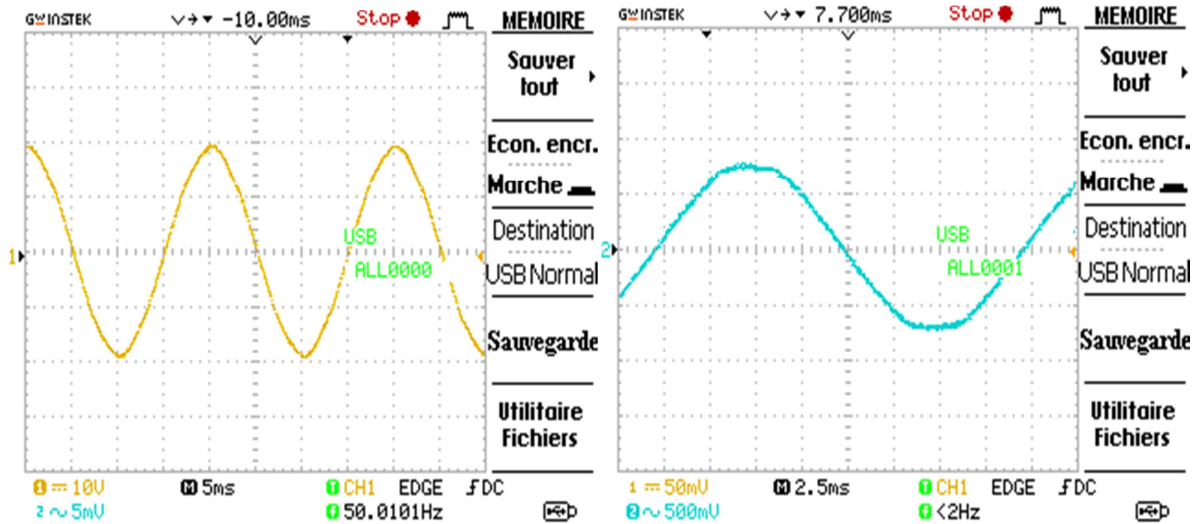
**III-3-4- Résultats expérimentaux :**

Les résultats de calcul pour les différentes valeurs de l'induction maximale B et de H sont représentés dans les figures suivantes :

**III-3-4-1 Les images des cycles :**

Les images des cycles obtenus de l'oscilloscope sont représentées dans les figures suivantes :

**Cycle 01 :**



**Figure III-48 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 01**

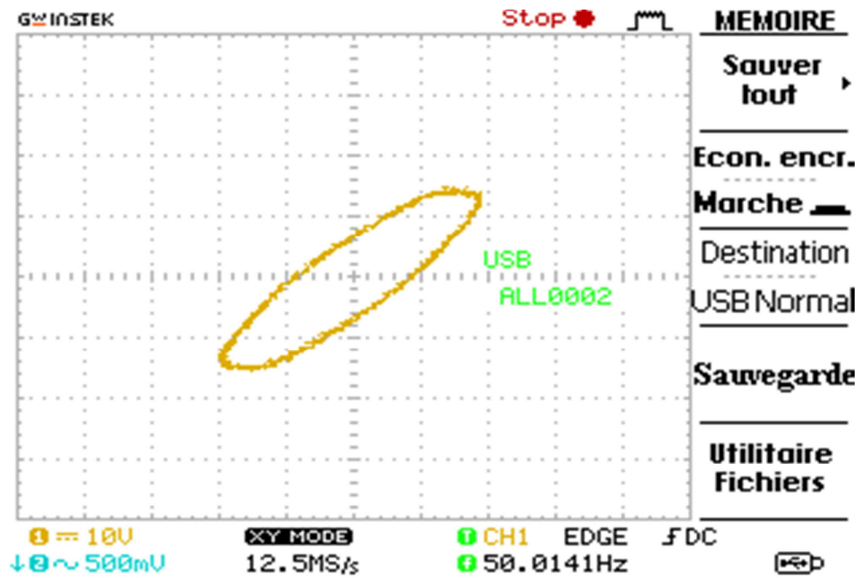


Figure III-49 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 01

Cycle 02 :

