

Université SAAD DAHLEB BLIDA

Faculté de Technologie
Département d'électronique

MEMOIRE DE MAGISTER

En électronique

Spécialité : signaux et systèmes

**ETUDE DES DEFAUTS DANS
LES ACIERS FERROMAGNETIQUES
PAR LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES**

Par

MEBREK Smain

Devant Le jury composé de :

A.GUESSOUM	Professeur	Université Saad Dahlab Blida	Président
A.FERDJOUNI	Maître de conférence (A)	Université Saad Dahlab Blida	Examineur
A.HADDAD	Maître de recherche	CSC Chéraga	Examineur
M.ZERGOUG	Professeur	CSC Chéraga	Rapporteur

Blida, 17 janvier 2013

ملخص

إن طرق المراقبة الغير مدمرة بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية طرق تسمح بقياس خصائص المعادن و الكشف عن العيوب و تقدير حجمها.
إن الموجات الكهرومغناطيسية مرتبطة بالخصائص الكهربائية و المغناطيسية للمعادن لذلك تسهل استكشاف التغيرات التي تصيب المعادن.
أن العمل المقدم يستهدف الربط بين هذه الطرق.

RESUME

Le contrôle par les méthodes magnétiques sont des techniques permettant les mesures de certaines propriétés, de dimensions et la détection d'anomalies.

Elles sont sensibles aux trois paramètres (conductivité électrique, perméabilité magnétique et la géométrie de la pièce à contrôler); de ce fait les variables métallurgiques intéressantes devront se référer aux changements de ces paramètres.

A cet effet, notre travail a pour objectif de développer les techniques du contrôle non destructif par courants de Foucault, cycle d'hystérésis et bruit de barkhausen des matériaux, ainsi trouver une corrélation entre elles.

ABSTRACT

Controls by magnetic methods are techniques for measurements of certain properties, dimensions and anomaly detection.

They are sensitive to three parameters (electrical conductivity, magnetic permeability and geometry of the test piece); therefore interesting metallurgical variables should refer to changes in these parameters.

To this end, our work aims to develop techniques of nondestructive eddy current, hysteresis loop and Barkhausen noise materials, and find a correlation between them.

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche exposé dans ce mémoire, a été réalisé au sein du département des procédés électromagnétiques (DPEM) du centre national de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle.

Je tiens à remercier Monsieur **M. YAHY**, directeur général du Centre de recherche d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce projet.

Je remercie en particulier Monsieur **M. ZERGOUG**, responsable du département; de m'avoir accepté dans son équipe, de m'avoir dirigé, de son attention, son amitié et surtout de sa patience.

Je remercie énormément messieurs **BENCHERCHALI** et **KEBIR** d'avoir accepté de faire partie du jury en tant que comité de lecture.

Je remercie vivement Monsieur **GUESSOUM** d'avoir accepté de présider le jury de thèse.

J'exprime aussi mon vif remerciement à messieurs **FERDJOUNI** et **HADDAD** D'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examineur.

Je suis aussi très reconnaissant envers mes collègues du département ainsi l'équipe de l'atelier de soudage, chacun en son nom.

Un grand merci s'adresse en particulier à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu.

Que tout le monde, trouve dans ces quelques phrases, le témoignage de ma profonde gratitude et remerciement.

TABLE DES MATIERS

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	

INTRODUCTION	6
I MAGNETISME	9
1.1 Domaine du contrôle non destructif	9
1.2 Magnétisme	13
1.3 Domaines de Weiss	19
1.4 Evolution du ferromagnétisme	20
1.5 Modèle physique	21
1.6 Bruit de Barkhausen	22
1.7 Cycle d'hystérésis	25
1.8 Conclusion	30
2 CONTROLE PAR COURANTS DE FOUCAULT	31
2.1 Principe	31
2.2 Théorie du contrôle par courants de Foucault	33
2.3 Profondeur de pénétration standard	34
2.4 Diagramme d'impédance normalisé	35
2.5 Variation des paramètres dans le diagramme d'impédance	36
2.6 Choix de la fréquence de contrôle	37
2.7 Types de palpeurs	38
2.8 Les pièces étalons	39
2.9 Modèles	40
2.10 Conclusion	42
3 CONSTRUCTION DES CAPTEURS	43
3.1 Introduction	43
3.2 Principe d'un capteur	43
3.3 Principaux paramètres des capteurs	44
3.4 Construction des sondes	45
3.5 Réalisation des capteurs	53
3.6 Conclusion	53

