

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

Département sciences de la matière



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Option : Physique des matériaux

Par :

Hadj-Aissa Fatima Zohra

THEME

Evaluation des propriétés magnétiques d'un matériau par méthode électromagnétique

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. LEFKAIER Iben Khaldoun

Pr

Président

Mr. NOUIOUA Ismaïl

MAA

Examineur

Mr. Ben SEGHIR Taher

MAA

Examineur

Mr. HELIFA Bachir

MCA

Encadreur

2017- 2018

Remerciement

Tout d'abord je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la santé, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études.

Durant la période consacrée à cette étude, j'ai eu l'immense plaisir de travailler avec des gens merveilleux. Cette page ne pourra en aucun cas quantifier mes remerciements envers eux.

Je remercie d'abord mon directeur de mémoire, Mr. **HELIFA Bachir** pour m'avoir encouragé et proposé ce thème intéressant et pour sa confiance et surtout sa patience, je le remercie aussi pour les connaissances qu'il m'a fait partager et les conseils pour le bon déroulement du travail.

Je remercie vivement Monsieur **LEFKAIER Iben Khaldoun**, directeur du laboratoire de physique des matériaux LPM de m'avoir accepté de faire part de ce laboratoire durant la préparation de ce mémoire, et d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie Messieurs **NOUIOUA Ismaïl** et **Ben SEGHIR Taher**, d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.

Je remercie aussi mes amis du laboratoire pour tous les moments agréables qu'on a passé ensemble : Namarek, Maria de m'avoir aidé, Safia, Imane

Je n'oublierai jamais mes chères amies : Houda, Hadjer, Chayma, Kaouthar

Je réserve les derniers mots de « remerciements » pour ma famille, la partie la plus chère de tous les êtres. A mon cher père et chère mère pour leurs amours, tendresse et leurs sacrifices. Que dieu me les garde, ainsi mes frères : Aboubakeur, Amine, Aissa, Taha, Yacine, dont l'amour et les encouragements ont été une source de force pour moi.

Table des matières

Remerciement.....	i
Table des matières	ii
Liste des notions.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction général	1
Chapitre I Le magnétisme et les matériaux magnétiques	
I.1. Introduction	3
I.2. Le magnétisme.....	3
I.2.1. Historique	3
I.2.2. Magnétisme à l'échelle microscopique	4
I.2.3. Du microscopique au macroscopique	4
I.3. Les matériaux magnétiques	5
I.3.1. Définition et origine des matériaux	5
I.3.2. Classification des matériaux magnétiques	6
I.4. Organisation d'un matériau ferromagnétique.....	9
I.4.1. Domaines de Weiss	10
I.4.2. Les parois de Bloch	11
I.5. Caractérisation et processus d'aimantation d'un matériau ferromagnétique.....	12
I.5.1. Courbe de première aimantation	12
I.5.2. Courbe Anhystérétique.....	14
I.5.3. Hystérésis	14
I.6. Conclusion.....	18
Chapitre II Contrôle non destructif par bruit Barkhausen	
II.1. Introduction	19
II.2. Historique	19
II.3. Bruit Barkhausen	19
II.4. Microstructure et propriétés électromagnétiques	21
II.4.1. Effet de la composition chimique.....	21
II.4.2. Effet des phases en présence	21
II.4.3. Effets des défauts de microstructure de l'acier	22
II.5. Mesure du bruit Barkhausen.....	22
II.5.1. Chaîne de mesure	23
II.6. 3MA: « Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis » et MikroMach: « Mobil Micro Magnetic Analysis and Characterization ».....	26

II.6.1. Description du système 3MA	27
II.6.2. Description du système MikroMach	28
Conclusion.....	34

Chapitre III Procédures expérimentales

III.1. Introduction.....	35
III.2. Matériau étudié	35
III.3. Protocole expérimental	36
III.4. Caractérisation de l'acier XC38.....	37
III.4.1. Analyse harmonique en champ tangentiel.....	37
III.4.2. Mesure du bruit Barkhausen.....	38
III.4.3. Mesure de la perméabilité incrémentale	38
III.4.4. Cycle d'hystérésis.....	39
III.5. Caractérisation d'acier XC38 après trempe à l'air.....	40
III.5.1. Analyse harmonique en champ tangentiel.....	41
III.5.2. Mesure de bruit Barkhausen	41
III.5.3. Mesure de la perméabilité incrémentale	43
III.5.4. Cycle d'hystérésis de l'acier XC38 trempé	43
III.6. Conclusion	44
Conclusion générale	45

Liste des notations

S	[m ²]	Section
V	[m ³]	Volume
H	[A.m ⁻¹]	Champ d'excitation magnétique
H _s	[A.m ⁻¹]	Champ magnétique à saturation
H _c	[A.m ⁻¹]	Champ coercitif
B	[T]	Induction magnétique
m	[A.m ²]	Moment magnétique
M	[A.m ⁻¹]	Aimantation magnétique
J	[T]	Polarisation magnétique
B _s	[T]	Induction à saturation
B _r	[T]	Induction rémanente
B _{anh}	[T]	Induction anhystérétique
χ	s.u.	Susceptibilité magnétique
μ_0	[H.m ⁻¹]	Perméabilité magnétique du vide
μ_r	s.u.	Perméabilité relative
μ_{diff}	s.u.	Perméabilité différentielle
μ_{inc}	s.u.	Perméabilité incrémentale
Φ	[Wb]	flux magnétique
N	s.u.	nombre de spire

Liste des figures

Figure I-1 Magnétite.....	3
Figure I-2 Structure atomique	4
Figure I-3 Matériau diamagnétique.....	6
Figure I-4 Distribution des moments magnétiques dans un matériau paramagnétique	7
Figure I-5 structure magnétique d'un matériau antiferromagnétique	7
Figure I-6 Structure magnétique d'un matériau ferrimagnétique.....	8
Figure I-7 Structure magnétique d'un matériau ferromagnétique.....	8
Figure I-8 Matériaux doux et matériaux durs.....	9
Figure I-9 Matériau ferromagnétique à l'état désaimanté	10
Figure I-10 Modèle à quatre domaines	11
Figure I-11 Transition graduelle entre deux domaines	11
Figure I-12 Présentation des parois de Bloch à 180° et 90°	12
Figure I-13 Perturbation des domaines	12
Figure I-14 Courbe de première aimantation	13
Figure I-15 Cycle d'hystérésis et anhystérétique	14
Figure I-16 Excitation à appliquer au matériau pour le rendre dans un état anhystérétique.....	14
Figure I-17 Cycle d'hystérésis	15
Figure I-18 Courbe de première aimantation (OA) et cycle d'hystérésis (ABCDEF) d'un matériau ferromagnétique	16
Figure I-19 Famille de cycles mineurs centrées	17
Figure I-20 Cycle mineur non centré	17
Figure I-21 Courbe B(H) et perméabilités magnétiques	18
Figure II-1 expérience de Barkhausen	20
Figure II-2 Mouvement des parois	20
Figure II-3 Chaîne de mesure du bruit Barkhausen et le cycle d'hystérésis	23
Figure II-4 Signaux Barkhausen brut et RMS.....	25
Figure II-5 Exemple de signal de bruit Barkhausen et paramètres associés	25
Figure II-6 Différents signaux obtenu par le MikroMach et le 3MA.....	26
Figure II-7 Equipement et logiciel 3MA piloté par un PC.....	27
Figure II-8 Schéma bloc du système 3MA, 1-sonde à effet Hall, 2- bobine de détection, 3- culasse, 4-bobine d'excitation, 5- bobine de référence, 6-blindage, 7-échantillon.....	27
Figure II-9 Dispositif de mesure globale, adopté pour nos mesures par bruit Barkhausen	28
Figure II-10 Système MikroMach pour la caractérisation électromagnétique.....	28
Figure II-11 Capteur MikroMach.....	29
Figure II-12 Capteur MikroMach et chaîne de mesure	29
Figure II-13 Logiciel MMS et paramètres associés	30
Figure II-14 Représentation du signal obtenu par la mesure de bruit Barkhausen et l'hystérésis qui correspond de ce signal	31
Figure II-15 Signal d'analyse d'harmonique	32
Figure II-16 Courbe de la perméabilité incrémentale obtenue et cycle d'hystérésis qui correspond.....	33
Figure II-17 Perméabilité incrémentale en fonction de H.....	33
Figure II-18 Plan d'impédance.....	34
Figure III-1 Echantillon utilisé de l'acier XC38	36
Figure III-2 Procédure expérimentale par le MikroMach	36
Figure III-3 Analyse harmonique à l'état brut	37
Figure III-4 Tension du bruit Barkhausen de XC38 à l'état brut	38
Figure III-5 Perméabilité incrémentale de XC38 à l'état brut	39

Figure III-6 Cycle d'hystérésis d'XC38 à l'état brut	40
Figure III-7 Traitement thermique appliqué sur l'acier XC38	40
Figure III-8 Mesure harmonique de l'acier XC38 trempé	41
Figure III-9 Courbe de bruit Barkhausen de l'acier XC38 trempé	42
Figure III-10 Relation entre la dureté du matériau et l'intensité du bruit Barkhausen	42
Figure III-11 Perméabilité incrémentale obtenu après la trempe	43
Figure III-12 Cycle d'hystérésis de l'acier XC38 trempé à l'air.....	44

Liste des tableaux

Tableau III-1	Normes principales de l'acier XC38	35
Tableau III-2	Composition chimique de XC38 en %	35
Tableau III-3	Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé).....	35
Tableau III-4	Mesure obtenue par l'analyse harmonique de l'acier étudié	37
Tableau III-5	Paramètres de mesures extraits par bruit Barkhausen.....	38
Tableau III-6	Différents paramètres extraits par la perméabilité incrémentale	39
Tableau III-7	Principaux paramètres de bruit Barkhausen.....	41
Tableau III-8	Différents paramètres de mesures obtenu par bruit Barkhausen.....	42
Tableau III-9	Mesures obtenues par perméabilité incrémentale	43

Introduction général

Le contrôle non destructif (CND) consiste à évaluer l'état d'un système, d'une structure ou d'un matériau sans l'endommager en vue d'établir un diagnostic. Les tests de CND sont pour la plupart fondés sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité, On peut classer les techniques utilisées selon les phénomènes physiques mis en jeu: acoustiques (ultrasons, émission acoustique), rayonnements (visuel, radiographie X, γ , tomographie, neutronographie, thermographie infrarouge), flux de matière (ressuage, étanchéité), champs électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault, bruit Barkhausen).

Les phénomènes physiques sur lesquels repose chacune de ces techniques sont très différents et le choix de l'une d'entre elles dans une application dépend d'un certain nombre de paramètres, principalement : la nature des matériaux à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position et forme du défaut), l'environnement du contrôle, le type de contrôle à effectuer (contrôle en ligne, sur pièce mobile, possibilité de contact ou non) et le contexte économique (coût, ...).

Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels. On peut citer notamment l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs) , l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.), l'aérospatiale et l'armée , l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs), le Génie Civil et le bâtiment ,et en règle générale dans tous les secteurs produisant : des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique, par exemple), des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (BTP, nucléaire, canalisation de gaz, par exemple).

L'objet de notre travail est d'étudier une technique électromagnétique parmi les techniques de contrôle non destructive c'est la technique de bruit Barkhausen afin d'évaluer des propriétés magnétique d'un matériau ferromagnétique plus particulière acier XC38 à l'aide de système MikroMach «Mobil Micro Magnetic Analysis and Characterization». Au niveau de laboratoire de physique des matériaux de l'université de Laghouat (*LPM-UATL*).

Dans le contexte cette mémoire s'inscrit s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre, après avoir rappelé les principales notions du magnétisme à différentes échelles, les différentes catégories de matériaux, en particulier ferromagnétiques,

leurs microstructures magnétiques, leurs caractérisations et processus d'aimantation hystérétique, sont présentées.

Le deuxième chapitre, présente le principe de fonctionnement de bruit Barkhausen, leur chaîne de mesure et présentation de deux dispositifs adoptés pour les mesures relatives à cette méthode : le 3MA et en particulier le MikroMach, puis nous présentons le logiciel de traitement entre le capteur et le pc « MMS » et leur paramètres : Analyse harmonique en champ tangentiel, la tension de bruit Barkhausen (RMS), la perméabilité incrémentale et l'impédance aux bornes de la bobine de détection.

Le troisième chapitre, présente et interprète les résultats obtenus de l'acier XC38 par MikroMach : Analyse harmonique en champ tangentiel, le signal RMS de bruit Barkhausen et la perméabilité incrémentale, et le cycle d'hystérésis magnétique, ainsi il montre la sensibilité de cette méthode au changement de la microstructure du matériau étudié.

I Le magnétisme et les matériaux magnétiques

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons les principales notions du magnétisme à différentes échelles, les différentes catégories de matériaux, en particulier ferromagnétiques et leurs propriétés.

I.2. Le magnétisme

Le magnétisme est l'un des phénomènes qui a le plus frappé l'imagination de l'homme, au point que ce mot désigne aujourd'hui des réalités très diverses mais il s'agit d'abord d'une science fort ancienne et néanmoins toujours d'actualité dont le champ d'application ne cesse de s'étendre.

I.2.1. Historique

Thalès de Milet savait déjà, il y a plus de 2500 ans, que la magnétite ou pierre d'aimant, attire le fer et Pline l'Ancien savait aussi qu'elle peut par influence communiquer cette propriété attractive à un morceau de fer. On dit alors que celui-ci est aimanté.



Figure I-1 Magnétite

L'application des aimants à la navigation, sous la forme de boussole ou de compas, est sensiblement plus tardive : elle date des 11^{ème} et 12^{ème} siècles de notre ère. Peter Peregrinus Pierre le pèlerin de Maricourt et William Gilbert (1544-1603) traitent et développent ainsi les premières théories du magnétisme. Il faut attendre Charles Augustin Coulomb (1736-1806) et sa célèbre série de sept mémoires (1785-1791) pour connaître les lois d'action des charges magnétiques en fonction de la distance, et Denis Poisson (1781-1840) pour amorcer la théorie des champs magnétiques [1].

Au cours du 19^{ème} siècle, les connaissances sur les propriétés magnétiques de la matière se précisent progressivement, notamment avec la théorie de l'électromagnétisme établie par

James Clerk Maxwell (1831-1879), mais c'est Pierre Curie qui, pour la première fois (1895), distingue clairement paramagnétisme et diamagnétisme et mit en évidence le passage du

ferromagnétisme au paramagnétisme par élévation de température. Paul Langevin édifie ensuite en 1905 la théorie atomique du diamagnétisme et paramagnétisme, suivi par Pierre Weiss qui élabore en 1906 la théorie du ferromagnétisme. Parallèlement, avec l'essor de l'électrotechnique, les applications du magnétisme commencent à se développer et le champ des recherches s'est encore considérablement élargi [1].

I.2.2. Magnétisme à l'échelle microscopique

Au niveau atomique, les propriétés magnétiques d'un matériau sont attribuables à la contribution du moment orbital due à la rotation des électrons autour du noyau et du moment magnétique de spin qui existe intrinsèquement dans chaque électron (figure I.2), et dont la superposition conduit au moment magnétique \vec{m} de l'atome.

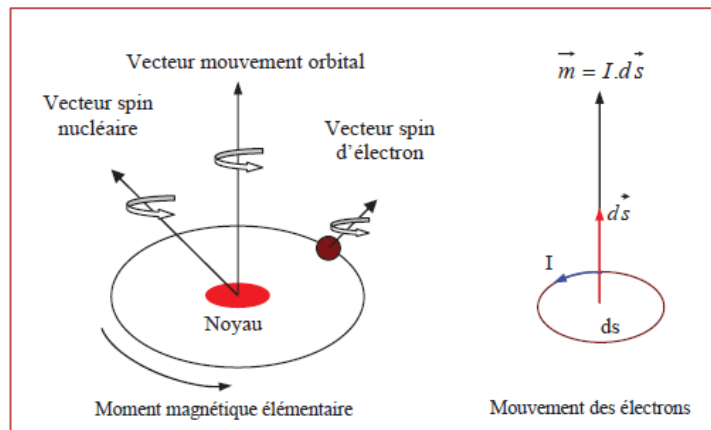


Figure I-2 Structure atomique

Dans les états peu condensés de la matière (gaz, liquide), il n'y a pas d'interaction entre les moments magnétiques d'atomes proches voisins. En revanche, la situation peut être très différente dans les solides où les atomes porteurs de moments sont proches et ordonnés sur un réseau cristallin.

Le cas le plus simple et le plus intéressant pour les applications en génie électrique est le ferromagnétisme que l'on observe dans le fer, le cobalt, le nickel et la plupart de leurs alliages. L'alignement des moments magnétiques atomiques conduit à une sorte de magnétisme géant : l'induction à saturation est très grande[2].