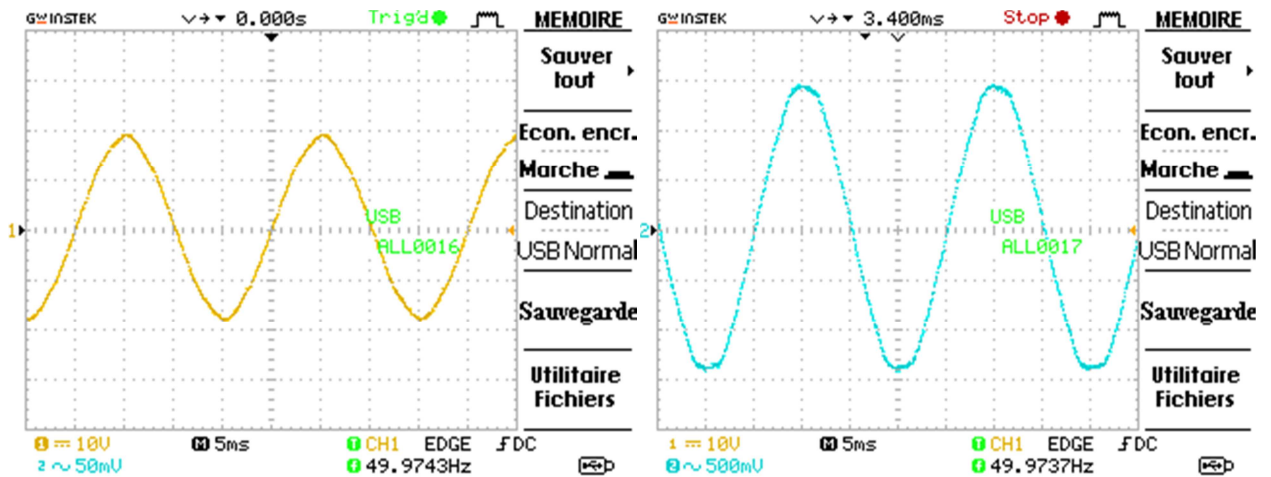


Figure III-50 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 02

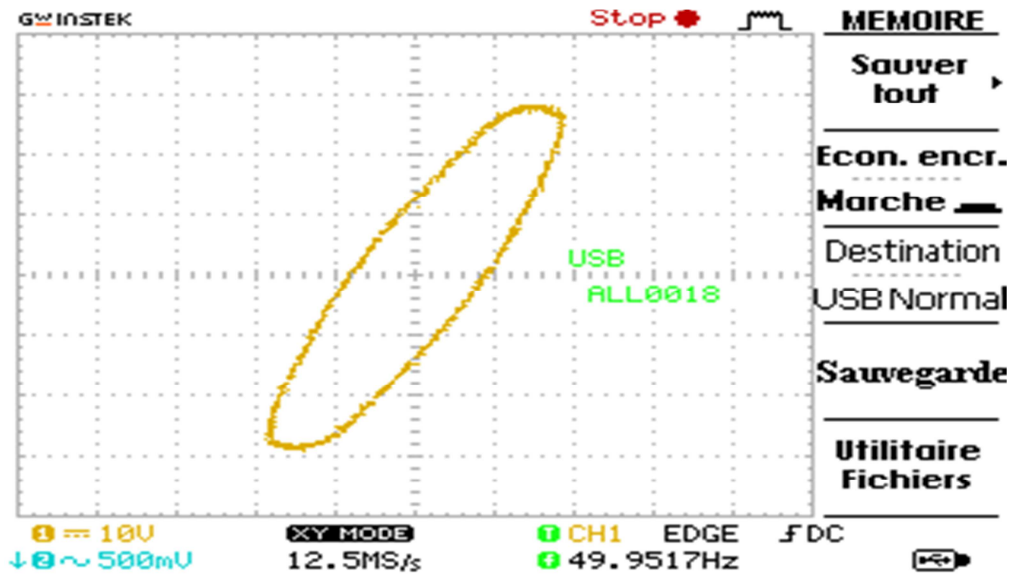


Figure III-51 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 02

Cycle 03 :

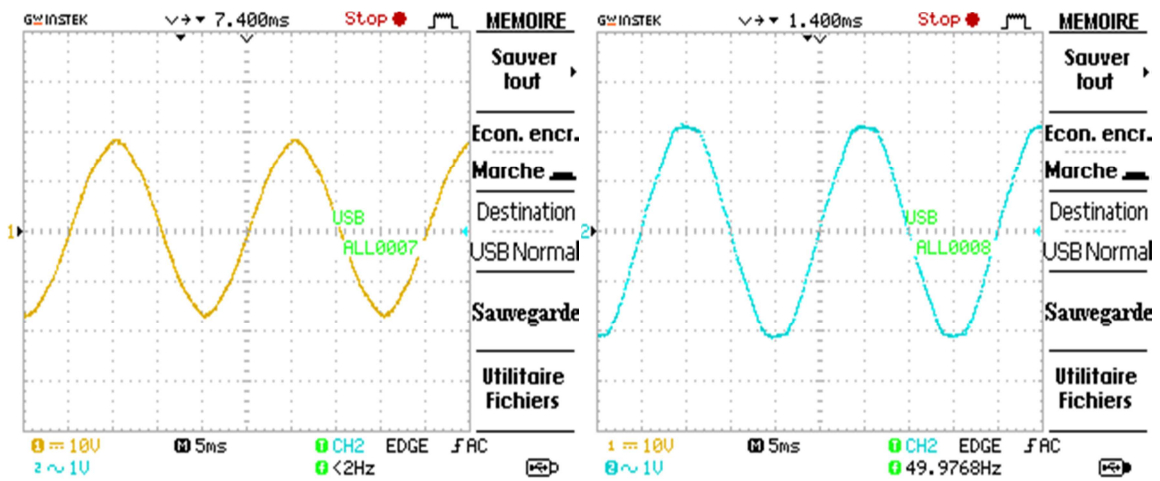


Figure III-52 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 03

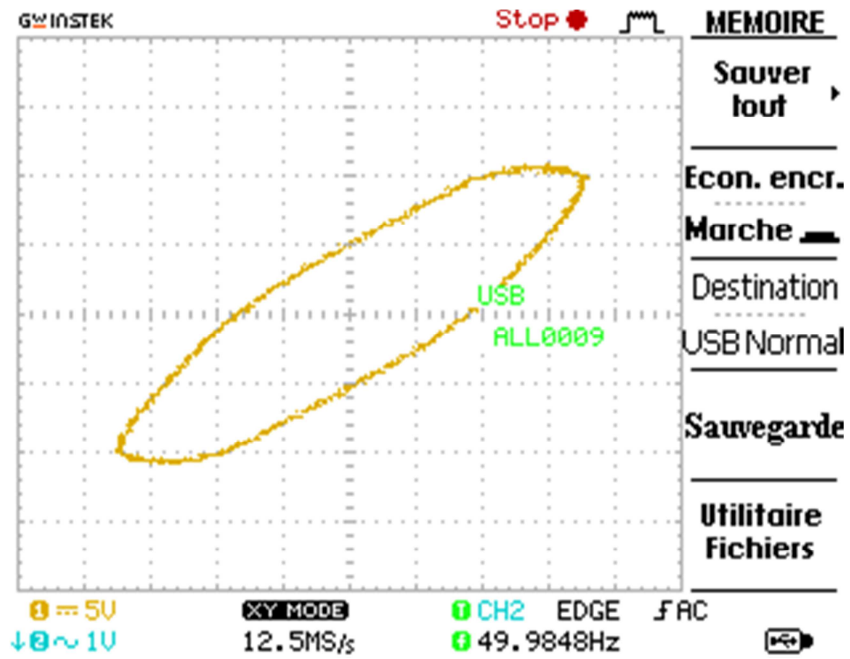


Figure III-53 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 03

Cycle 04 :