4 PARTIE EXPERIMENTALE	54
4.1 Réalisation des échantillons	54
4.2 Inspection par Barkhausen	59
4.3 Cycle d'hystérésis	64
4.4 Inspection par courants de Foucault	67
4.5 Conclusion	76
CONCLUSIONS	77
A. LISTE DES SYMBOLES	79
B. PROGRAMMES	80
REFERENCES	82

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1	Principe du ressuage	10
Figure 1.2	Principe de la radiographie	10
Figure 1.3	Principe des ultrasons	11
Figure 1.4	Principe de la magnétoscopie	12
Figure 1.5	Représentation atomique	14
Figure 1.6	Moment orbital	14
Figure 1.7	Moment de spin	15
Figure 1.8	Diamagnétisme	16
Figure 1.9	Paramagnétique	17
Figure 1.10	Ferromagnétisme	17
Figure 1.11	Ferrimagnétisme	18
Figure 1.12	Antiferromagnétisme	18
Figure 1.13	Aspect des domaines	19
Figure 1.14	Modèles de représentation	21
Figure 1.15	Expérience de Barkhausen	22
Figure 1.16	Système de mesure du bruit de Barkhausen	24
Figure 1.17	Courbe de première aimantation	26
Figure 1.18	Cycle d'hystérésis	27
Figure 1.19	Evolution du cycle d'hystérésis	28
Figure 1.20	Signal de Barkhausen	29
Figure 1. 21	Cycle d'Hystérésis des matériaux magnétiques	30
Figure 2.1	Principe des courants de Foucault	31
Figure 2.2	Variation d'impédances	32
Figure 2.3	Répartition des courants de Foucault	33
Figure 2.4	Profondeur de pénétration	34
Figure 2.4	Diagramme d'impédance normalisé	36
Figure 2.5	Influence des paramètres sur le Diagramme	37
Figure 2.6	Bobinage simple	38
Figure 2.7	Bobinage à fonctions séparées	38
Figure 2.8:	Analogie électrique d'un matériau à contrôler	41
Figure 3.1	Forme du capteur à courants de Foucault	45
Figure 3.2	Sonde à courants de Foucault	47
Figure 3.3	Champ magnétique crée par une spire	48
Figure 3.4	Allure de l'induction magnétique B_x	50
Figure 3.5	Allure d'induction magnétique B_z	51

Figure 4.1	Soudage à l'arc	55
Figure 4.2	Echantillons	56
Figure 4.3	Principe de la radiographie	57
Figure 4.4	Clichés des échantillons	58
Figure 4.5	Principe de la génération du bruit de Barkhausen	59
Figure 4.6	Schéma synoptique du système de mesure	60
Figure 4.7	Système de mesure du bruit barkhausen	60
Figure 4.8	Schéma synoptique du system	61
Figure 4.9	Capteur magnétique	62
Figure 4.10	Tracé du cycle d'hystérésis	64
Figure 4.11	Chaîne automatisée par courants de Foucault	66
Figure 4.12	Organigramme du balayage par courants de Foucault	68
Figure 4.13	Interface du programme	69
Figure 4.14	Evolution de la résistance	71
Figure 4.15	Evolution de l'inductance	71
Figure 4.16	Diagramme d'impédance normalisé	72
Figure 4.17	Représentations des résultats	73-75

LISTE TABLEAUX

Tableau 4.1	Interprétations des résultats	58
Tableau 4.2	Sondes réalisées	70

INTRODUCTION

Les matériaux sont le foyer de multitudes de défauts Lors de leurs élaborations ainsi que lors de leurs exploitations sous l'action de la fatigue, de la corrosion et des accidents [1].

Les méthodes du contrôle non destructif se sont généralisées à l'ensemble du monde industriel [2]. Elles font désormais partie des outils courants qui participent à l'amélioration de la productivité ainsi ; elles garantissent la conformité des produits. Parallèlement à cette évolution, le contrôle non destructif a élargi son champ d'application en passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement à l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux [3].

Le contrôle non destructif est utilisé pour déceler dans une pièce sans la détériorer et en respectant son intégrité, toute particularité de sa structure pouvant avoir une influence sur son comportement en service [1]. L'inspection visuelle est la plus simple de toutes les techniques du contrôle non destructif.