I.2.3. Du microscopique au macroscopique

À l'échelle macroscopique, un élément de volume de matière magnétique est un ensemble de moments magnétiques et on peut définir l'aimantation M [A/m] du matériau telle que :

$$M = \frac{\delta m}{\delta v} \quad (1.1)$$

Où M est la densité des moments magnétiques par unité de volume.

La réaction d'un matériau à l'application d'un champ magnétique extérieur H [A.m⁻¹] est caractérisée par l'induction magnétique B , suivant la relation bien connue :

$$B = \mu_0(H + M) \quad (I.2)$$

où $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m] est la perméabilité magnétique du vide

Dans le vide l'aimantation M étant nulle, la relation devient $B = \mu_0 H$ permet de considérer l'induction et le champ magnétique comme des quantités équivalentes, car simplement liées par la constante de proportionnalité μ_0 .

En présence de matière magnétique, la contribution $\mu_0 M$ reflète la réponse du matériau à l'application de champ magnétique. Cette contribution est appelée polarisation magnétique J , Cette quantité ayant la même unité que B [T] et les mêmes propriétés que l'aimantation M .

$$J = \mu_0 M \quad (I.3)$$

L'équation (1.2) s'écrit alors classiquement sous la forme suivante:

$$B = \mu_0 H + J \quad (I.4)$$

La loi de comportement magnétique peut également s'exprimer comme :

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (I.5)$$

Et :

$$M = \chi H \quad (I.6)$$

Où μ_r la perméabilité relative au matériau et χ la susceptibilité magnétique qui sont liées par l'équation suivante :

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (1.7)$$

Sur la base de cette représentation générale du comportement magnétique, il est possible de décrire le comportement des cinq catégories de matériaux magnétiques : paramagnétiques, diamagnétiques et ferromagnétiques, antiferromagnétique, ferrimagnétique.

I.3. Les matériaux magnétiques

I.3.1. Définition et origine des matériaux

Un matériau magnétique apparaît comme un ensemble de moments magnétiques élémentaires (les atomes) interagissant entre eux et organisés en un réseau cristallin. Les moments magnétiques dépendent de l'environnement magnétique de chaque atome à savoir la nature et la

position des atomes voisins, la température et le champ magnétique appliqué. Selon le comportement de cet ensemble, on distingue différents types de matériaux magnétiques.

I.3.2. Classification des matériaux magnétiques

I.3.2.1. Diamagnétiques

Le diamagnétisme se traduit par l'apparition au sein de la matière d'un champ magnétique opposé au champ appliqué. Son origine est la modification du mouvement orbital des électrons autour du noyau atomique suite à l'application d'un champ magnétique extérieur. Par conséquent, l'aimantation diamagnétique est présente dans toutes les matières, mais sa part dans l'aimantation totale reste très faible par rapport à d'autres types d'aimantation. Parmi les matériaux diamagnétiques (qui présentent seulement une aimantation diamagnétique), on peut citer les éléments : Cu, Au, Ag, Zn, Pb, etc... [3].

Ces matériaux ont alors une susceptibilité magnétique négative, indépendante de la température, de l'ordre de 10^{-5} et une perméabilité magnétique relative $\mu_r < 1$

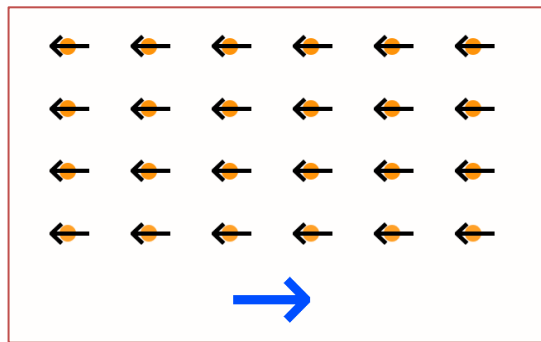


Figure I-3 Matériau diamagnétique

I.3.2.2. Paramagnétiques

Du point de vue microscopique, le paramagnétisme est lié à l'existence d'un moment magnétique permanent qui peut être porté par des atomes ou des molécules. Ces moments sont indépendants les uns des autres. En l'absence d'un champ magnétique extérieur, les moments magnétiques sont orientés de manière aléatoire en raison de l'agitation thermique et l'aimantation est nulle. Sous l'action d'un champ d'excitation magnétique H ces moments magnétiques ont tendance à s'aligner avec lui dans la direction du champ magnétique. Les matériaux paramagnétiques (par exemple Al, Cr, Mn, Na) présentent toutefois une susceptibilité magnétique faible, mais positive, de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} [3] et indépendante du champ appliqué. Ces matériaux sont caractérisés en général par une perméabilité magnétique relative $\mu_r > 1$.

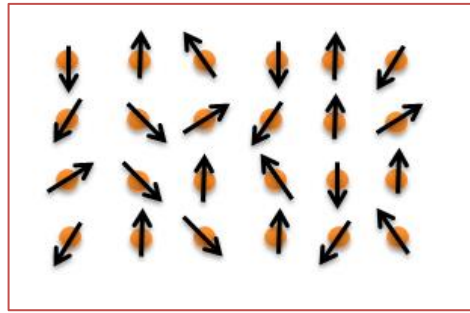


Figure I-4 Distribution des moments magnétiques dans un matériau paramagnétique

I.3.2.3. Antiferromagnétiques

Dans le cas des matériaux antiferromagnétiques, les moments magnétiques interagissent entre eux, mais ces substances sont constituées en général de deux sous réseaux magnétiques dont les moments magnétiques sont couplés antiparallèlement les aimantations des deux réseaux se compensent et les matériaux antiferromagnétiques ne présentent pas d'aimantation macroscopique [4]. On trouve parmi les corps antiferromagnétiques le Chrome, l'Oxyde de Fer « FeO », le Fluorure de Manganèse 'MnF₂' et le Sulfure de Manganèse 'MnS'

Les matériaux antiferromagnétiques ont également une rémanence nulle, pas d'hystérésis, mais une susceptibilité faible et positive qui varie d'une manière particulière avec la température

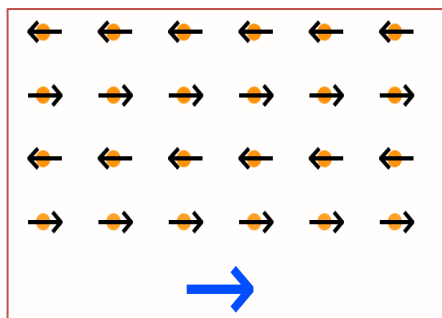


Figure I-5 structure magnétique d'un matériau antiferromagnétique

I.3.2.4. Ferrimagnétiques

Pour les substances ferrimagnétiques, les moments magnétiques des ions du réseau cristallin sont opposés et parallèles, mais ils sont inégaux donc le moment magnétique de l'ensemble est non nul. Lorsqu'ils sont placés dans un champ, ils sont aimantés à saturation et d'une manière spontanée. L'aimantation à saturation est faible [5].

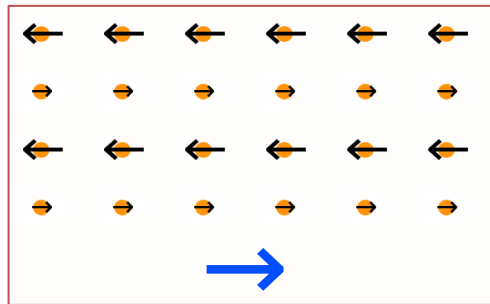


Figure I-6 Structure magnétique d'un matériau ferrimagnétique

I.3.2.5. Ferromagnétiques

On appelle ferromagnétiques les substances susceptibles d'acquérir une aimantation considérable, beaucoup plus forte que pour les diamagnétiques et les paramagnétiques. Les matériaux ferromagnétiques, comme le fer ou le nickel le Cobalt, le Gadolinium, leurs alliages et certains de leurs composés, présentent des distances interatomiques suffisamment petites pour que ceux-ci interagissent. Ainsi, ils présentent, à l'échelle microscopique, une aimantation même en l'absence de champ magnétique extérieur, aimantation qualifiée alors de spontanée. Celle-ci est due au fait que les moments atomiques ont tendance à s'aligner spontanément et parallèlement les uns aux autres.

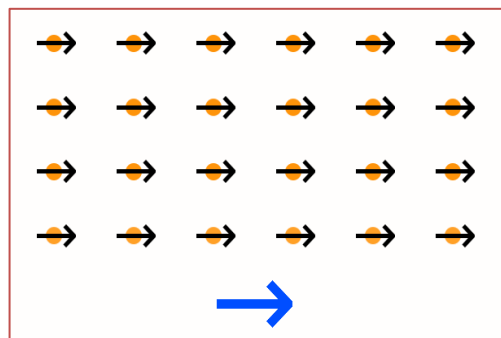


Figure I-7 Structure magnétique d'un matériau ferromagnétique

Cet alignement peut être perturbé par l'augmentation de la température qui conduit à la destruction progressive de cet ordre directionnel. L'aimantation spontanée disparaît alors totalement à la température de Curie T_c . Ainsi, au-delà de T_c , on observe un comportement de type paramagnétique, appelé paramagnétisme de Curie-Weiss (T_c est spécifique à chaque matériau). La susceptibilité magnétique de ce type de matériau est fonction du champ magnétique extérieur appliqué [6].

Ces matériaux sont caractérisés en général par une perméabilité magnétique relative élevée $\mu_r \gg 1$ et une susceptibilité magnétique $\chi \gg 1$.

On peut distinguer les matériaux ferromagnétiques en 2 classes : **les matériaux doux et durs**

Un matériau ferromagnétique doux est caractérisé par un champ coercitif faible, une perméabilité relative élevée et une induction à saturation B_s élevée. Ces matériaux présentent peu de défauts dans leur structure cristalline, ainsi qu'une anisotropie réduite, généralement utilisé comme conducteur de flux pour transmettre une information ou convertir de l'énergie. Les matériaux doux sont utilisés dans de nombreux appareils où le champ magnétique varie (transformateurs, électroaimants, relais).

Un matériau ferromagnétique dur est caractérisé par un champ coercitif élevé et une perméabilité relative faible une induction rémanente élevée et un large cycle d'hystérésis. Généralement utilisé comme source de flux ou comme aimant, on utilise cette catégorie de matériaux pour la fabrication d'aimants permanents [7].

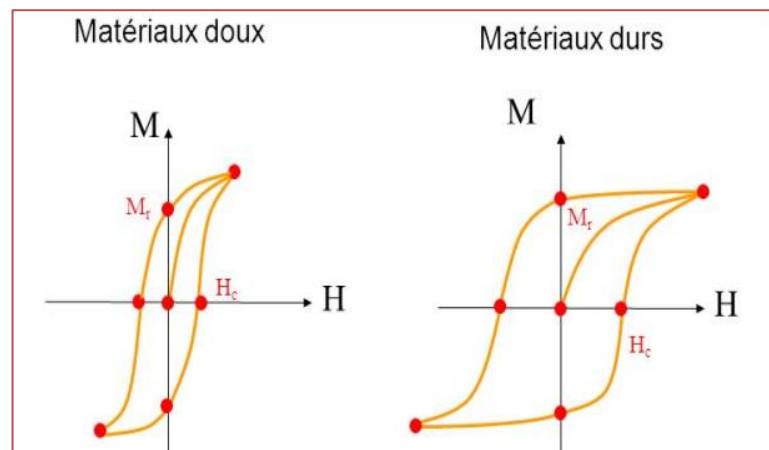


Figure I-8 Matériaux doux et matériaux durs

I.4. Organisation d'un matériau ferromagnétique

La première théorie moderne du ferromagnétisme, qui reste valable jusqu'à aujourd'hui, a été proposée par Pierre Weiss en 1906-1907, et les premiers travaux expérimentaux ont été menés dans les années 1930. En effet, à l'échelle macroscopique, l'aimantation spontanée, observée à l'échelle microscopique, disparaît. La théorie de P. Weiss explique l'existence d'un état désaimanté et stipule qu'un matériau ferromagnétique est subdivisé en plusieurs domaines appelés domaines de Weiss à l'intérieur desquels l'aimantation est uniforme et alignée selon une même direction pour chaque domaine mais différente d'un domaine à l'autre. Ces domaines sont séparés par des parois (parois de Bloch) dont l'épaisseur est beaucoup plus petite que la taille du domaine, de quelques centaines à quelques milliers d'Angstrom [3].

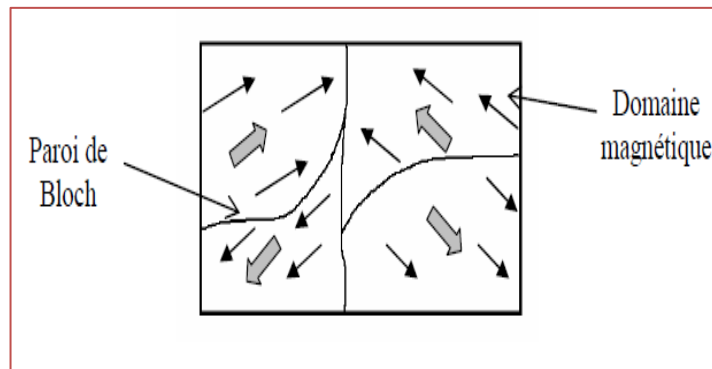


Figure I-9 Matériau ferromagnétique à l'état désaimanté

I.4.1. Domaines de Weiss

Un matériau ferromagnétique est subdivisé en plusieurs domaines appelés domaine de Weiss à l'intérieur desquels l'aimantation est uniforme comme indiqué précédemment, c'est à dire suivant une direction unique, et appelée aimantation spontanée[6].

L'existence des domaines de Weiss explique également pourquoi tous les corps ferromagnétiques ne sont pas des aimants. L'arrangement de ces domaines n'est pas aléatoire. Chaque corps cherche à organiser ses domaines dans le but de minimiser les énergies magnétiques :

Energie magnétostatique : liée aux champs démagnétisant internes qui tendent à minimiser le parcours des lignes de champ dans l'air par la création de nouveaux domaines.

Energie de paroi : stockée dans la paroi, elle tend à équilibrer la diminution de l'énergie magnétostatique.

Energie magnéto-cristalline : liée au fait qu'il existe des axes de facile aimantation dans le réseau cristallin et que la rotation des moments magnétiques demande une importante mise en jeu d'énergie.

Energie d'échange : qui résulte de l'interaction des moments et qui passe par un minimum lorsque les moments des domaines sont alignés.

Energie magnéto-élastique : qui résulte de l'orientation préférentielle de l'aimantation lorsque le cristal est sous contrainte mécanique [8].

I.4.1.1. Modèle de quatre domaines

Cette microstructure magnétique est fréquemment modélisée de la façon suivante :

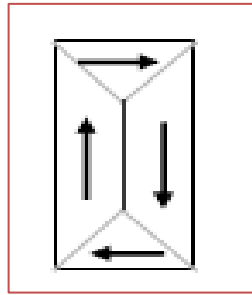


Figure I-10 Modèle à quatre domaines

Ce modèle correspond à une simplification de la microstructure magnétique réelle puisqu'elle comprend à la fois des domaines à 180° et des domaines à 90° . De plus, l'aimantation globale est nulle et les lignes de champ sont bouclées au sein de cette structure. Il contient donc bien les principales caractéristiques de base d'un cristal ferromagnétique d'un réseau cubique.

Ce modèle est très pratique pour expliquer l'existence du cycle d'hystérésis et du bruit Barkhausen. Lors de l'application d'un champ magnétique variable à une telle microstructure magnétique.

I.4.2. Les parois de Bloch

La séparation des différents domaines magnétiques élémentaires «domaines de Weiss» est matérialisée par ce que l'on appelle les parois de Bloch qui correspondent à une zone magnétique où l'aimantation passe d'une direction à une autre.

Le changement d'orientation des moments magnétiques n'est pas brutal et se fait de manière progressive dans l'épaisseur de la paroi.

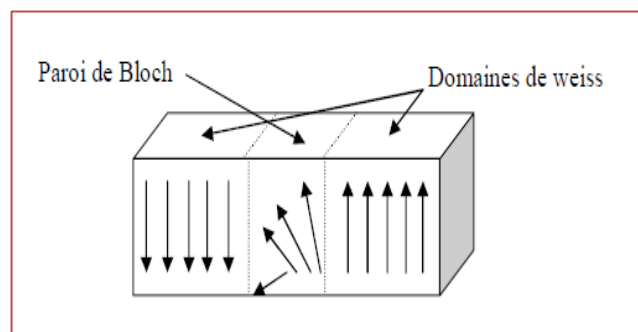


Figure I-11 Transition graduelle entre deux domaines

On distingue principalement :

- Les parois à 180° séparent deux domaines de Weiss dont l'angle de la direction d'aimantation est à 180° .
- Les parois à 90° séparent deux domaines de Weiss dont l'angle de la direction d'aimantation est à 90° .