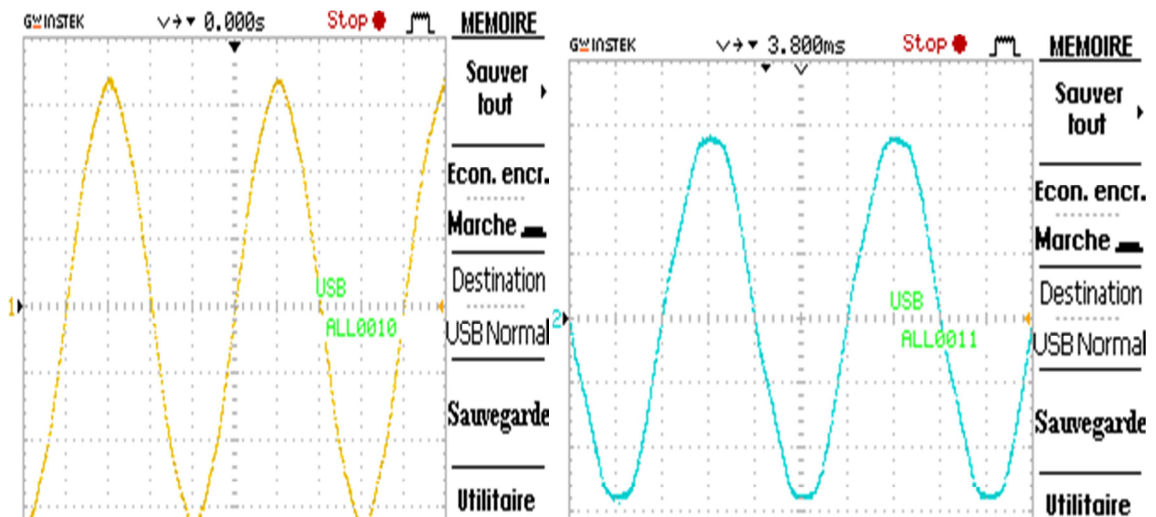


Figure III-54 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 04

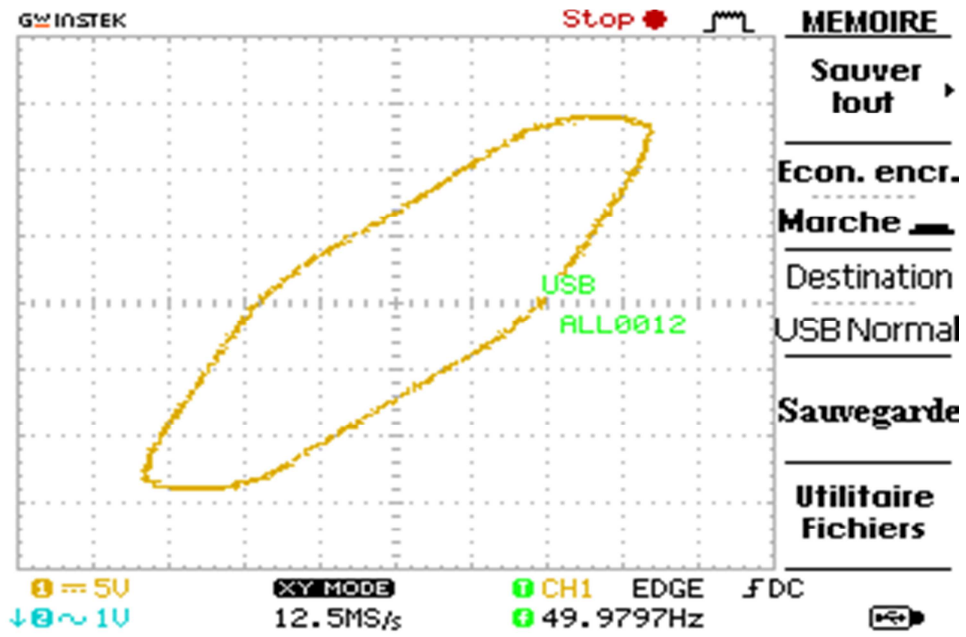


Figure III-55 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 04

Cycle 05 :