Les techniques du contrôle non destructif sont complémentaires entre elles; le choix de l'une par rapport à l'autre est souvent dicté par des standards et des normes [2]. De nos jours, les travaux de recherche évoluent pour réduire et éliminer les risques liés à la santé des individus toute en facilitant la mise en œuvre ainsi que l'interprétation.

L'objet de notre travail est d'étudier les méthodes de contrôle par ondes électromagnétiques afin d'évaluer leurs performances dans l'industrie. Le travail proposé s'inscrit dans un projet de recherche au niveau du centre national de recherche scientifique en soudage et contrôle non destructif, développé au niveau du département des procédés magnétiques et électriques.

Compte tenu de l'intérêt que nous porterons dans ce travail aux phénomènes électromagnétiques, nous aborderons, d'une manière générale ce phénomène en partant des principes. Le concept du champ électromagnétique a été forgé au 16^{ème} siècle pour décrire de manière unifiée les phénomènes électriques et magnétiques. Des phénomènes tels que l'induction montrent en effet que les champs électrique et magnétique sont liés.

L'électromagnétisme se base sur une théorie de l'électrodynamique pour décrire le couplage entre le champ électromagnétique et le système mécanique ; de même, nous abordons dans la même partie de ce mémoire les techniques les plus utilisées dans notre industrie.

Le deuxième chapitre est consacré au contrôle par les courants de Foucault. Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force induit des courants. Ces courants ont deux effets ; ils provoquent un échauffement par effet Joule du milieu conducteur et créent un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur. Nous aborderons en plus, la chaîne de contrôle, les paramètres et les conditions importantes exigées par cette technique.

Le troisième chapitre est consacré à l'élément le plus importante dans une chaîne de contrôle par les méthodes magnétiques, à savoir les capteurs de mesure. En effet la sensibilité aux défauts, la précision de détection et de la mesure dépendent de sa conception. L'étude du champ magnétique créé à son voisinage permet d'optimiser et de mieux concevoir la sonde.

Le quatrième chapitre développe l'approche expérimentale tout en citant les moyens mis en œuvre ainsi que les procédures de travail; à savoir, la réalisation des défauts, la mise en évidence de ces anomalies par la technique de radiographie, la chaîne de mesure pour capturer la signature de barkhausen et le tracé du cycle d'hystérésis.

La conception des sondes du contrôle par les courants de Foucault, ainsi que l'automatisation de la chaîne de mesure sera détaillée au cours de ce dernier chapitre.

Finalement, nous terminons ce travail par une conclusion générale, tout en mettant en évidence toutes les appréciations ainsi que toutes les remarques et recommandations nécessaires pour un développement futur de cet axe de recherche.

CHAPITRE I

MAGNETISME

1.1 Domaine du contrôle non destructif

1.1.1 Introduction

Le contrôle non destructif joue un rôle important dans la qualité d'un produit. Il est employé pendant toutes les étapes de sa fabrication. Il est aussi employé pour surveiller son comportement durant son utilisation. Les méthodes du contrôle non destructif s'étendent du simple au compliqué. Des imperfections extérieures invisibles à l'œil peuvent être indiquées par des méthodes pénétrantes. Les techniques du contrôle sont complémentaires et ne peuvent en aucun cas être concurrentielles entre elles.

1.1.2 Technique du ressuage

C'est une méthode qui est utilisée pour la détection des défauts débouchant à la surface. Dans cette méthode un liquide pénétrant est appliqué à la surface du produit à inspecter, l'excès du pénétrant est enlevé. Un révélateur est appliqué à son tour. Le pénétrant qui reste dans la discontinuité est absorbé par le révélateur pour indiquer la présence aussi bien que l'endroit, la taille et la nature de la discontinuité [1]. Le processus est illustré sur la figure 1.1. L'avantage de cette technique réside dans son prix de revient qui est relativement faible, elle est entièrement sensible aux discontinuités fines, la détection ne tient pas compte de l'orientation des défauts et en plus c'est une technique assez simple. Par contre lors de l'inspection, la surface de la pièce à inspecter doit être propre, elle est utilisée seulement pour la détection des discontinuités extérieures, elle ne peut pas être employée sur les spécimens poreux.