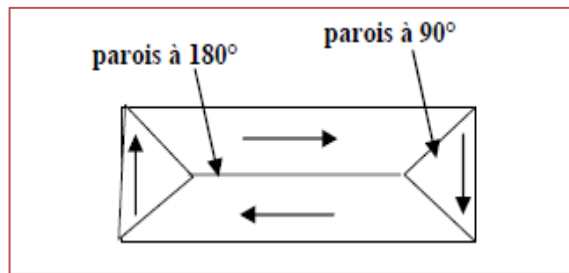


Figure I-12 Présentation des parois de Bloch à 180° et 90°

I.4.2.1. Mouvements des parois de Bloch

L'énergie fournie au matériau lorsqu'on l'excite par un champ magnétique extérieur, vient perturber l'équilibre des parois. Les conséquences de cette perturbation sur les domaines magnétiques sont les suivantes : Les domaines dont la direction et le sens privilégiés d'aimantation sont voisins de ceux de l'excitation vont avoir tendance à s'élargir dans un premier temps, au profit des autres domaines.

Si l'excitation est très importante les domaines de la direction et du sens contraire disparaissent.

Si l'on continue à augmenter l'excitation, celle-ci va provoquer la rotation de l'aimantation des grands domaines résultants[9].

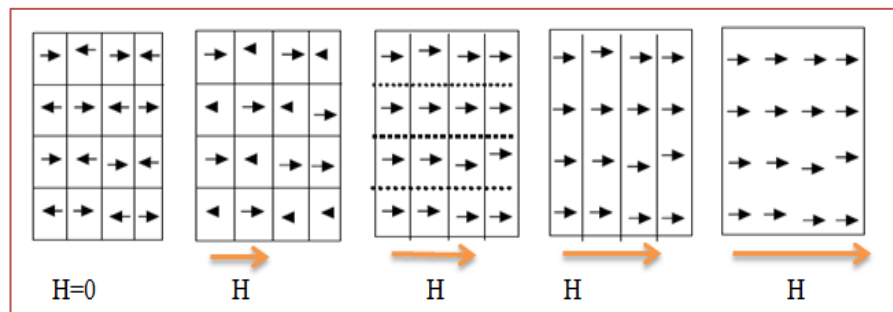


Figure I-13 Perturbation des domaines

I.5. Caractérisation et processus d'aimantation d'un matériau ferromagnétique

Un matériau ferromagnétique peut être caractérisé par différents tracés et paramètres. On distingue: la courbe anhystérique, la courbe de première aimantation, l'hystérésis magnétique.

I.5.1. Courbe de première aimantation

Lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur à ce matériau, les domaines magnétiques dont l'orientation est voisine de celle de H croissent aux dépens de ceux dont l'orientation est opposée à celle de H. Les parois de Bloch se déplacent donc dans le matériau. A la limite, lorsque le champ magnétique extérieur atteint une valeur critique H_s , le monocristal n'est plus constitué que d'un seul domaine ferromagnétique dont l'orientation est la même que celle de H;

L'induction atteint alors une valeur maximale, B_s , appelée induction à saturation. Ce phénomène est représenté par la courbe de la figure I.14, courbe appelée : courbe de première aimantation. Toutefois, le déplacement des parois de Bloch est gêné par les imperfections présentes au sein du matériau. Ces imperfections sont dues notamment à des impuretés non magnétiques et ferromagnétiques ainsi qu'aux contraintes de dislocation, de joints de grains et de traitements métallurgiques, une réduction de la perméabilité et une augmentation des pertes magnétiques. Ainsi, en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué, le mécanisme d'aimantation peut être décrit, en première approche, comme la succession de trois mécanismes principaux

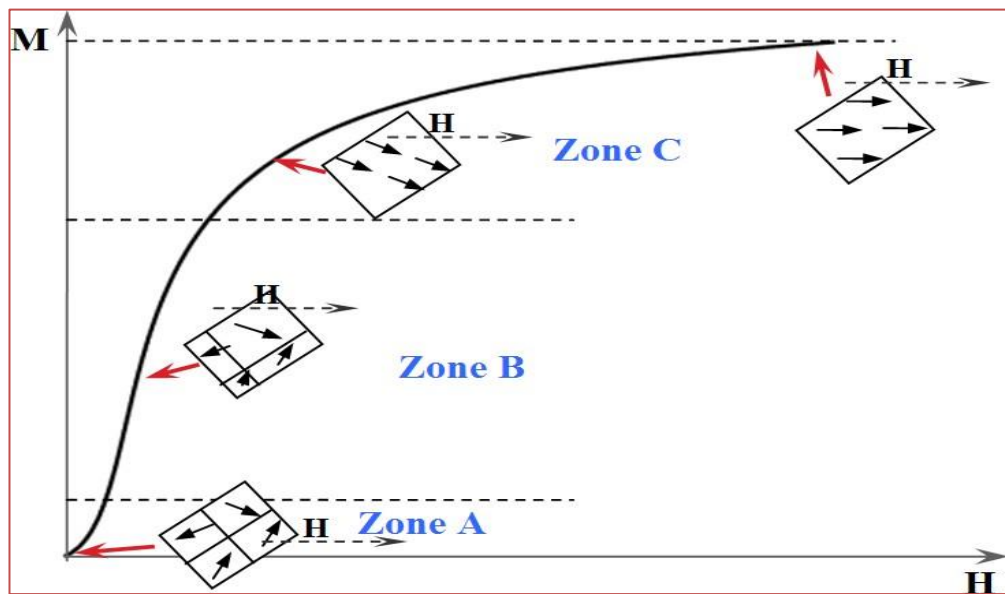


Figure I-14 Courbe de première aimantation

Zone A : il s'agit de la zone des champs faibles où on peut assimiler le déplacement des parois à une déformation élastique, elles peuvent se déformer sur les sites d'ancrage. Ainsi, si l'augmentation du champ extérieur n'est pas suffisante pour décrocher la paroi. Ce processus est réversible : si le champ extérieur s'annule, le système retourne à l'état initial.

Zone B : dans cette région, l'intensité du champ magnétique extérieur atteint un niveau permettant aux parois de vaincre les sites d'ancrages. Ainsi, les domaines dont l'aimantation initiale se trouve dans la même direction ou dans une direction proche de celle du champ magnétique extérieur vont croître en volume au détriment des autres domaines.

Zone C : Pour arriver à cette région, l'intensité du champ magnétique doit être très élevée. L'aimantation commence alors à saturer et les parois de Bloch disparaissent. On a pratiquement une structure avec un seul domaine magnétique où les moments magnétiques

commencent à s'aligner sur la même direction du champ magnétique appliqué. Ce processus de rotation des moments magnétiques est irréversible [3].

I.5.2. Courbe Anhystérétique

La courbe anhystérétique est la courbe représentant l'induction en fonction du champ tel qu'il serait si les transformations dans le matériau étaient réversibles (sans perte).

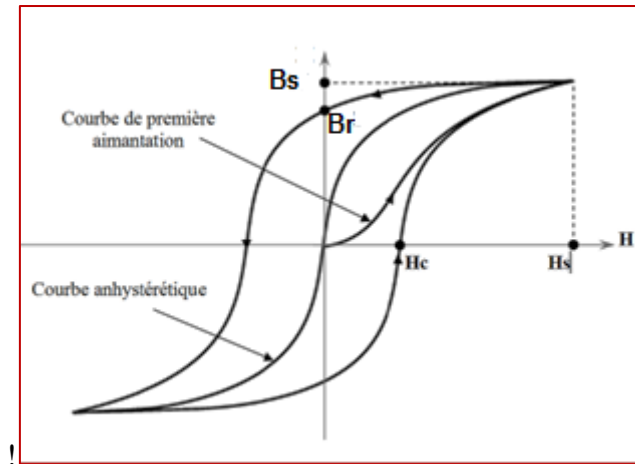


Figure I-15 Cycle d'hystérésis et anhystérétique

Un état anhystérétique B_{anh} indépendant du passé d'aimantation du matériau peut être obtenu. Pour déterminer expérimentalement cette courbe, on applique un champ d'excitation de type sinus amorti centré sur un champ d'excitation magnétique H , comme l'illustre la figure I.15:

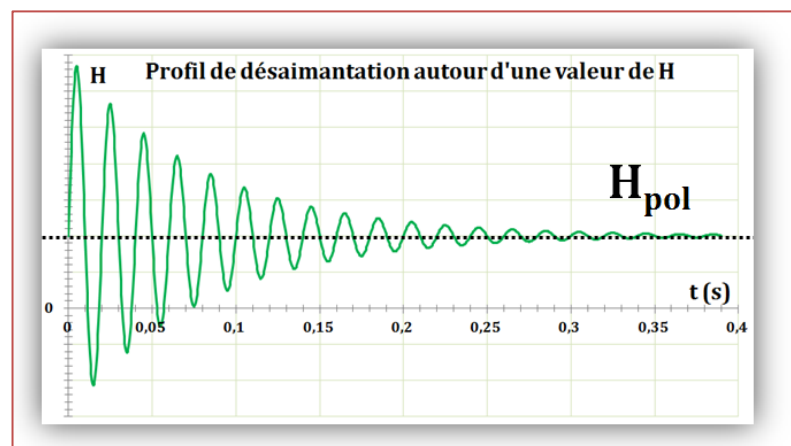


Figure I-16 Excitation à appliquer au matériau pour le rendre dans un état anhystérétique

I.5.3. Hystérésis

L'hystérésis est un phénomène principalement lié aux matériaux ferromagnétiques, c'est la signature qui caractérise le matériau.

I.5.3.1. Définition

Le cycle d'hystérésis est la courbe de réponse des matériaux magnétiques, à travers laquelle, ils gardent la mémoire de tous leurs états d'aimantation antérieurs par l'intermédiaire des domaines élémentaires. C'est J.A.Ewing qui a montré ce comportement spécifique dans le cas du Fer, et qu'il l'a appelé **hystérésis** qui signifie retard de l'effet sur la cause.

Le cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique dépend de la mobilité des parois de Bloch, elle-même est fonction des énergies magnétiques et du champ appliqué. Donc il peut être considéré comme une caractéristique du matériau et dans tous les cas un modèle mathématique bien détaillé et nécessaire. L'hystérésis c'est le retard à la désaimantation et le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. Donc le cycle d'hystérésis est le tracé de l'induction en fonction du champ H extérieur appliqué [5].

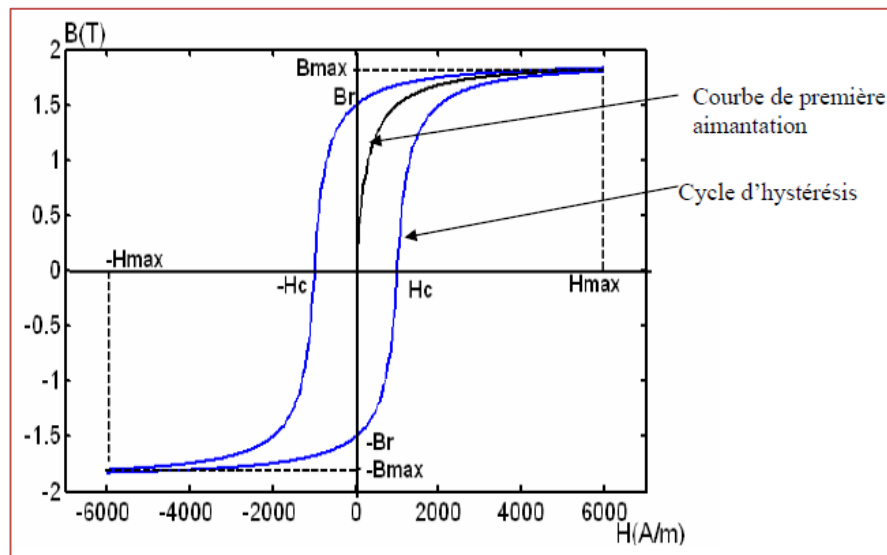


Figure I-17 Cycle d'hystérésis

I.5.3.2. Mécanisme de l'hystérésis

Lorsque le champ H diminue, les domaines magnétiques commencent par s'orienter pour, dans chacun des grains, prendre l'orientation facile la plus proche de celle du champ appliqué (courbe AB). H diminuant encore, l'énergie magnétoélastique du cristal ou des cristaux monodomains devient trop élevée et des domaines d'aimantations opposées germent puis se développent. Lorsque le champ devient nul, une aimantation rémanente subsiste qui se traduit par une induction rémanente B_r (point B). Pour obtenir l'induction nulle, il faut appliquer un champ magnétique négatif (courbe BC). Le champ H_c correspondant est le champ coercitif (point C). Lorsque le champ augmente négativement, l'induction atteint une valeur minimale $-B_s$ (courbe CD). Quand le sens et la valeur du champ rechantent, on décrit la courbe DEFA. L'aire

du cycle d'hystérésis représente l'énergie dépensée par unité de volume du matériau, par la réorientation des moments magnétiques des domaines et par le déplacement des parois [2].

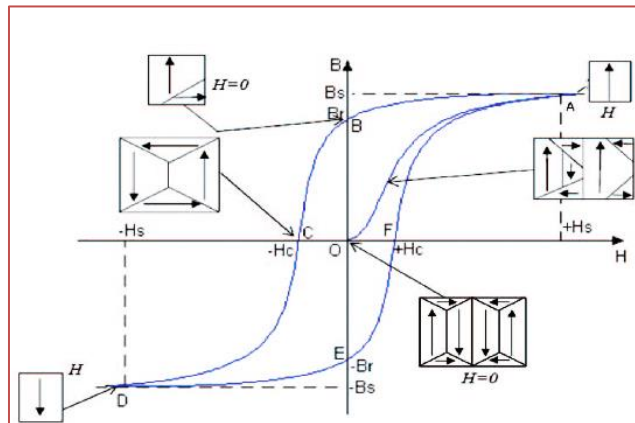


Figure I-18 Courbe de première aimantation (OA) et cycle d'hystérésis (ABCDEF) d'un matériau ferromagnétique

I.5.3.3. Types du cycle d'hystérésis

Les principaux types du cycle d'hystérésis sont : cycles majeurs, et cycles mineurs (centré et non centré)

- **Cycle majeur**

Ce cycle est obtenu en faisant varier le champ magnétique d'une valeur suffisamment élevée pour que le matériau soit saturé jusqu'à la saturation du matériau. Tout point (H, M) à l'intérieur du cycle majeur est un état possible du matériau [9].

- **Cycle mineur centré**

Il est possible d'exciter la matière afin d'obtenir une famille de cycles d'hystérésis centrées en faisant varier le champ d'excitation maximal H_{\max} d'un cycle à l'autre inférieur au champ de saturation. On obtient ainsi différents couples $B_{\max}-H_{\max}$. On appelle courbe normale la courbe $B(H)$ obtenue en reliant les couples $B_{\max}-H_{\max}$ des cycles mineurs centrés.

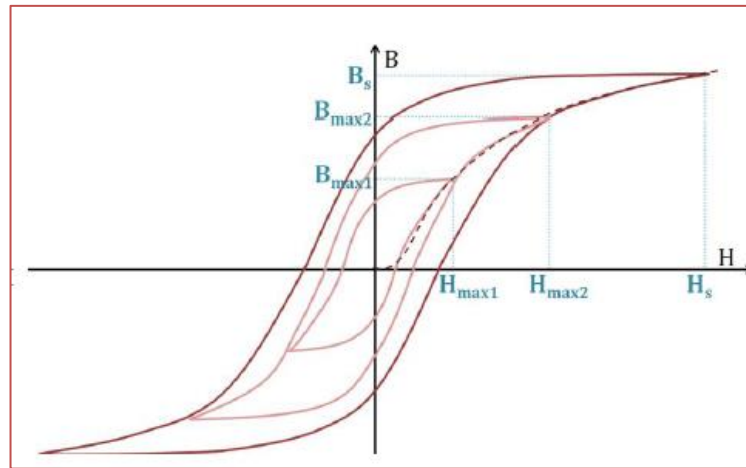


Figure I-19 Famille de cycles mineurs centrés

- **Cycle mineur non centrée**

Ce type de cycle formé par la superposition de deux modes d'excitation : l'un, d'un champ magnétique alternatif à une excitation basse fréquence et l'autre un champ magnétique à haute fréquence.