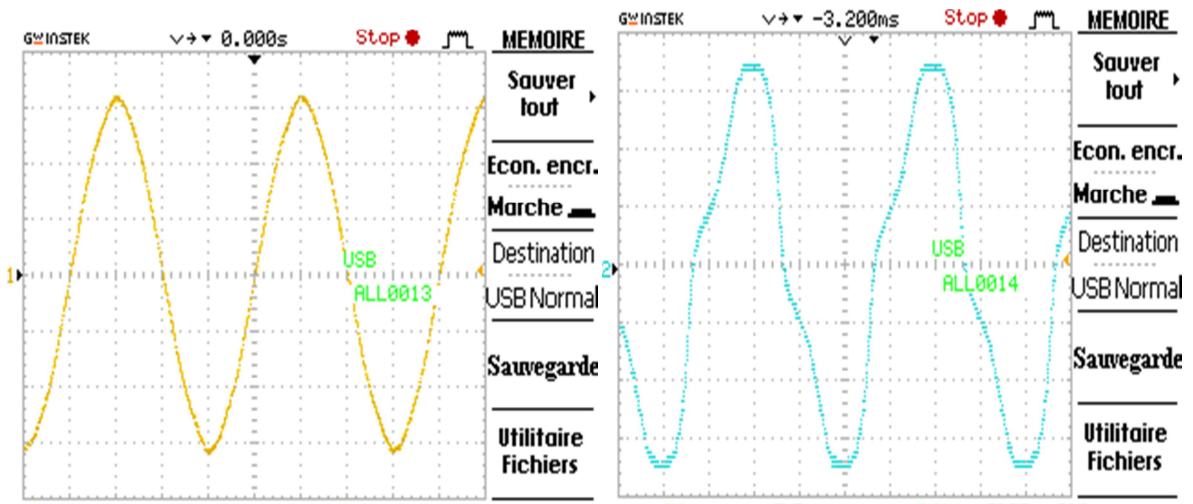


Figure III-56 : l'image de  $V_H(t)$  et  $V_B(t)$  pour le cycle 04

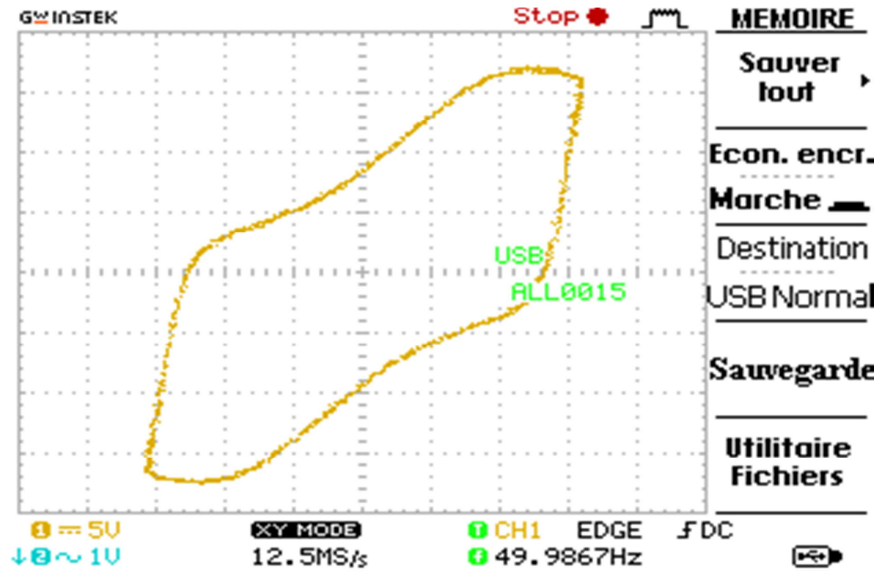


Figure III-57 : image de cycle d'hystérésis pour de le cycle 05

### III-3-4-2 Allures et cycles d'hystérésis :

Les allures des champs H et d'inductions B, ainsi que leur cycle d'hystérésis, pour les différentes valeurs de  $B_{max}$  sont représentées sur les figures suivantes :

Pour  $B_{max}=0.13T$  :

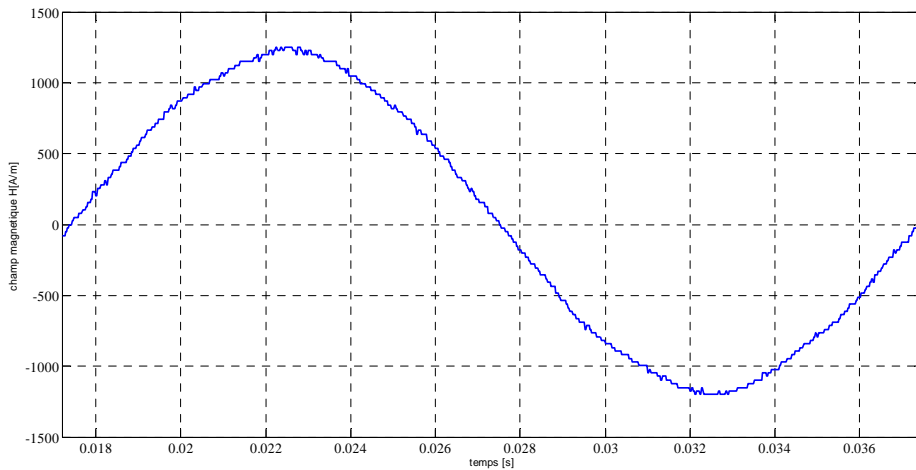


Figure III-58 : Allure du champ magnétique H (t)

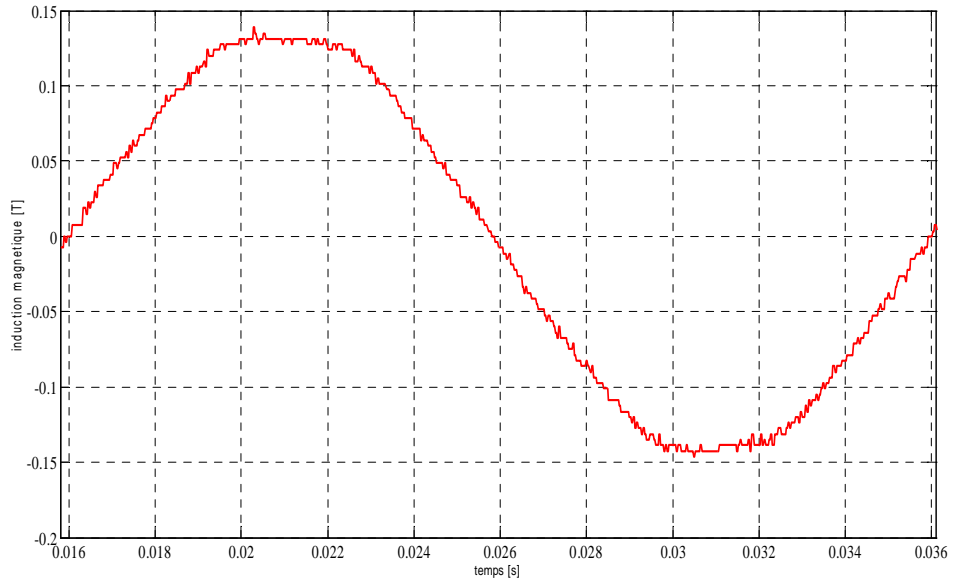


Figure III-59 : Allure de l'induction magnétique  $B(t)$

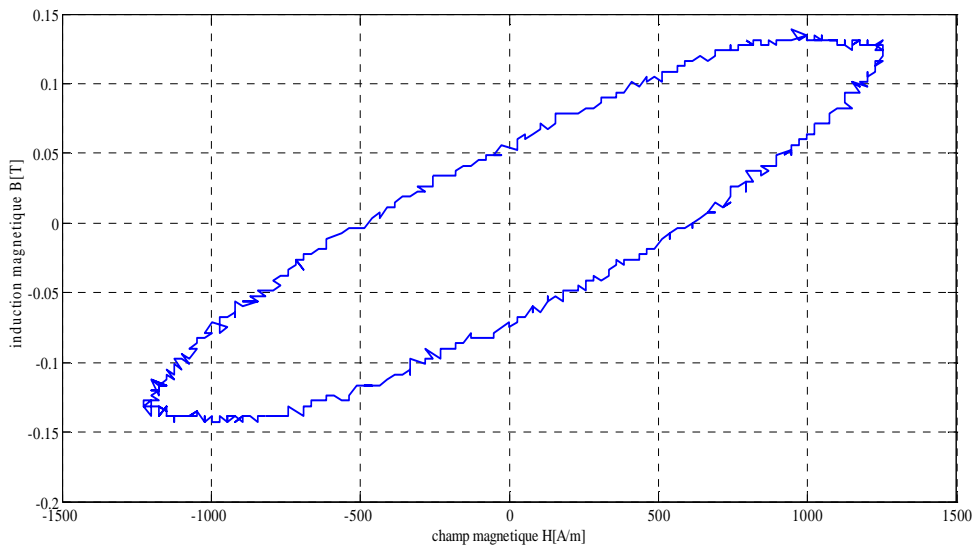


Figure III-60 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.13T$

Pour  $B_{max}=0.26T$  :

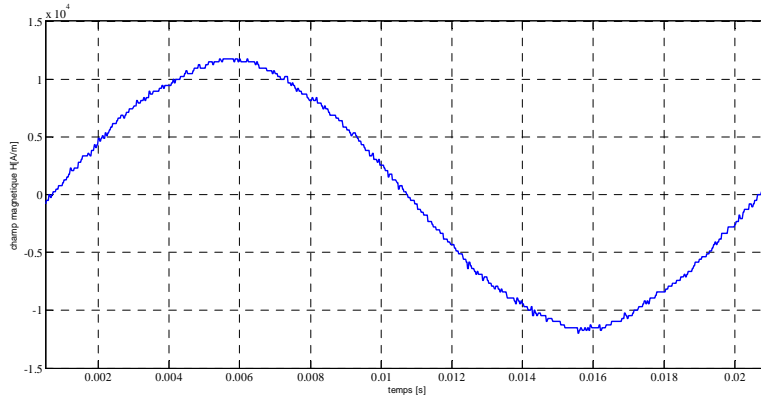


Figure III-61 : Allure du champ magnétique H (t)

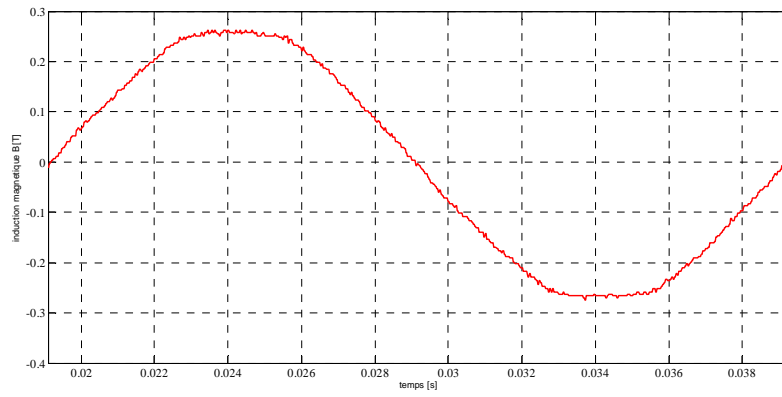


Figure III-62 : Allure de l'induction magnétique B(t)

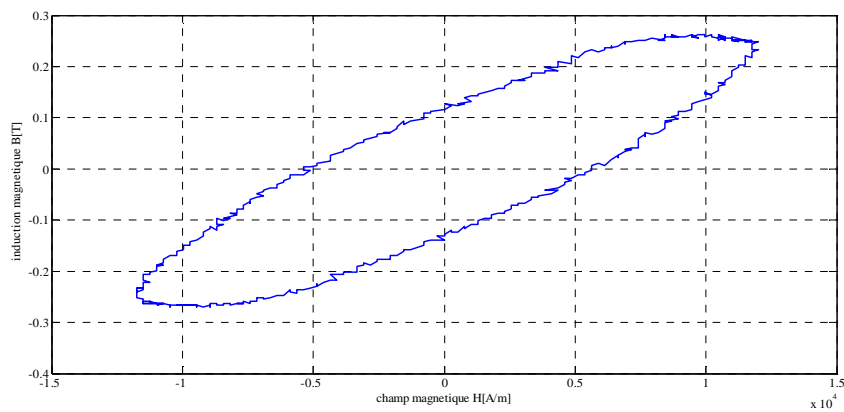


Figure III-63: cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.26 T$

Pour  $B_{max}=0.4T$ :

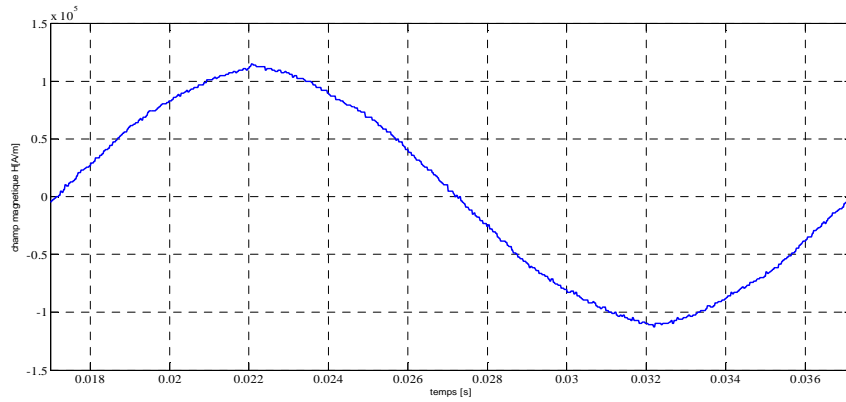


Figure III-64 : Allure du champ magnétique H (t)