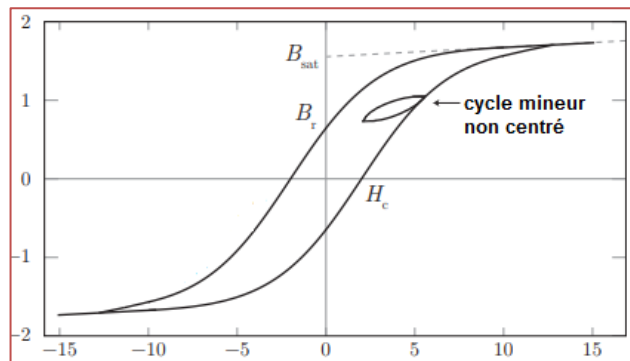


Figure I-20 Cycle mineur non centré

I.5.3.4. Types de perméabilités

La perméabilité magnétique d'un matériau ferromagnétique est un paramètre beaucoup plus délicat à estimer et il peut dépendre de la température, du champ magnétique externe ou encore de la fréquence de travail. Elle représente la capacité d'un matériau à réagir à un champ magnétique d'excitation. La perméabilité magnétique est définie par un rapport entre B et H et peut être relative ; c'est-à-dire divisée par la perméabilité du vide μ_0 [10], de façon générale :

- La **perméabilité initiale** μ_i est la limite à l'origine de la perméabilité de la courbe de première aimantation (B et H tendent vers zéro) :

$$\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (I.8)$$

-La **perméabilité différentielle** μ_{diff} se définit comme la pente du cycle d'hystérésis (majeur)

$$\mu_{\text{diff}} = \frac{dB}{dH} \quad (\text{I.9})$$

- La **perméabilité incrémentale** μ_{inc} correspond à la pente des cycles mineurs asymétriques (non centré) .

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (\text{I.10})$$

Cette perméabilité est mesurée lorsque l'excitation du matériau est une superposition de deux champs : un champ d'excitation constant et un champ alternatif, soit une excitation magnétique du type $H = H_{\text{pol}} + C \cos(t)$, avec H_{pol} et C des constantes et t le temps. Le point central du cycle mineur asymétrique ainsi obtenu a pour coordonnées le champ de polarisation H_{pol} et l'induction polarisée B_{pol} . Les mêmes termes (perméabilité différentielle et perméabilité incrémentale) peuvent être utilisés mais "en étant le long de la première aimantation", comme l'illustre la Figure (I.20)[11].

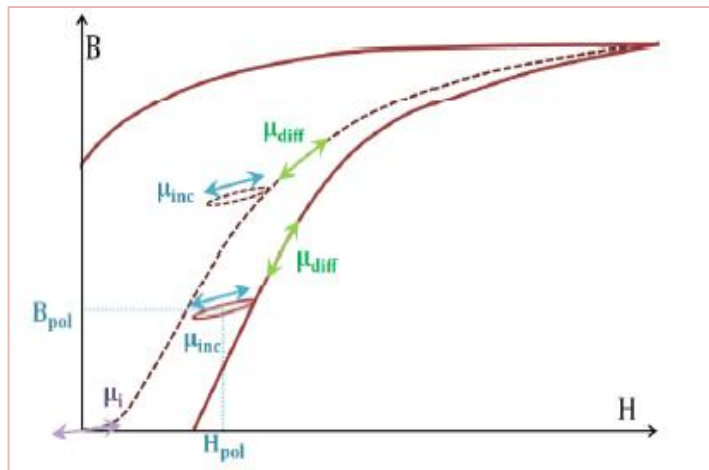


Figure I-21 Courbe B(H) et perméabilités magnétiques

I.6. Conclusion

Nous nous sommes intéressés, dans cette partie à rappeler quelques généralités concernant le magnétisme. Nous avons également présenté la classification des matériaux à partir de leur comportement magnétique, plus particulièrement les matériaux ferromagnétiques et leur propriétés et processus d'aimantation hystérétique.

Différentes méthodes utilisées pour la mesure des propriétés magnétiques : Hystérésigraphe, Perméamètre, fluxmétrique utilisant un Lock in et bruit Barkhausen ...

Dans le chapitre suivant nous nous intéressons à la méthode d'évaluation des propriétés magnétiques d'un matériau ferromagnétique par bruit Barkhausen.

II . Contrôle non destructif par bruit Barkhausen

II.1. Introduction

La technique de contrôle non destructif par bruit Barkhausen joue un rôle important dans le contrôle de qualité et de fiabilité d'un produit, cette technique est sensible à la microstructure des matériaux ferromagnétiques.

Dans ce contexte, une présentation sur le principe de fonctionnement de bruit Barkhausen magnétique et sa sensibilité à la microstructure, ainsi que leur chaîne de conditionnement et de mesure est étalée.

En outre, les deux dispositifs adoptés pour la mesure par cette méthode de caractérisation : le « 3MA » et le « MikroMach » sont présentés et les paramètres du logiciel « MMS » de « MikroMach » sont passés en revue.

II.2. Historique

Depuis les premières études menées par Pierre Curie en 1895 visant à comprendre les propriétés magnétique de la matière, d'autres travaux de recherche sont entrepris par des scientifiques dans l'étude du magnétisme. En 1905, Langevin introduisit le concept du moment magnétique atomique permettant ainsi de comprendre certaines propriétés magnétique des matériaux, mais il a fallu attendre la théorie de Weiss.

Heinrich George Barkhausen a mis en évidence les discontinuités du processus d'aimantation sous la forme d'un bruit audible. L'expérience de Barkhausen a permis de vérifier indirectement l'existence des domaines de Weiss, par la suite, à partir de 1928, Heisenberg par la théorie quantique a expliqué l'énergie d'échange entre deux atomes voisins, la minimisation de cette énergie qui donne lieu à la formation des domaines a été mathématiquement posée par Landau et Lifshitz en 1935. La transition entre deux domaines ne peut se faire brusquement, Félix Bloch en 1932 a expliqué la structure des zones de transition entre deux domaines adjacents par des parois qui portent son nom [8].

II.3. Bruit Barkhausen

La mesure du bruit Barkhausen est une technique de caractérisation magnétique qui s'applique uniquement aux matériaux ferromagnétiques. Barkhausen mit le premier en évidence le caractère brutal et discontinu des mouvements de parois de Bloch, à travers une expérience simple schématisée dans la figure II.1, il entoura un échantillon ferromagnétique d'un bobinage relié à un haut-parleur via un amplificateur. En plaçant l'échantillon dans un champ variant très

lentement de façon continue, il entendit une avalanche de « cliquetis » causés par les brutales variations de flux occasionnées par le déplacement des parois [12].

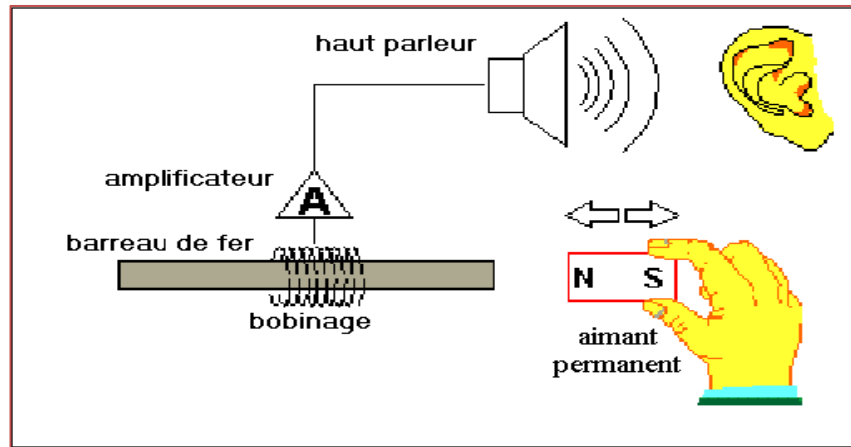


Figure II-1 expérience de Barkhausen

En effet, sous l'action d'un champ magnétique extérieur variable, la microstructure magnétique va se réorganiser en trois étapes :

Etape I. Pour les faibles valeurs de champs les parois de Bloch vont se déplacer de manière réversible de façon à faire croître les domaines les mieux orientés par rapport au champ appliqué.

Etape II. Quand les valeurs du champ sont plus élevée les parois de Bloch peuvent alors franchir des obstacles dus à la microstructure cristalline du matériau (précipités, joints de grain...) [13], qui se comportent comme des points d'ancrage.

Le désancrage de ces parois nécessite alors un champ appliqué légèrement supérieur. La paroi avance alors brusquement jusqu'au défaut suivant, ce qui induit la génération d'une onde électromagnétique (sons de bruit) et une variation de flux. C'est cette variation de flux qui correspond à l'événement Barkhausen élémentaire [14].

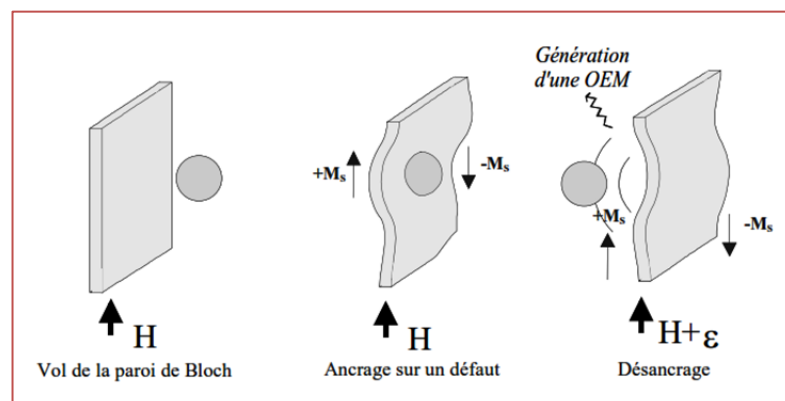


Figure II-2 Mouvement des parois

Etape III. Enfin près de la saturation magnétique du matériau, on assiste à la rotation de l'aimantation des domaines hors de la position de facile aimantation pour s'aligner avec le champ appliqué [13].

Le cycle d'hystérésis, obtenu en magnétisant le matériau de saturation à saturation, peut nous apporter des informations macroscopiques sur la microstructure cristalline du matériau. Le bruit Barkhausen détecté pendant cette même magnétisation, sensible aux événements élémentaires, va nous permettre d'obtenir des informations plus fines sur cette microstructure cristalline. En effet, l'aimantation d'un matériau est défini :

Au niveau macroscopique, il est présenté par le cycle d'hystérésis.

Au niveau microscopique, il est représenté par le bruit Barkhausen.

Le bruit Barkhausen est un phénomène complexe qui fournit un test non destructif efficace pour caractérisation d'un matériau ferromagnétique:

- ❖ Évaluation des propriétés mécaniques ou métallurgiques (dureté, écrouissage, taille de grain, composition de phase, etc.).
- ❖ Détection de la décarburation.
- ❖ Détection des brûlures de rectification sur les roulements et les pignons.

II.4. Microstructure et propriétés électromagnétiques

II.4.1. Effet de la composition chimique

Les impuretés précipitées peuvent avoir une action très néfaste sur les propriétés des aciers. La température de Curie, tout comme l'aimantation à saturation, sont essentiellement déterminées par la composition chimique de l'acier. Chaque composition devrait ainsi conduire à des caractéristiques magnétiques spécifiques. En réalité, ce n'est qu'une première approximation car les propriétés magnétiques d'usage des aciers (perméabilité, champ coercitif,...) sont également sensibles à la structure et aux défauts du matériau.

La seule connaissance de la composition de l'acier ne permet donc pas d'estimer ces grandeurs.

II.4.2. Effet des phases en présence

Les aciers sont bien souvent constitués de différentes phases (ferrite, perlite, martensite,...) et tirent leurs bonnes propriétés de cette complexité. Généralement, il existe une phase dominante riche en fer dans laquelle peut être dispersée une phase minoritaire.

La phase dispersée provoque un ancrage des parois de Bloch ce qui modifie les propriétés magnétiques de l'acier : la perméabilité magnétique diminue et le champ coercitif augmente.

Une augmentation de la teneur en carbone dans un acier ferritique occasionne par exemple une augmentation de la fraction volumique de perlite, ce qui se traduit donc par un durcissement magnétique de l'acier.

II.4.3. Effets des défauts de microstructure de l'acier

a. Joints de grains

Les joints de grains sont des défauts directement en lien avec la taille de grains car plus les grains sont de petites dimensions, plus la concentration en joints de grains dans le matériau est importante. Les joints de grains vont gêner le mouvement des parois de Bloch donc une diminution de la taille de grains provoque une diminution de la perméabilité une augmentation du champ coercitif.

Le bruit Barkhausen est également impacté par la taille de grains, en effet, une augmentation de la taille de grains provoque une augmentation du volume des domaines de Weiss ce qui favorise un large mouvement des parois de Bloch et provoque des signaux de Barkhausen d'intensité importante et donc plus facilement détectable. Mais d'un autre côté, ce phénomène provoque une diminution du nombre de domaines de Weiss ce qui limite la fréquence du bruit de Barkhausen

b. Défauts ponctuels et précipités

Pour le cas de l'acier par exemple, les impuretés les plus influentes sont représentées par les atomes de carbone qui précipitent sous la forme de cémentite et peuvent se combiner et ainsi former des inclusions. Leur influence est fonction de leur taille : une taille de précipité de l'ordre de l'épaisseur de la paroi a une influence maximale.

Alors, la perméabilité magnétique diminue et le champ coercitif augmente (durcissement magnétique) si :

- si la teneur en carbone augmente,
- la taille des grains diminue,
- la concentration en précipités (de dimension similaire aux parois de Bloch) augmente,
- la concentration en dislocations augmente (augmentation de l'écrouissage).

II.5. Mesure du bruit Barkhausen

Dans le contrôle non destructif, on mesure le bruit par différents dispositifs qui sont généralement composé d'une chaîne de mesure comportant une sonde (excitation et détection

intégrées) et d'un système d'acquisition du signal de Barkhausen puis tracer le cycle d'hystérésis pour déterminer les propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques.

II.5.1. Chaîne de mesure

C'est le même appareillage qui sert à la mesure du cycle d'hystérésis et du bruit Barkhausen.

Il y a deux parties dans l'équipement :

- l'application d'un champ magnétique variable au barreau testé,
- la mesure des phénomènes Barkhausen ou du cycle d'hystérésis.

Le schéma de la figure II. 3. illustre la chaîne de mesure d'un 3MA :

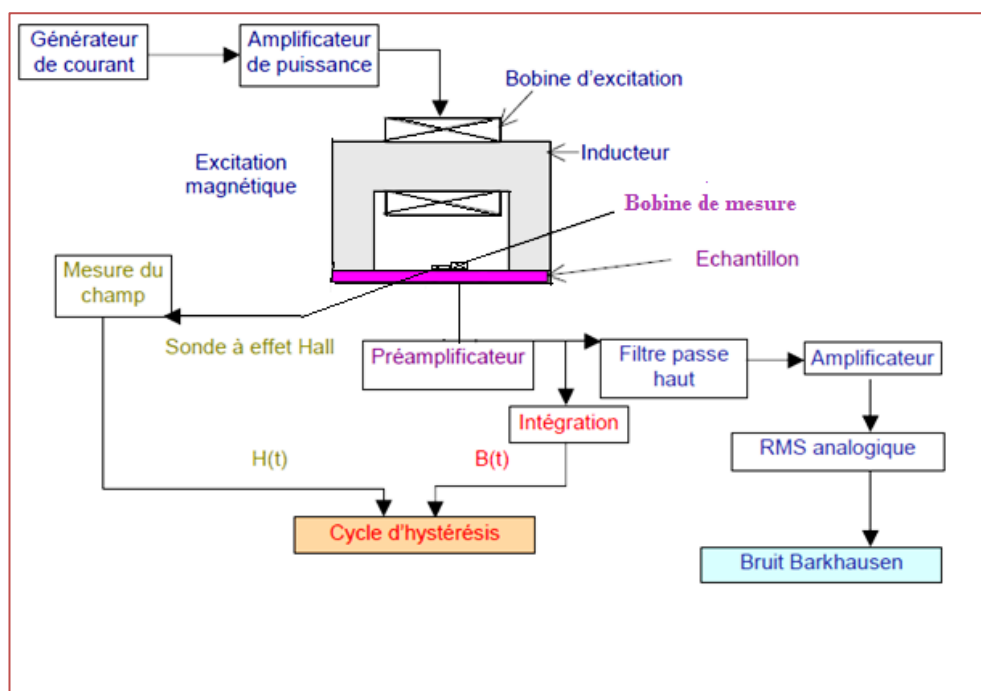


Figure II-3 Chaîne de mesure du bruit Barkhausen et le cycle d'hystérésis

Le principe consiste, d'une part, à provoquer la réorganisation de la microstructure en appliquant un champ magnétique variable et d'autre part, à détecter et à mesurer le bruit Barkhausen produit par les événements de magnétisation élémentaires.

i) L'excitation

Afin de provoquer la réorganisation de la microstructure magnétique et donc d'obtenir la réponse Barkhausen de l'échantillon, l'application d'un champ magnétique variable est nécessaire. Ce champ magnétique est appliqué à l'échantillon à l'aide bobine d'excitation via un inducteur en forme de U, un courant variable alimente cette bobine et engendre ainsi l'apparition d'un champ induit lui-même variable dans le circuit magnétique constitué de l'inducteur et de l'échantillon sondé.

Afin de conserver un bon couplage magnétique entre ces deux éléments, l'échantillon est maintenu plaqué contre l'inducteur par le biais de vis de serrage localisées à chaque extrémité de l'inducteur [10].

Deux paramètres vont avoir une influence sur la mesure du bruit Barkhausen :

L'amplitude maximale du champ appliqué et la vitesse de magnétisation.

ii) Détection de la mesure

Le même appareillage permet de réaliser à la fois la mesure du cycle d'hystérésis et la mesure du bruit Barkhausen. Le capteur est le même.

Les événements de magnétisation élémentaires induisent des variations locales de flux qui vont être détectées par une bobine de mesure. L'ensemble des impulsions produit un bruit qui se superpose à la tension induite par la variation globale du flux. Il faut donc filtrer la tension aux bornes de la bobine afin de ne sélectionner que le seul signal Barkhausen. On obtient ainsi le bruit en fonction du champ appliqué.

Dans le cas du cycle d'hystérésis, le système va réaliser une intégration numérique de tout le signal recueilli [13] de la tension induite à partir de flux magnétique Φ , d'après la loi de Lenz-Faraday :

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Et } \Phi = B.S \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = S. \frac{dB}{dt} \Rightarrow dB = \frac{1}{S} .d\Phi \quad (\text{II.2})$$

$$\text{D'où : } dB = - \frac{1}{NS} .e(t).dt \quad (\text{II.3})$$

En utilisant cette relation afin d'obtenir l'évolution de l'induction $B(t)$ en fonction du temps, puis en fonction du champ appliqué grâce à la relation suivante :

$$B(t) = - \frac{1}{NS} \int e(t).dt \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas du bruit Barkhausen, le signal recueilli aux bornes de la Bobine de mesure va être filtré afin de ne conserver que la partie haute fréquence du signal à l'aide d'un filtre puis une amplification du signal est réalisée.

Nous ne travaillons pas avec le signal brut mais avec l'enveloppe : RMS (Root Mean square) de la tension (figure II.4) :

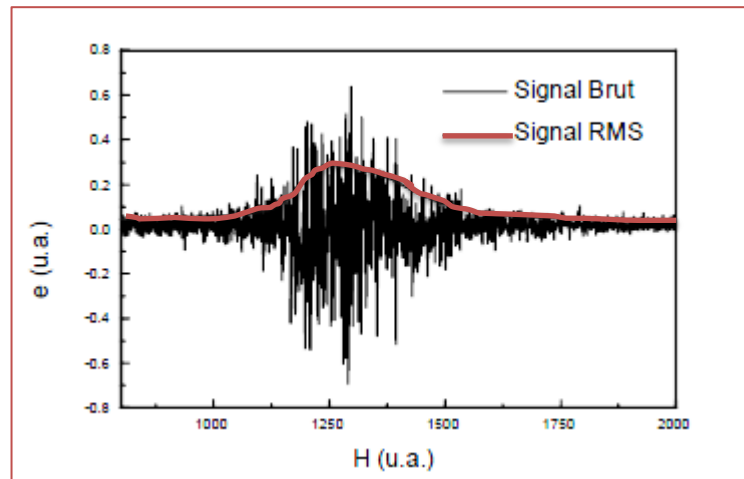


Figure II-4 Signaux Barkhausen brut et RMS

Ce signal RMS est non seulement reproductible mais permet en plus une exploitation plus rapide et plus pratique des résultats. Par contre, cette mesure RMS s'accompagne irrémédiablement d'une perte d'informations puisque le signal est lissé. Ce signal est obtenu grâce à une intégration sur une courte période T à optimiser.

$$\text{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} e(t)^2 \cdot dt}$$

Le choix de T est primordial puisqu'il définit l'intensité du lissage [14]. La Figure II-5 représente le signal bruit Barkhausen mesuré sur un échantillon donné.

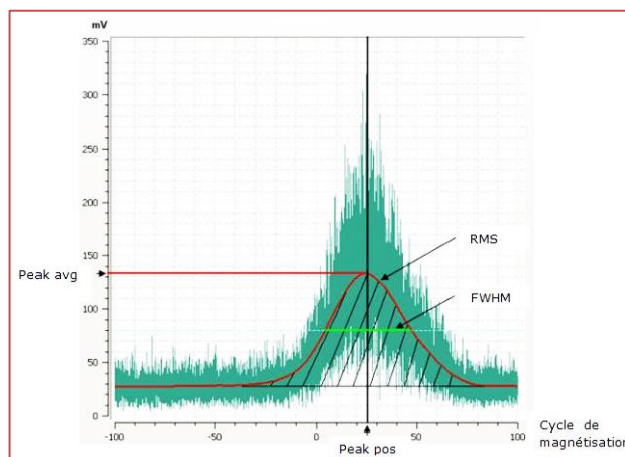


Figure II-5 Exemple de signal de bruit Barkhausen et paramètres associés

Pour exploiter les signaux du bruit Barkhausen acquis, l'équipement utilisé extrait plusieurs paramètres de ces données. Il s'agit de :

- Root mean square (RMS) : aire de l'enveloppe
- full width at half maximum (FWHM) : corde à la mi-hauteur
- Peak voltage : tension du maximum de l'enveloppe du bruit

- Peak position : position du maximum de l'enveloppe du bruit
- Aire du spectre du bruit
- Nombre de pics mesurés [15]

Différents dispositifs adoptés pour les mesures de bruit Barkhausen : le 3MA « Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis », ou le MikroMach « Mobil Micro Magnetic Analysis and Characterization » sont développés par la firme Fraunhofer IZFP à Saarbruecken en Allemagne.

II.6. 3MA: « Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis » et MikroMach: « Mobil Micro Magnetic Analysis and Characterization »

Ces 2 systèmes ont été développés par l'Institut Fraunhofer IZFP ; ils permettent via des mesures magnétiques spécifiques (courant de Foucault, analyse d'harmonique, perméabilité incrémentale, ..) d'explorer, en ligne de production, la microstructure à la surface du matériau en fonction des traitements thermiques et mécaniques subis lors de son processus de fabrication. Ces systèmes utilisent des méthodes micro magnétiques et électromagnétiques en plus de l'analyse MBN afin d'obtenir plus d'informations sur la matière.

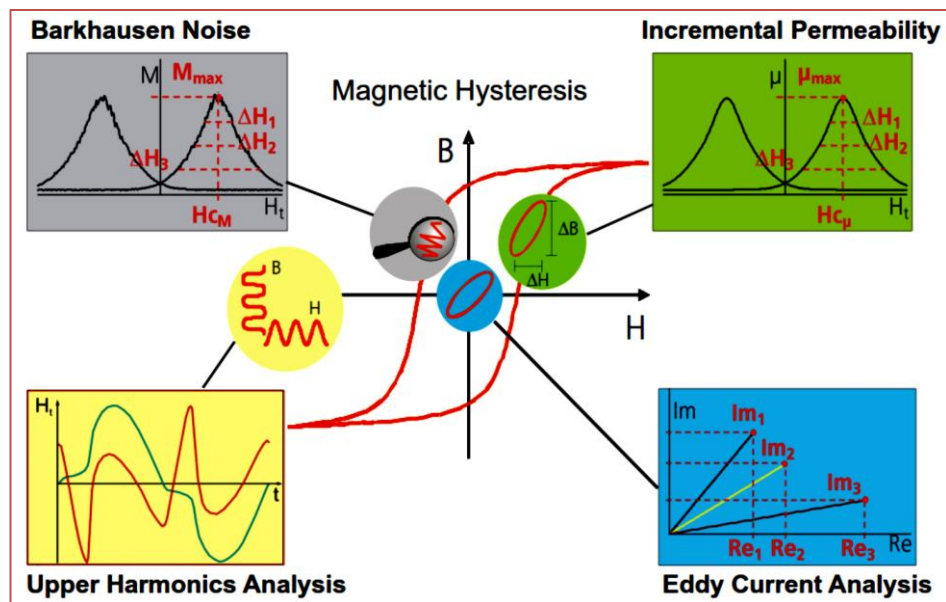


Figure II-6 Différents signaux obtenu par le MikroMach et le 3MA

L'avantage que présente le 3MA sur le MikroMach, c'est que le 3MA contrairement au MikroMach permet de tracer le cycle d'hystérésis. En effet, ce cycle constitue une signature des matériaux magnétiques.

II.6.1. Description du système 3MA

Le système 3MA permet de mettre en œuvre 4 techniques de mesures différentes : courants de Foucault, analyse harmonique du champ magnétique, bruits de Barkhausen et perméabilité incrémentale.

Ce système représenté sur la Figure III.7, se compose d'une unité de commande et d'évaluation qui constitue le cœur du système (capteur), un bloc comportant l'alimentation électrique d'excitation et différents blocs de mesures et de traitements analogiques des données. Le tout est piloté à distance via un PC [12].

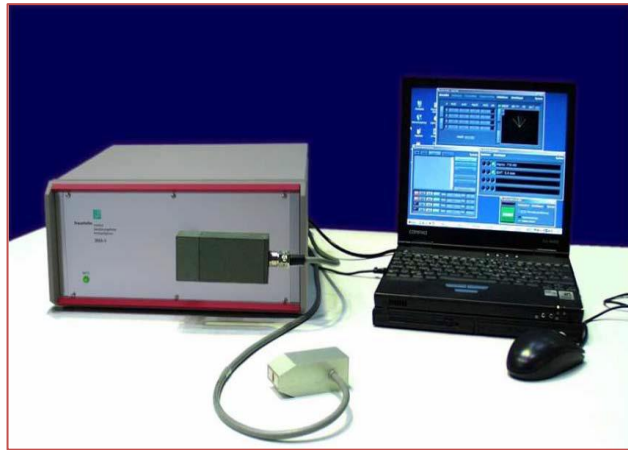


Figure II-7 Equipement et logiciel 3MA piloté par un PC

La figure suivante décrit le dispositif de manière plus détaillée et simplifiée.

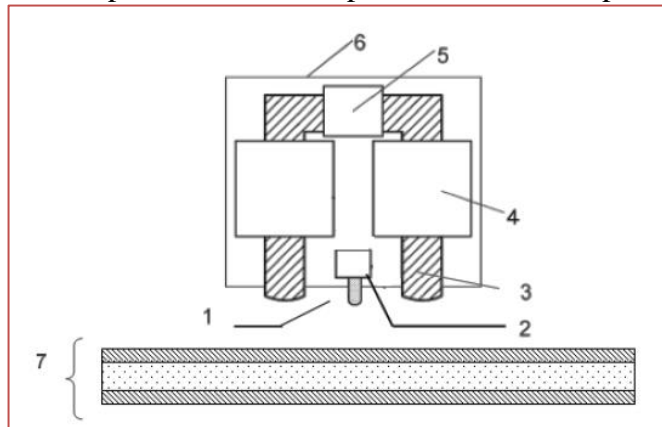


Figure II-8 Schéma bloc du système 3MA, 1-sonde à effet Hall, 2- bobine de détection, 3-culasse, 4-bobine d'excitation, 5- bobine de référence, 6-blindage, 7-échantillon

Les principales composantes sont décrites ci-après et sont utilisées pour une ou plusieurs méthodes de détection :

- 3 et 4 : Une bobine d'excitation basse fréquence excite perpendiculairement l'échantillon et une culasse permettent de fermer le circuit magnétique

- Bobine de détection: c'est un bloc inductif permettant de palper la surface de l'échantillon afin de mesurer l'interaction avec le matériau et les effets des courants induits.
- Sonde à effet Hall: elle est placée au centre du système à quelques millimètres de l'échantillon. Elle permet de mesurer le champ tangentiel à la surface de l'échantillon.

II.6.2. Description du système MikroMach

Le système MikroMach «Mobil Micro Magnetic Analysis and Characterization» représenté sur la Figure II.9.

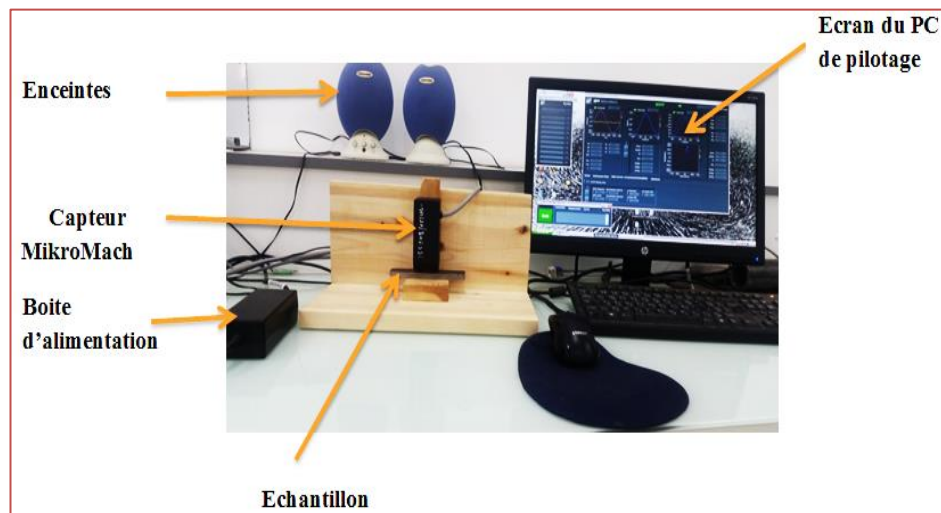


Figure II-9 Dispositif de mesure globale, adopté pour nos mesures par bruit Barkhausen

Le Dispositif MikroMach est un périphérique de poche, qui se compose d'une culasse « Yoke », d'une bobine d'excitation « Solénoïde », d'un capteur à effet Hall « Sensor », d'un générateur d'énergie et de l'électronique correspondante et est relié à un ordinateur portable à partir duquel l'appareil est contrôlé et les données sont traitées et visualisées [10].

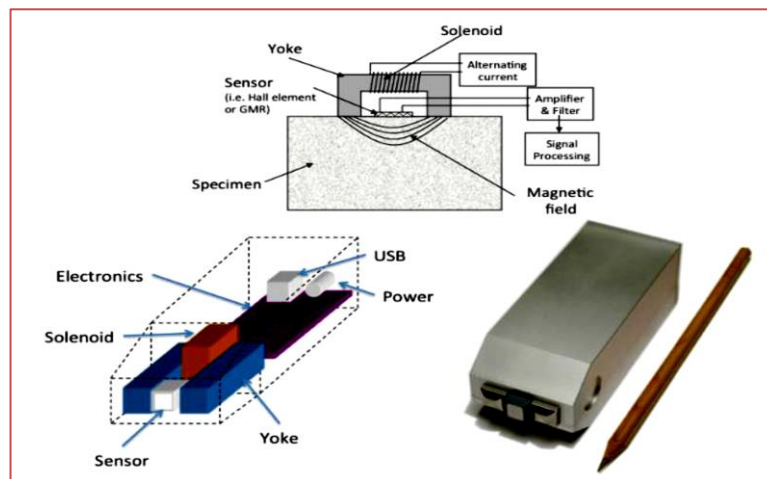


Figure II-10 Système MikroMach pour la caractérisation électromagnétique

Le couplage magnétique entre l'inducteur et l'échantillon de matériau ferromagnétique qui va être contrôlé forment un circuit d'aimantation fermée : un champ magnétique est appliqué à l'échantillon via un inducteur en forme de U, entouré d'une bobine d'excitation. Une tension, de forte amplitude, alimente cette bobine et engendre un champ lui-même variable dans la culasse et dans l'échantillon.

La réponse du matériau à ce champ magnétique est mesurée par le capteur de champ magnétique « capteur à effet Hall » qui doit être maintenu perpendiculairement à la surface de l'échantillon.