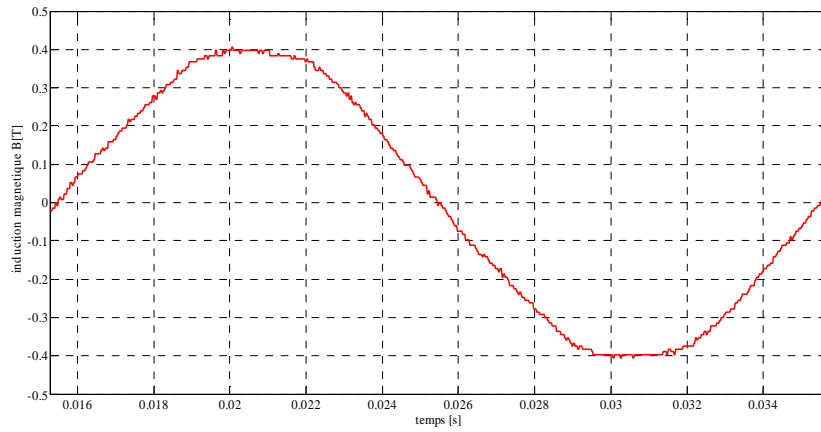


Figure III-65 : Allure de l'induction magnétique B(t)

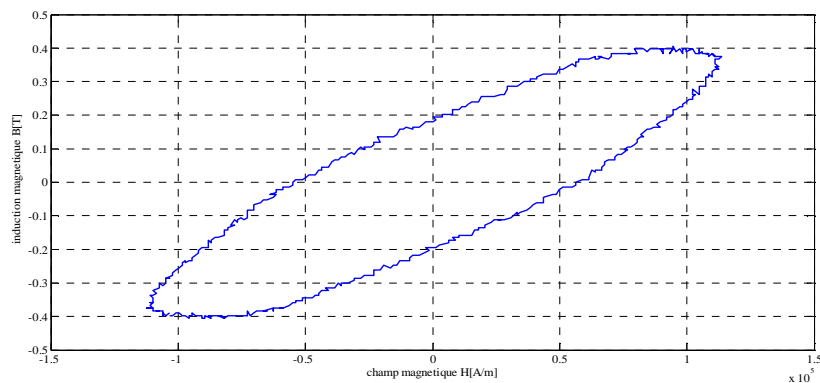


Figure III-66 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.4 T$

Pour  $B_{max}=0.52$  T :

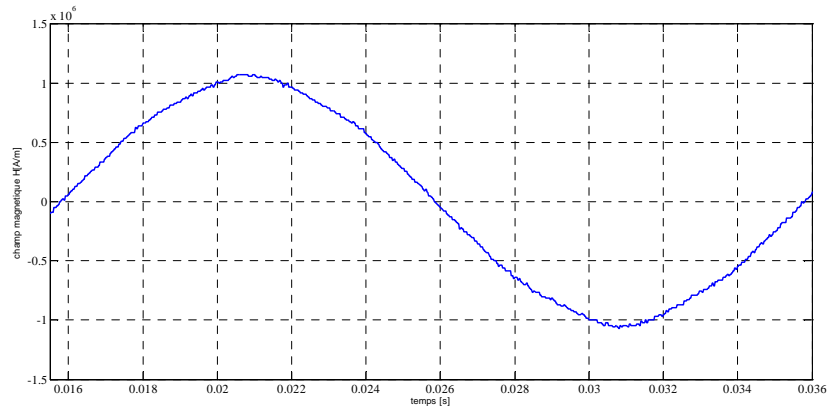


Figure III-67 : Allure du champ magnétique H (t)

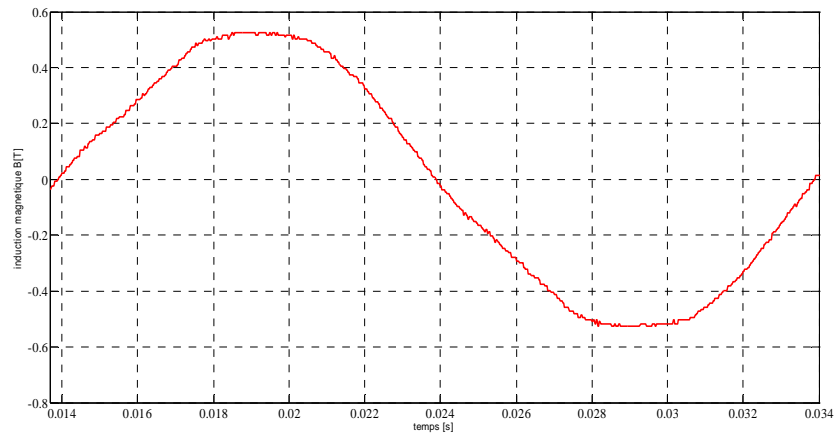


Figure III-68: Allure de l'induction magnétique B(t)

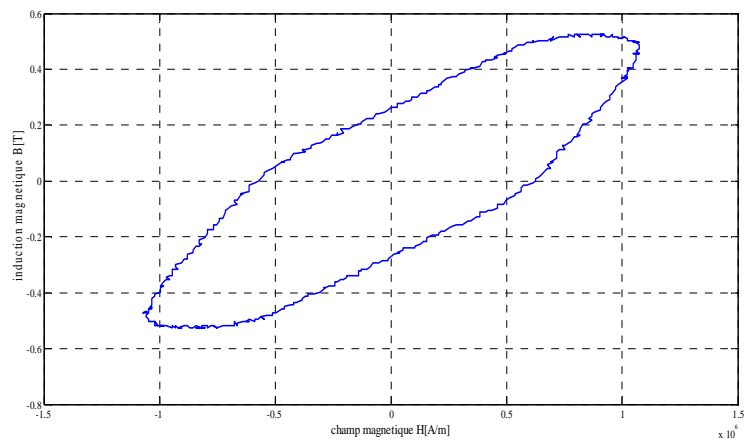


Figure III-69 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.52$  T

Pour  $B_{max}=0.66$  T :