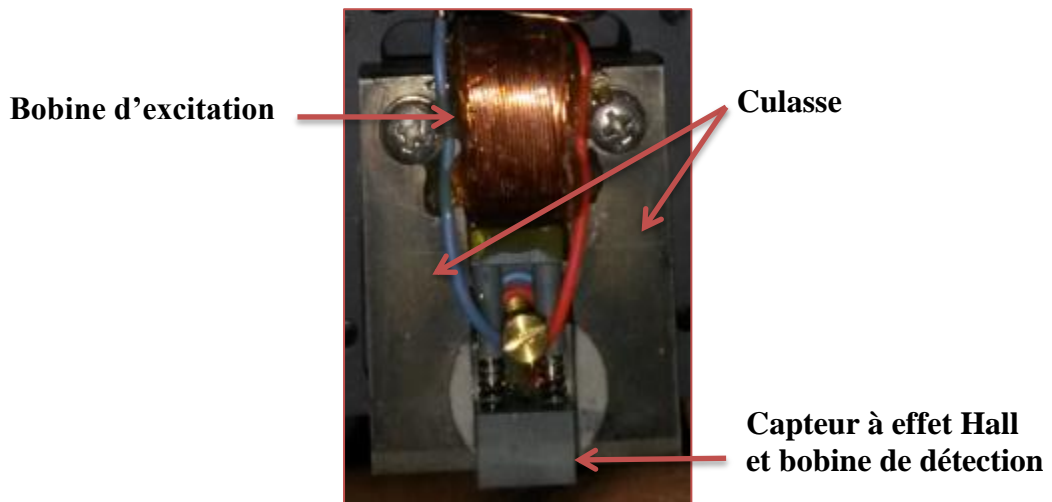


Figure II-11 Capteur MikroMach

Ce capteur envoie les données obtenues : champ tangentiel, bruit Barkhausen, perméabilité incrémentale et impédance courants de Foucault, qui sont mesurés par bobine de détection et le capteur à effet Hall au PC de contrôle.

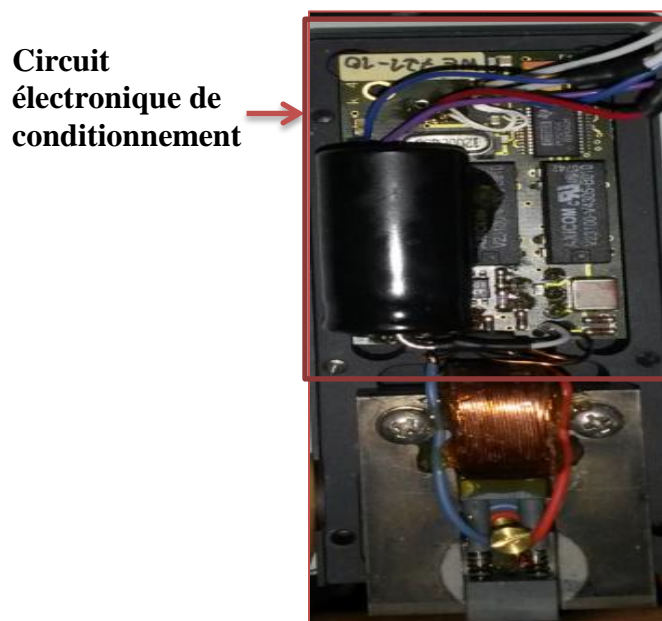


Figure II-12 Capteur MikroMach et chaîne de mesure

II.6.2.1. Enregistrement et traitement des données : logiciel « MMS »

Le logiciel MMS « Micro Magnetic System » développé par IZFP permet l’acquisition du signal RMS de la réponse du bruit Barkhausen du matériau évalué, qu’à l’analyse Harmonique, et à la variation de la perméabilité incrémentale et l’impédance due aux courants de Foucault aux cours de l’excitation magnétique, de saturation à saturation (figure II.13)

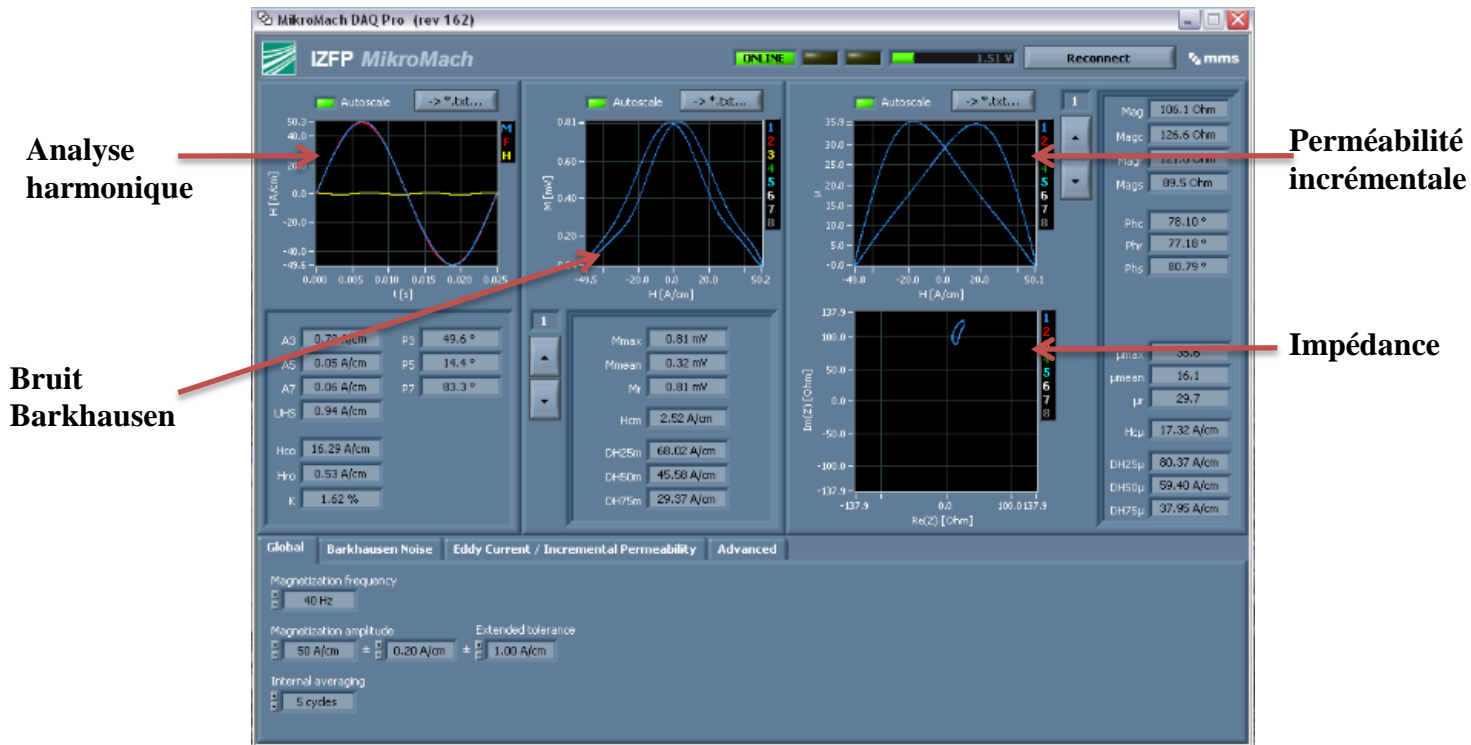


Figure II-13 Logiciel MMS et paramètres associés

a. Bruit Barkhausen magnétique

Lorsque le champ magnétique tangentiel appliqué à la surface provoque le mouvement des parois de Bloch dans le matériau ferromagnétique de façon à faire croître les domaines les mieux orientés par rapport au champ appliqué. Ces parois sont déplacées par des sauts discrets et un bruit Barkhausen est produit.

L’amplitude du signal Barkhausen est principalement dépendante de la taille et du nombre des sauts de parois.

Cette tension est mesurée par la bobine de détection et filtré à l’aide de filtres passe-haut. puis, ce signal est rectifié, filtré passe-bas pour recevoir l’enveloppe de la haute fréquence contenu du bruit, amplifiée et puis lissée (RMS) .

Les résultats obtenus permettent de corréliser les paramètres de mesures telles que l’amplitude maximale M_{Max} et sa position H_{Cm} , M_{mean} et M_r :

M_{Max} : L’amplitude moyenne maximale des pics du signal RMS

H_{cm} : Le champ coercitif. ($H_{cm} = H_{co}$)

M_{mean} : La valeur moyenne du RMS.

M_r : Le bruit obtenu pour un champ d'excitation nul.

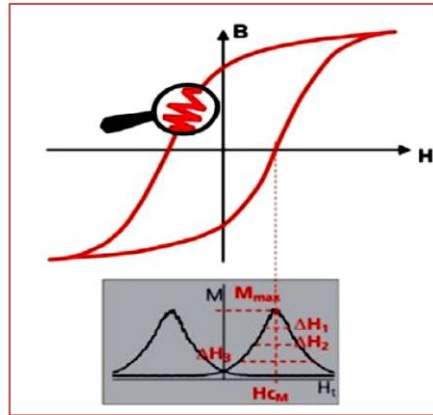


Figure II-14 Représentation du signal obtenu par la mesure de bruit Barkhausen et l'hystérésis qui correspond de ce signal

b. Analyse harmonique en champ tangentiel

L'analyse harmonique exploite la réponse de l'échantillon à l'excitation magnétique, en mesurant le champ magnétique réellement dans l'échantillon par le capteur à effet Hall. Le signal détecté donne la variation temporelle du champ tangentiel en fonction du temps (Figure II.15) dans l'air au-dessus de l'échantillon qui par continuité est égale à celui existant à la surface.

Compte tenu de la non-linéarité du matériau, le signal temporel récupéré n'est pas sinusoïdal. Une analyse en série de Fourier est alors faite pour déterminer sa composition harmonique. Compte tenu de la symétrie du signal, la transformée de Fourier est composée uniquement d'harmoniques d'ordres impairs, d'amplitude ($A_1, A_3, A_5, \dots, A_n$) et de phase ($\theta_1, \theta_3, \theta_5, \dots, \theta_n$) Le coefficient de distorsion du signal est alors quantifiée en utilisant la formule suivante définie selon :

$$k=100. \sqrt{\frac{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2}{A_1^2}}$$

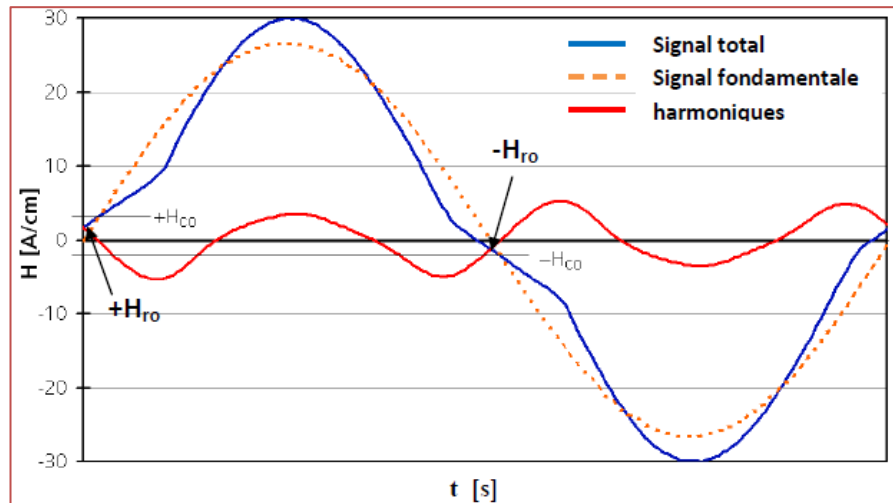


Figure II-15 Signal d'analyse d'harmonique

Une caractéristique particulière d'analyse d'harmoniques a été développée à l'IZFP, il s'agit de déterminer via ce signal une valeur approchée du champ coercitif comme le montre la Figure II.10, l'intersection du signal totale (détekté) avec le signal fondamentale dans la zone du passage par zéro donne la valeur approximative du champ coercitif [12].

L'analyse de cette courbe permet de remonter à certains paramètres précis :

- H_{meas} : Signal total
- H_{fund} : Signal fondamentale
- H_{harm} : Les harmoniques
- H_{co} : Le champ qui représente l'intersection entre le H_{fund} et le H_{meas} .
- H_{ro} : Le champ qui représente l'intersection entre le H_{harm} et H_{meas} .

c. Perméabilité incrémentale

Ce mode sollicite les deux sources d'excitation basse et haute fréquence : D'une part un électro-aimant qui applique un champ magnétique alternatif à une excitation basse fréquence (dans le cas de l'analyse harmonique) à l'échantillon, d'autre part, il est soumis dans la zone centrale du dispositif à une excitation à haute fréquence (dans le cas qu'il est généré par courants de Foucault), la superposition de ces 2 fréquences forme des cycles mineurs non centrés.

Le signal mesuré décrit l'évolution de la variation de la perméabilité incrémentale, qui représente la pente de ces cycles mineurs.[16]

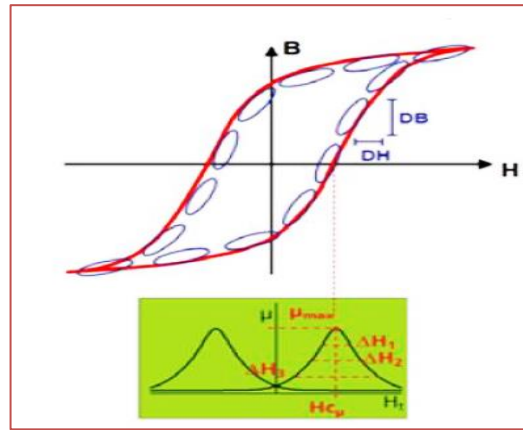


Figure II-16 Courbe de la perméabilité incrémentale obtenue et cycle d'hystérésis qui correspond

L'analyse de cette courbe permet de remonter au champ coercitif et des différents paramètres précisés

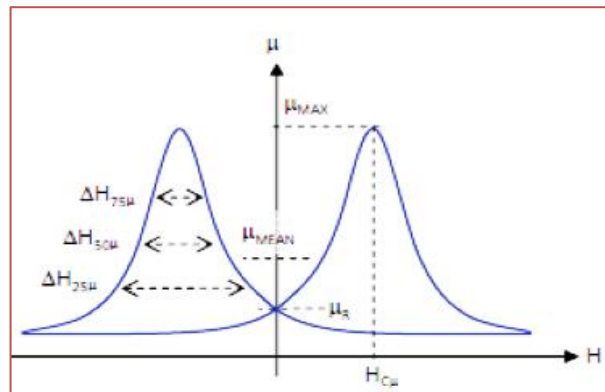


Figure II-17 Perméabilité incrémentale en fonction de H

L'exploitation la courbe de perméabilité incrémentale est très riche, en effet, différents paramètres sont extraits :

- $\Delta H_{25\mu}$, $\Delta H_{50\mu}$, $\Delta H_{75\mu}$: Largeur de la courbe à $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ de la courbe, ils donnent une indication sur l'état magnétique de la surface à différents niveaux du cycle et donc nous permet de corréler les paramètres à la contrainte, limite élastique, entrefer, etc.
- $H_{c\mu}$: Champ coercitif qui correspond à la valeur du champ au pic de la tension.
- μ_{mean} : Perméabilité incrémentale moyenne correspond à la tension moyenne sur une période.
- μ_R : Perméabilité incrémentale à la rémanence correspond à la tension à la rémanence et le champ nulle ($H=0$).

L'analyse de la courbe de perméabilité incrémentale est sensible à la densité de dislocations, à la présence d'inclusion, à la taille de grains et ainsi qu'au ratio des éléments de la composition chimique de l'acier.

d. Impédance due aux courants de Foucault

La mesure de la tension aux bornes de la bobine de détection permet via un traitement spécifique de déterminer la partie réelle et imaginaire, ou le module et la phase de l'impédance de la bobine de détection, son analyse permet de calculer les différents paramètres précisés tel que :

- Mag : Quantité moyenne de l'impédance aux bornes de la bobine de détection
- $MagR$: Impédance à la rémanence ($H = 0$)
- $MagC$: Impédance de la bobine de détection au champ coercitif ($H = H_c$)
- $MagS$: Impédance de la bobine à la saturation ($B = B_{sat}$)

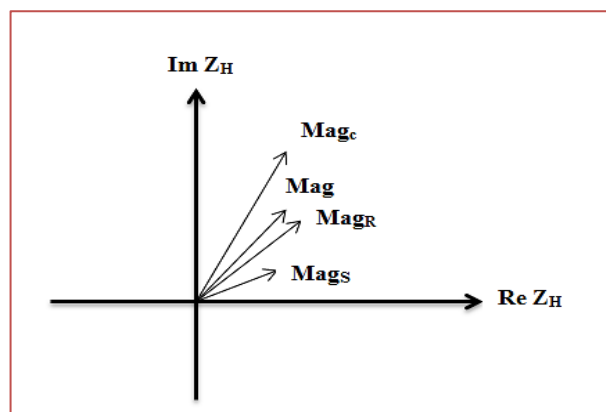


Figure II-18 Plan d'impédance

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini le principe de la mesure de bruit Barkhausen, ainsi nous avons décrit la sensibilité de cette méthode à la microstructure du matériau ferromagnétique.

Ensuite, nous avons présenté les deux systèmes pour la caractérisation électromagnétique adoptés pour la mesure de bruit Barkhausen et nous avons focalisé sur le MikroMach afin de maîtriser ce dispositif en raison de sa disponibilité au niveau du laboratoire LPM.

Enfin, nous avons décrit les différents paramètres de logiciel MMS et leurs applications dans le domaine du contrôle non destructif.

III. Procédures expérimentales

III.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats obtenus par la méthode de bruit Barkhausen sur l'acier XC38 en utilisant le système MikroMach pour l'évaluation des paramètres magnétiques de cet acier.

Les mesures ont été réalisées sur différents états métallurgiques de l'acier XC38 suivant des traitements thermiques réalisés au laboratoire, puis nous comparons et interprétons les résultats obtenus.

III.2. Matériau étudié

Notre étude est effectuée sur l'acier XC38, c'est un acier à moyenne teneur au carbone, très utilisé en fabrication mécanique de par sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques, il est apte aux traitements thermiques.

Tableau III-1 Normes principales de l'acier XC38

NF	UNI	DIN	W.Nr	EURONORM	AISI-SAE
XC38	C35	CK35	1181	2C35	1038

Le tableau III-2 représente la composition chimique de l'acier utilisé :

Tableau III-2 Composition chimique de l'acier XC38 en %

C	S	Mn	P	Si
0,32 - 0,39	≤ 0,035	0,50 - 0,80	≤ 0,035	0,40 maxi

Le tableau suivant présente certaines caractéristiques mécaniques de l'acier XC38 :

Tableau III-3 Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)

R _m [N/mm ²]	Re [N/mm ²]	A %	Dureté [HRb]
500 / 550	245 / 300	18 / 19	82-84

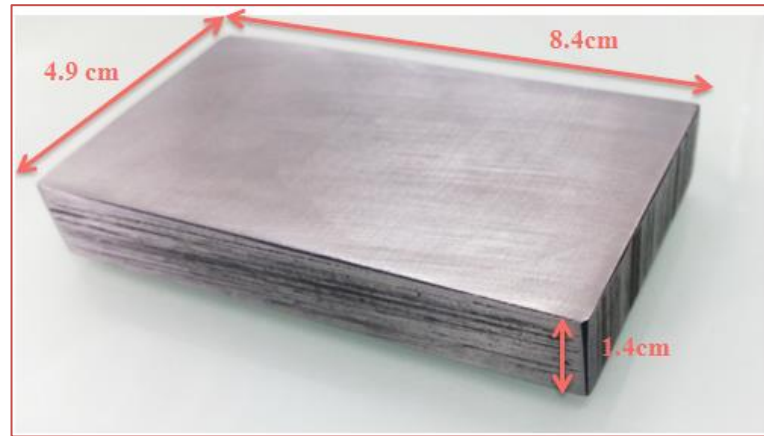


Figure III-1 Echantillon utilisé de l'acier XC38

III.3. Protocole expérimental

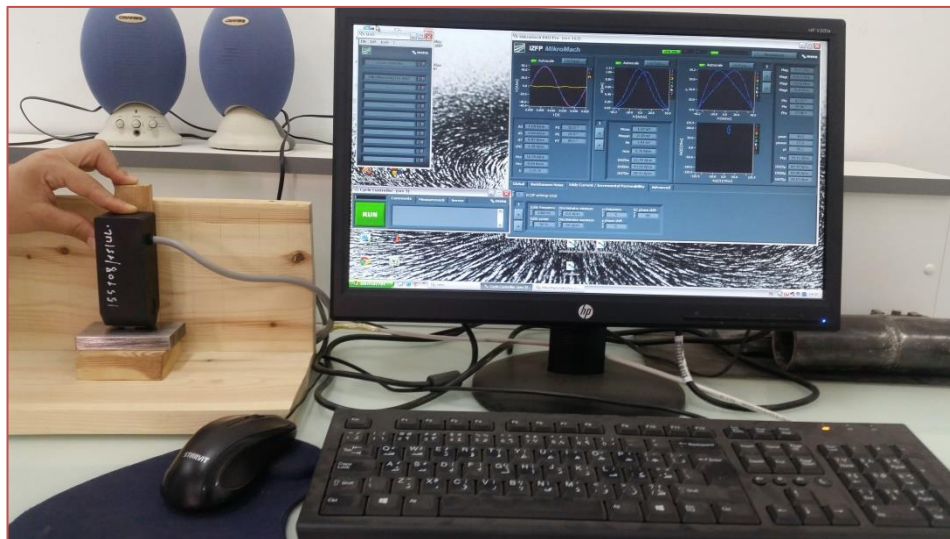


Figure III-2 Procédure expérimentale par le MikroMach

Afin d'évaluer certaines propriétés magnétiques de l'acier XC38 par la méthode de bruit Barkhausen :

- Tout d'abord, une magnétisation de l'échantillon est réalisée à l'aide de la bobine d'excitation magnétique du capteur MikroMach, ce dernier doit être maintenu perpendiculairement à la surface de l'échantillon (figure III-2).
- La réponse de l'échantillon à l'excitation magnétique est réalisée grâce à une bobine de mesure et un capteur à effet Hall. L'acquisition et le traitement des différents signaux est faite par le logiciel MMS qui donne les différentes mesures telles que : bruit Barkhausen, analyse harmonique, perméabilité incrémentale, impédance aux bornes de la bobine de détection due aux courants de Foucault.

- En fin de mesure, tous les signaux sont enregistrés sous format de fichiers texte, puis exploités sous MatLab.

III.4. Caractérisation de l'acier XC38

Les mesures par bruit Barkhausen sont effectuées à fréquence de 40 Hz et d'amplitude de magnétisation de 50 A/cm, les résultats obtenus sont présentés comme suit :

III.4.1. Analyse harmonique en champ tangentiel

La figure III-2 illustre l'analyse harmonique obtenue pour l'acier XC38 en fonction du temps et les valeurs de H_{co} , H_{ro} et K sont extraits dans le tableau III-3 :

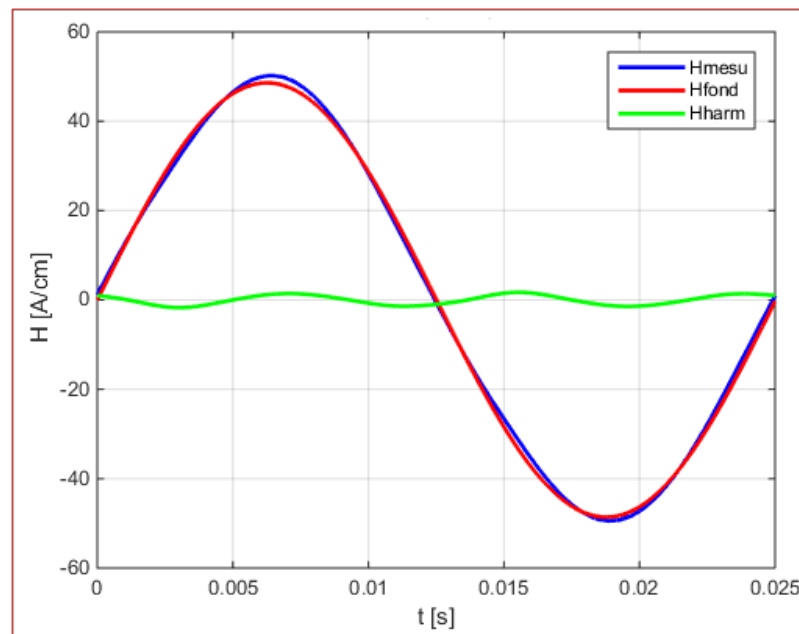


Figure III-3 Analyse harmonique à l'état brut

Le signal du champ tangentiel n'est pas sinusoïdal, impliquant bien que le matériau est sollicité dans la zone non linéaire, d'où l'apparition d'harmoniques.

H_{co} [A/cm]	H_{ro} [A/cm]	K [%]
13.75	0.97	3.06

Tableau III-4 Mesure obtenue par l'analyse harmonique de l'acier XC38

III.4.2. Mesure du bruit Barkhausen

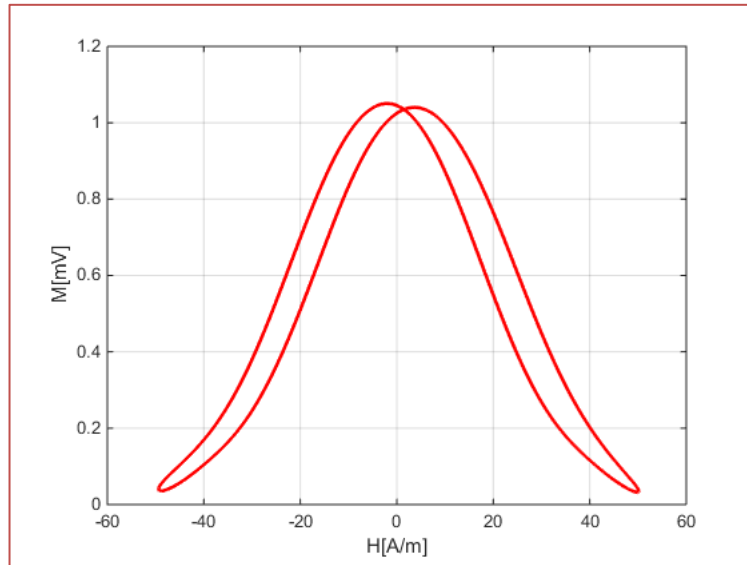


Figure III-4 Tension du bruit Barkhausen de XC38 à l'état brut

La figure III-4 représente la signature du bruit Barkhausen enregistrée sur l'acier XC38 à l'état brut. En termes de position de pic, on peut voir que l'acier présente un comportement d'un acier doux (pic situé en champ faible). On peut expliquer ceci par le fait que la taille des grains est grande et est accompagnée d'une diminution de la concentration en joints de grains dans le matériau, ce qui favorise un large mouvement des parois de Bloch et provoque des signaux de Barkhausen d'intensité importante.

Différents paramètres de mesures utiles extraits du bruit Barkhausen sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III-5 Paramètres de mesures extrait du bruit Barkhausen

H _{cm} [A/cm]	M _{mean} [mV]	M _{max} [mv]	M _r [mv]	DH _{25m} [A/m]	DH _{50m} [A/m]	DH _{75m} [A/m]
2.77	0.40	1.05	1.04	63.80	45.95	30.46

III.4.3. Mesure de la perméabilité incrémentale

La figure III-5 représente la perméabilité incrémentale en fonction du champ d'excitation.

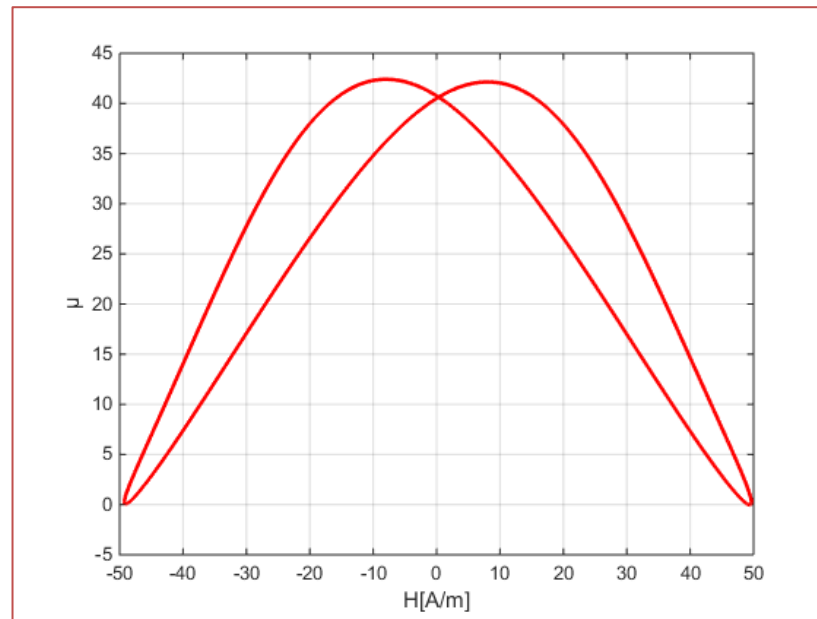


Figure III-5 Perméabilité incrémentale de XC38 à l'état brut

Ce signal présente la variation de la perméabilité incrémentale en différents points du cycle d'hystérésis. Les champs correspondants aux pics de ce signal représentent la valeur du champ coercitif, alors que les deux passages à zéro, correspondent au champ de saturation (maximum de l'induction) $H_s = 49 \text{ A/m}$. En effet, une augmentation de la taille des grains dans ce cas où l'acier XC38 présente un comportement d'un acier doux provoque une augmentation de la perméabilité comme on l'observe sur cette courbe.

L'analyse de cette courbe permet de remonter aux différents paramètres utiles suivants (Tableau III-6) :

Tableau III-6 Différents paramètres extraits de la perméabilité incrémentale

μ_{\max}	μ_{mean}	μ_r	$H_{c\mu} = H_c$	$DH_{25\mu}$ [A/m]	$DH_{50\mu}$ [A/m]	$DH_{75\mu}$ [A/m]
42.3	19.7	41.1	8.02	79.52	61.09	41.06

III.4.4. Cycle d'hystérésis

Afin d'obtenir le cycle d'hystérésis, nous avons intégré la courbe de la perméabilité incrémentale relative sous MatLab. En effet, la perméabilité incrémentale représente la perméabilité différentielle à un facteur près :

$$\mu_{\text{diff}} = \alpha \mu_{\text{inc}}$$

La figure III-6 représente le cycle d'hystérésis de l'acier XC38 à l'état brut tirée à partir de la perméabilité incrémentale.

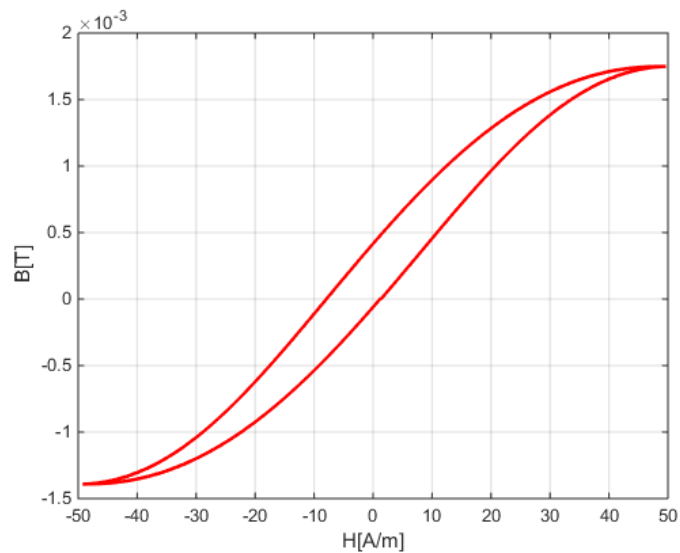


Figure III-6 Cycle d'hystérésis d'XC38 à l'état brut

On observe le comportement doux de cet acier (H_C est faible) à l'état brut à partir de ce cycle d'hystérésis, ce qui implique que l'intégration de la perméabilité incrémentale relative nous a permis de générer le cycle d'hystérésis à un facteur près par rapport au cycle d'hystérésis réelle afin de montrer le comportement magnétique (doux ou dur) d'un matériau.

III.5. Caractérisation d'acier XC38 après trempe à l'air

Cet acier a été soumis à une température de 500°C durant 20 min suivie d'une trempe à l'air.