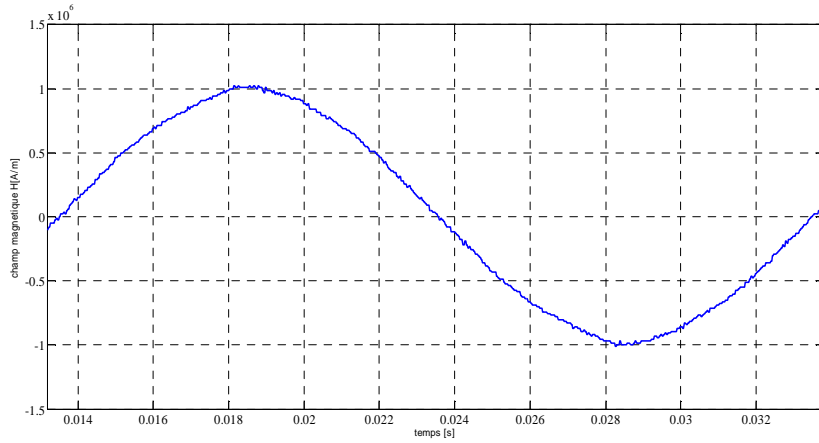


Figure III-70 : Allure du champ magnétique H (t)

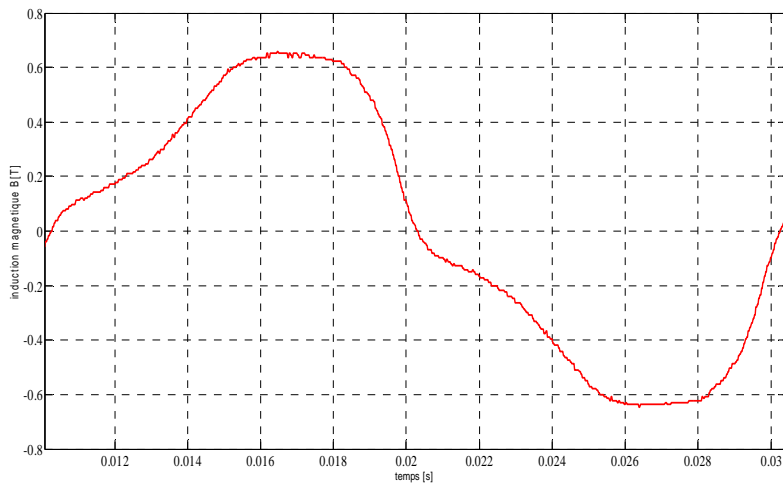


Figure III-71 : Allure de l'induction magnétique B(t)

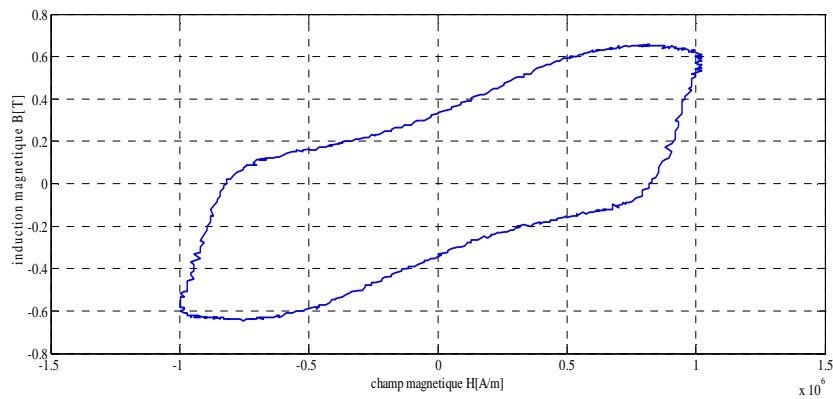


Figure III-72 : cycle d'hystérésis pour  $B_{max}=0.66$  T

### **III-4 Interprétation des cycles :**

#### **III-4-1 Méthode des deux bobines :**

Dans la méthode des deux bobines l'induction magnétique augmente avec l'augmentation du champ d'excitation.

On remarque que l'induction perd sa forme sinusoïdale a partir de  $B_{\max} = 0.89 \text{ T}$ , cette déformation explique qu'on a rentré dans la zone de la saturation du matériau.

Dans cette zone le cycle d'hystérésis prend la forme d'un sigmoïde.

L'augmentation de l'induction magnétique se traduit par l'augmentation de la surface du cycle d'hystérésis, ce qui signifie l'augmentation des pertes magnétiques dans le matériau qui dépend de la valeur de l'induction maximale et la fréquence des champs d'excitation.

Le point  $B_{\max} = 1.3\text{T}$  est le point max de saturation qu'on a pu réaliser avec notre dispositif.

#### **III -4-2 Le tore :**

Dans le tore l'induction magnétique évolue avec l'évolution du champ d'excitation.

Dans cet essai, on n'a pas pu arrivé a un point de saturation idéal et cela due a l'échauffement du matériau a cause de l'insuffisance du nombre de spire du tore.

Et pour arriver a un point  $B_{\max} = 1.1\text{T}$ , on a été obligé d'utiliser un transformateur de courant

Pour augmenter le champ d'excitation.

L'augmentation de la surface du cycle d'hystérésis explique l'augmentation des pertes magnétique dans le matériau qui dépend de la valeur maximal de l'induction.

#### **III-4-3 Le cadre d'Epstein :**

Dans le dernier dispositif « cadre d'Epstein », l'induction magnétique augmente en augmentant le champ d'excitation.