Figure III-7 Traitement thermique appliqué sur l'acier XC38

La mesure par bruit Barkhausen est réalisée sur acier XC38 après la trempe et les résultats obtenus sont présentés comme suit :

III.5.1. Analyse harmonique en champ tangentiel

La figure III-8 illustre l'analyse harmonique en champ tangentiel obtenue pour l'acier XC38 en fonction du temps après la trempe à l'air et les valeurs de H_{co} , H_{ro} et K sont donnés dans le tableau III-7 :

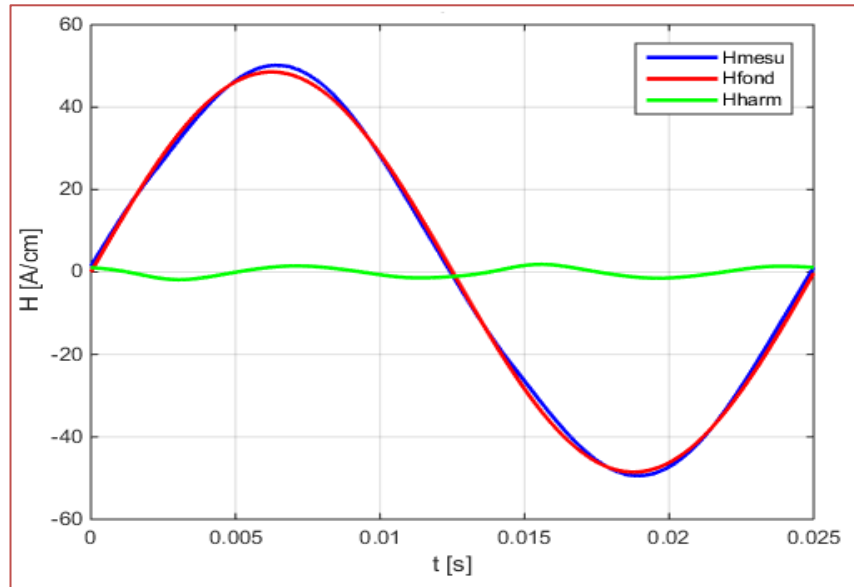


Figure III-8 Mesure harmonique de l'acier XC38 trempé

Tableau III-7 Principaux paramètres de bruit Barkhausen

H_{co} [A/cm]	H_{ro} [A/cm]	K [%]
15.20	1.09	3.23

III.5.2. Mesure de bruit Barkhausen

La réponse Barkhausen obtenue pour l'acier XC38 trempé est représenté ci-dessous (figure III-9) :

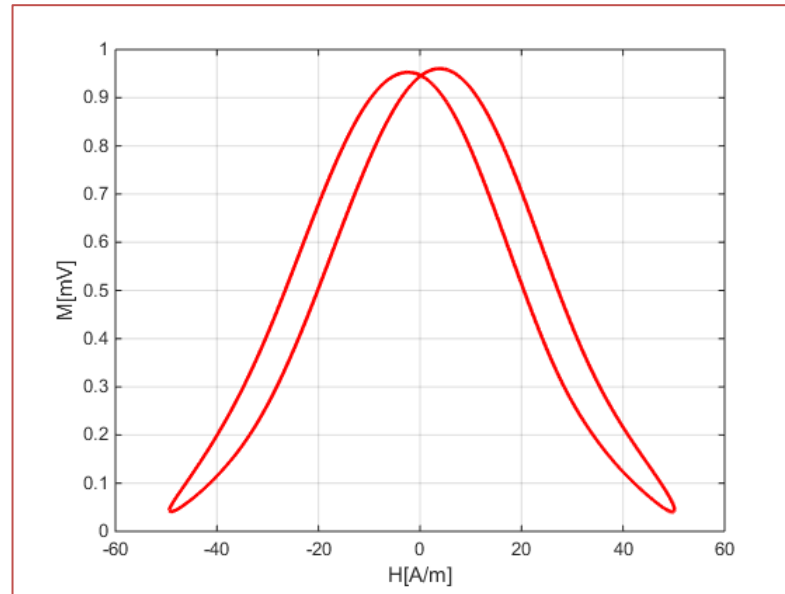


Figure III-9 Courbe de bruit Barkhausen de l'acier XC38 trempé

On observe une diminution de l'intensité de bruit Barkhausen par rapport à l'état brut, ce qui implique une diminution de la taille de grains (affinement des grains) accompagné d'une augmentation de la concentration des joints de grains qui provoque un empêchement de mouvement des parois de Bloch. De ce fait, une augmentation du champ coercitif, ce qui explique la dureté magnétique de cet état métallurgique par rapport à l'état brut de l'acier XC38. En déduit qu'une augmentation de la dureté magnétique est associée à la réduction du signal Barkhausen.

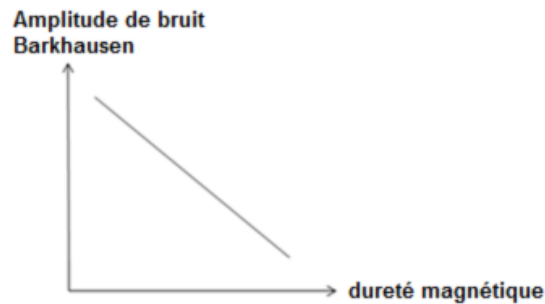


Figure III-10 Relation entre la dureté du matériau et l'intensité du bruit Barkhausen

Différents paramètres de mesures par bruit Barkhausen sont reportées dans tableau III-8 :

Tableau III-8 Différents paramètres de mesures par bruit Barkhausen de l'acier XC38 trempé

H _{cm} [A/cm]	M _{mean} [mV]	M _{max} [mv]	Mr [mv]	DH _{25m} [A/m]	DH _{50m} [A/m]	DH _{75m} [A/m]
3.05	0.38	0.96	0.95	66.59	47.57	31.03

III.5.3. Mesure de la perméabilité incrémentale

La figure III-11 présente la perméabilité incrémentale en fonction du champ d'excitation de l'acier étudié après trempe à l'air

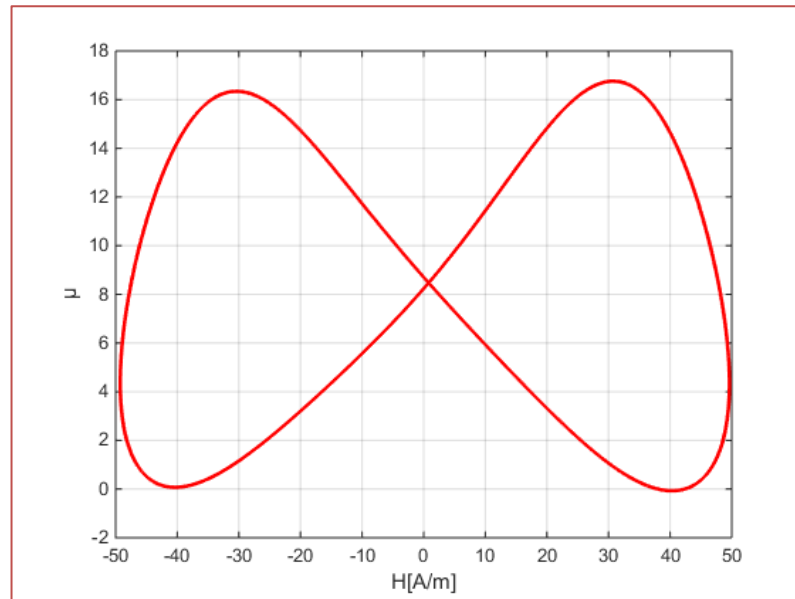


Figure III-11 Perméabilité incrémentale obtenue après la trempe

On observe une diminution de l'intensité de la perméabilité qui correspond à une augmentation de la valeur du champ coercitif par rapport à l'état brut, ce qui explique que son aimantation est plus difficile que l'autre état.

L'analyse de cette courbe permet de remonter aux différents paramètres utiles suivants (Tableau III-9)

Tableau III-9 Mesures obtenues par perméabilité incrémentale

μ_{\max}	μ_{mean}	μ_r	$H_{c\mu}$	$DH_{25\mu}$ [A/m]	$DH_{50\mu}$ [A/m]	$DH_{75\mu}$ [A/m]
16.6	7.8	8.8	30.52	66.11	48.80	31.18

III.5.4. Cycle d'hystérésis de l'acier XC38 trempé

La figure III-12 représente le cycle d'hystérésis de l'acier XC38 après trempe à l'air tirée à partir de l'intégration de la courbe de la perméabilité incrémentale relative.

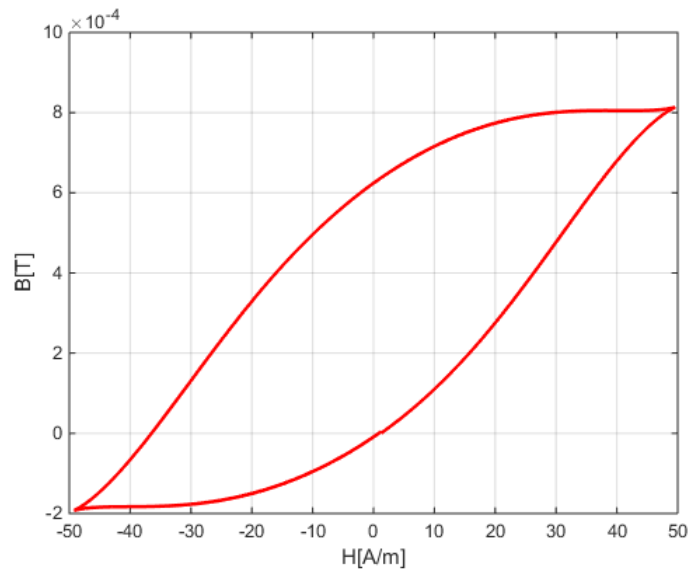


Figure III-12 Cycle d'hystérésis de l'acier XC38 trempé à l'air

Cycle d'hystérésis à un facteur près de l'acier XC38 trempé montre un élargissement d'hystérésis et une diminution de l'induction par rapport à l'état brut.

III.6. Conclusion

- ✓ Tout le travail expérimental a été réalisé à l'aide du MikroMach (Mobil Micro Magnetic Analysis Characterization), appareillage fonctionnant sur la base du bruit Barkhausen.
- ✓ Les signaux relatifs au bruit Barkhausen, en l'occurrence le signal RMS du bruit Barkhausen, l'analyse harmonique en champ tangentiel et la perméabilité incrémentale ont enregistré et traités sous Matlab.
- ✓ Toutes les mesures ont été réalisées sur l'acier XC38 sous différents états métallurgiques.
- ✓ L'évaluation et l'optimisation des paramètres de cette technique a été faite ce qui nous a permis de montrer la sensibilité de cette technique à la microstructure du matériau étudié au cours de changement de l'état microstructural (brut et trempé à l'air).
- ✓ Le bruit Barkhausen et la perméabilité incrémentale enregistrés sur l'acier XC38 a permis de montrer que le changement de comportement magnétique d'un acier dépend du changement de sa microstructure.
- ✓ L'intégration de la perméabilité incrémentale nous a permis de générer le cycle d'hystérésis utilisant « MatLab ».



Conclusion générale

Conclusion générale

- Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la technique d'évaluation des propriétés magnétiques d'un matériau ferromagnétique en particulier l'acier XC38 par bruit Barkhausen. Les contrôles par bruit Barkhausen représentent de grandes potentialités dans le développement des applications de contrôle non destructif des matériaux.
- L'étude théorique menée a permis la compréhension des phénomènes électromagnétiques tels que la génération du bruit Barkhausen, l'évolution de la magnétisation des matériaux jusqu'à saturation et l'évolution du cycle d'hystérésis.
- Tout le travail expérimental a été réalisé à l'aide du MikroMach (Mobil Micro Magnetic Analysis Characterization), appareillage fonctionnant sur la base du bruit Barkhausen.
- Les signaux relatifs au bruit Barkhausen, en l'occurrence le signal RMS du bruit Barkhausen, l'analyse harmonique en champ tangentiel et la perméabilité incrémentale ont été enregistrés et traités sous Matlab.
- Toutes les mesures ont été réalisées sur l'acier XC38 sous différents états métallurgiques.
- L'évaluation et l'optimisation des paramètres de cette technique a été faite ce qui nous a permis de montrer la sensibilité de cette technique à la microstructure du matériau étudié au cours de changement de l'état microstructural (brut et trempé à l'air).
- Le bruit Barkhausen et la perméabilité incrémentale enregistrés sur l'acier XC38 a permis de montrer que le changement de comportement magnétique d'un acier dépend du changement de sa microstructure.
- L'intégration de la perméabilité incrémentale nous a permis de générer le cycle d'hystérésis utilisant « MatLab ».

Références bibliographiques

- [1] KISSA NADJET, « modelisation de l'hysteresis magnetique en vue de son integration dans un code de calcul de champ electromagnetique » Mémoire de Magister, Université de Batna. 2006.
- [2] T. M. BUI Anh, « Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique », p. 126, Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2011.
- [3] M. H. Frăţilă Mircea, « contribution a la prise en compte des pertes fer dans la modelisation des machines electriques par elements finis », Thèse de Doctorat ,Université Lille, 2012.
- [4] B. V. Neamţu, « matériaux compacts magnétiques doux obtenus à l'état nanocristallin à partir de poudres d'alliages ni-fe-x issues de mécanosynthèse », p. 232, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 2010.
- [5] N. Nahouli, « Étude et réalisation d'un hystérésis-graphe d'un système de mesure du cycle d'hystérésis », p. 96. Université Libanaise, 2013.
- [6] R. Rindrarivelo, « Modélisation stochastique de la variabilité des propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques: application sur des stators de machines électriques », p. 171 Thèse de Doctorat ,École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [7] CHELGHOUM LEILA, « étude de l'hystérésis magnétique par le modèle de preisach ». Mémoire de Magister, Université de Batna. 2005.
- [8] S. MEBREK, « Étude des défauts dans les aciers ferromagnétiques par les méthodes électromagnétiques », p. 87, Mémoire de Magister, université de Blida, 2013.
- [9] A. BELKEBIR, « Modélisation -- Identification Paramétrique de L'hystérésis Magnétique Modèle de L. O. CHUA ». Mémoire de Magister, Université de Batna ,2006.
- [10] S. CHETTIH, « Mesure des propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques par bruit Barkhausen, Application aux aciers alliés des pipelines »,Mémoire de Master, Université de Laghouat. 2017.
- [11] L. Arbenz, « Caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux magnétiquement doux : application aux roues polaires de machine à griffes », Thèse de Doctorat ,école doctorale n° 432 : sciences des métiers de l'ingénieur de Lille , 2016.
- [12] Y. Gabi, « Modélisation FEM du système de contrôle non destructif 3MA en ligne de production des aciers dual phase », p. 167, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble , 2012.
- [13] D. Christine, « Caractérisation non destructive des fontes bainitiques (fontes " ADI ") par Bruit Barkhausen et courants de Foucault pulsés », Thèse de Doctorat, Ecole doctorale : matériaux de Lyon ,p. 199, 2004.

[14] Aurélie HUG AMALRIC, « Etude par mesure du bruit Barkhausen de la microstructure et de l'état de contrainte d'aciers biphasés : application aux aciers pour tôle automobile », Thèse de Doctorat ,L'institut national des sciences appliquées de Lyon .p. 252, 2007.

[15] A. TRILLON, S. PETIT et F. DENEUVILLE , « Contrôle de dureté par analyse du bruit Barkhausen », p. 5.

[16] Jon Mikel Lizarralde, « Non-destructive testing of thin strip material,Implementation of the 3MA technique at a steel producing company. » 2017.

Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons à la technique d'évaluation des propriétés magnétiques d'un matériau ferromagnétique en particulier l'acier XC38 par bruit Barkhausen. Les signaux relatifs au bruit Barkhausen, en l'occurrence le signal RMS du bruit Barkhausen, l'analyse harmonique en champ tangentiel et la perméabilité incrémentale ont été enregistrés par le MikroMach (Mobil Micro Magnetic Analysis Characterization). Toutes les mesures ont été réalisées sur l'acier XC38 sous différents états métallurgiques. Le bruit Barkhausen et la perméabilité incrémentale enregistrés sur l'acier XC38 ont permis de montrer que le changement de comportement magnétique d'un acier dépend du changement de sa microstructure. L'intégration de la perméabilité incrémentale nous a permis de générer le cycle d'hystérésis utilisant « MatLab ».

Mots clés : Bruit Barkhausen, matériau ferromagnétique, analyse harmonique, perméabilité incrémentale, Hystérésis

Abstract

In this work, we are interested in the technique of evaluation of the magnetic properties of a ferromagnetic material, in particular on the XC38 steel by Barkhausen noise technique. In this case the RMS signal of the Barkhausen noise, the harmonic analysis of the tangential field and the incremental permeability are recorded by the MikroMach (Mobil Micro Magnetic Analysis Characterization). All measurements are made on XC38 steel under different metallurgical states. The recorded Barkhausen noise and the incremental permeability on XC38 steel, have shown that the change in the magnetic behavior of XC38 depends on the change of its microstructure. The integration of the incremental permeability allowed us to generate the hysteresis cycle, by the use of "MatLab" Environment.

ملخص

من خلال هذا العمل سنقوم بدراسة تقنية تقييم الخواص المغناطيسية للمواد الفيرومغناطيسية باستعمال ضوضاء Barkhausen و نخص بدراسة الفولاذ XC38 و ذلك بتسجيل إشارة RMS لضوضاء Barkhausen, التحليل التوافقي للحقل العرضي و النفاذية الإضافية بواسطة MikroMach (Mobil Micro Magnetic Analysis Characterization).

يتم إجراء جميع القياسات على XC38 في حالات المعدنية المختلفة. أظهرت ضوضاء Barkhausen المسجلة و النفاذية الإضافية المطبقة على فولاذ XC38 أن التغيير في السلوك المغناطيسي لـ XC38 يعتمد على تغيير البنية المجهرية لهذا الفولاذ. سمح لنا تكامل النفاذية الإضافية بتحقيق رسم الدورة التخلفية (Hysteresis), من خلال استخدام "MatLab".

كلمات مفتاحية : ضوضاء Barkhausen, المواد الفيرومغناطيسية, التحليل التوافقي للحقل العرضي, النفاذية الإضافية, الدورة التخلفية (Hysteresis).