Dans cet essai, on remarque que l'augmentation de l'induction magnétique est faible par rapport au champ d'excitation, cela due aux fuites de flux causé par l'air de séparation de l'échantillon par rapport à la bobine d'excitation

Même chose que les cas précédents, L'augmentation de la surface du cycle d'hystérésis explique l'augmentation des pertes magnétique dans le matériau qui dépend de la valeur maximal de l'induction.

### **Conclusion**

Le travail expérimental présenter dans ce chapitre nous a permis de mettre en évidence l'utilisation des trois dispositifs de caractérisation , a savoir les deux bobines, le tore et le cadre d'Epstein . L'expérience nous a montré que l'obtention de niveau d'induction suffisant et des formes de signaux désirées nécessite que les dispositifs de mesures soient réalisés selon les normes en vigueur.



# CONCLUSION GÉNÉRAL

## Conclusion générale

Dans cette étude expérimentale, nous avons utilisé différents dispositifs de caractérisation magnétique, à savoir : méthode des deux bobines, le tore et le cadre d'Epstein.

Dans les trois dispositifs, on a obtenu des cycles d'hystérésis où l'induction magnétique augmente avec l'augmentation du champ d'excitation, cette augmentation se traduit par l'augmentation de la surface du cycle, ce qui signifie l'augmentation des pertes magnétiques dans les matériaux

- Pour la méthode des deux bobines on a atteint un point de saturation  $B_{\max}=1.3 \text{ T}$  d'où un cycle de forme sigmoïde, cela revient au nombre de spire qui est suffisant
- Pour le tore, l'utilisation d'un transformateur du courant nous a permis d'atteindre une  $B_{\max}= 1.1\text{T}$  qui est un peu loin de la saturation totale du matériau, dont on n'a pas pu atteindre la saturation à cause de l'échauffement excessif du circuit torique
- Pour le Cadre d'Epstein, l'induction magnétique atteinte est faible  $B_{\max} =0.6 \text{ T}$ , à cause des fuites de flux dans l'air séparant la bobine du cadre et l'échantillon utilisé, et aussi le cadre utilisé n'est pas dans les normes.

D'après l'étude effectuée et les résultats obtenus, et dans le but d'avoir un meilleur résultat et une meilleure caractérisation magnétique, il est souhaitable de :

- utiliser un cadre d'Epstein normalisé doté d'un enroulement de compensation de flux de fuite
- réaliser un tore comportant un nombre de spire suffisant pour éviter l'échauffement et atteindre un niveau d'excitation suffisant
- utiliser un circuit d'asservissement pour garder l'induction magnétique de forme sinusoïdale pour les champs d'excitation forts
- utilisation des dispositifs de caractérisation en 2D pour les champs magnétiques tournants



**BIBLIOGRAPHIE**

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]- S. BENMOUSSA ; « ETUDE DE L'AIMANTATION ET DE L'HYSTERESIS DES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES DOUX (Fe, FeSi) », mémoire de master encadré par M. ABDELMALEK MANSRI 2017
- [2]- CH. PIGOT ; « LA LEVITATION DIAMAGNETIQUE A L'ECHELLE MICROMETRIQUE: APPLICATIONS ET POSSIBILITES », mémoire de master encadré par GILBERT REYNE et GUYLAINE POULIN, 2008
- [3] - K. H. J. BUSCHOW, F. R. DE BOER, PHYSICS OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, Edition, KLUWER Academic Publishers, 2004, ISBN: 0-306-47421-2
- [4] - S. CHIKAZUMI, "PHYSICS OF FERROMAGNETISM", Edition, Oxford Science publications, 2005, ISBN: 0-19-851776-9
- [5] - J.H. SWISHER ET E-O. FUCHS, J. Iron and Steel Institute, (August 1970), p. 777.
- [6] - R.H.PRY: J. Appl. Physique **30**, p.189
- [7] - R.C.HAL: J. Appl. Physique **31**, p.1037
- [8]-R.B/Université A.MIRA/Faculté de Technologie/Département Génie Electrique/Bejaia [MATERIAUX MAGNETIQUE] ,2014
- [9] - J.C. BAVAY ; J. VERDUN : Alliages Fer-Silicium Technique de l'ingénieur  
1-14 : D2110 ; 1-18 : D2111 ; 1-6 : D2112.
- [10] - H.GIE, J.P. SARMANT : Electromagnétisme volume 2 Technique et documentation Lavoisier.
- [11] - E. DURAN : Magnétostatique, Masson et Cie.
- [12] Mlle. Amel BELKEBIR, Modélisation -Identification Paramétrique de L'hystérésis Magnétique, Mémoire de Magister, Université de Batna, Novembre 2006.

[13] NEIMAT NAHOULI, « Etude et Réalisation d'un hystérésis-graphe d'un système de mesure du cycle 'hystérésis », Mémoire présenté en vue d'obtenir Le diplôme d'Ingénieur CNAM En Electrotechnique, 2013-2014

[14] M. CHAILLOUX THIBAUT, « Caractérisation et modélisation de matériaux magnétiques en hautes températures en vue d'une application au filtrage CEM

[15] « Technique de mesure temporelle des pertes fer en régime symétrique et asymétrique : application à l'optimisation des régulateurs magnétiques », SCHWANDER Denis,

Centre National d'Etudes Spatiales, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 09, SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, 8-10 JUILLET 2014, ENS CACHAN, France

[16] PIERRE BRISSONNEAU « magnétisme et matériaux magnétiques, édition HERMES, 1997

[17] MIOUAT AZZOUZ, « identification-optimisation paramétrique et quantification des pertes dans les matériaux ferromagnétiques doux », mémoire magister, université Batna 2002-2003

[18] A. BENAOU, « contribution a la caractérisation et a la modélisation de matériaux magnétique en vue d'une implantation dans un code de calcule de champ » thèse d doctorat en génie électrique, école doctorale des sciences pour l'ingénieur, université Lille 1, France décembre 2002

[19] Amir NOURDINE, « Modélisation de l'hystérésis dans les matériaux magnétiques et Introduction de modèles dans le logiciel de simulation aux éléments finis Flux3D », THESE

Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INPG, 2002