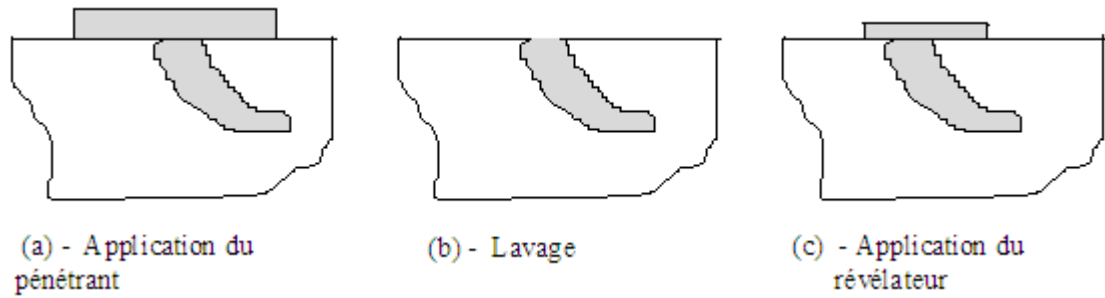


Figure 1.1: Principe du ressuage

1.1.3 La radiographie

Les radiographies X et γ permettent de mettre en évidence essentiellement des défauts internes. La quasi totalité des matériaux peut être examinés en radiographie, les épaisseurs contrôlées pouvant souvent être importantes. Les applications sont donc nombreuses et concernent tous les domaines d'activité, allant de la chaudronnerie lourde à l'électronique, les moyens mis en œuvre étant bien évidemment différents alors que le principe de base demeure le même : former une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant qui a traversé l'objet examiné[2]. La pièce est interposée entre la source de rayonnement et le film photographique. Une image se forme sur le film après exposition du rayonnement pendant un temps donné.

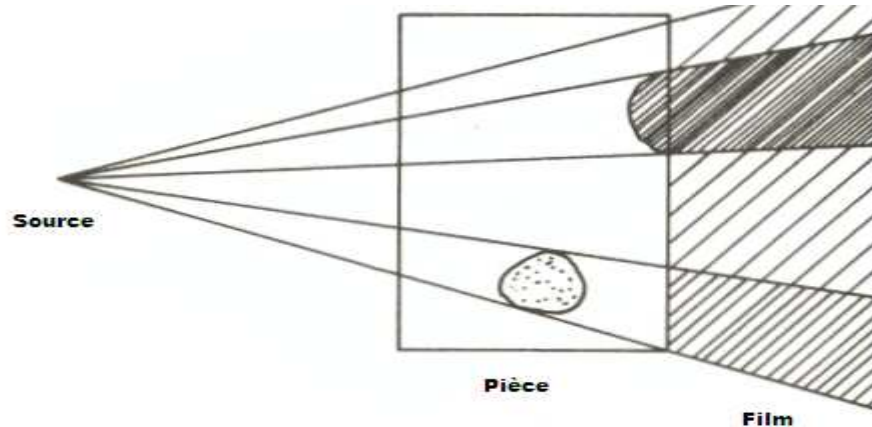


Figure 1.2: Principe de la radiographie

La méthode se prête bien à la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et permet une bonne définition des défauts. La nature des défauts décelés peut être appréciée et l'archivage des résultats est garanti par la présence du cliché. Par contre, elle est coûteuse en investissement et développement des films et nécessite le respect des règles de sécurité en vigueur pour le personnel soumis aux rayonnements ionisants. La pénétration du rayonnement est limitée et la source doit être sélectionnée en fonction de l'épaisseur du matériau à contrôler. La sensibilité de la méthode est influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du rayonnement émis par la source.

1.1.4 Le contrôle par ultrason

Un transducteur émet une onde ultrasonore qui se propage dans le matériau à contrôler, elle se réfléchit sur d'éventuels obstacles présents dans la structure. Cet écho peut revenir en direction du transducteur, il joue alors le rôle de récepteurs [3].

Comme les vitesses de propagation des ondes ultrasonores sont très grandes et que les distances parcourues sont courtes, le signal d'émission et les échos sont très voisins. Il est donc nécessaire d'utiliser un appareil de contrôle qui, en plus de l'alimentation du transducteur, permet la visualisation des échos ultrasonores sur un tube d'écran cathodique.

Cet appareil de contrôle permet la visualisation de l'émission et des échos recueillis par le transducteur. Pour que la reconnaissance des échos soit possible, il ne faut pas qu'il y ait chevauchement entre l'émission et les différents échos ; il faut donc que les signaux émis soient très brefs, de l'ordre de quelques micros secondes.

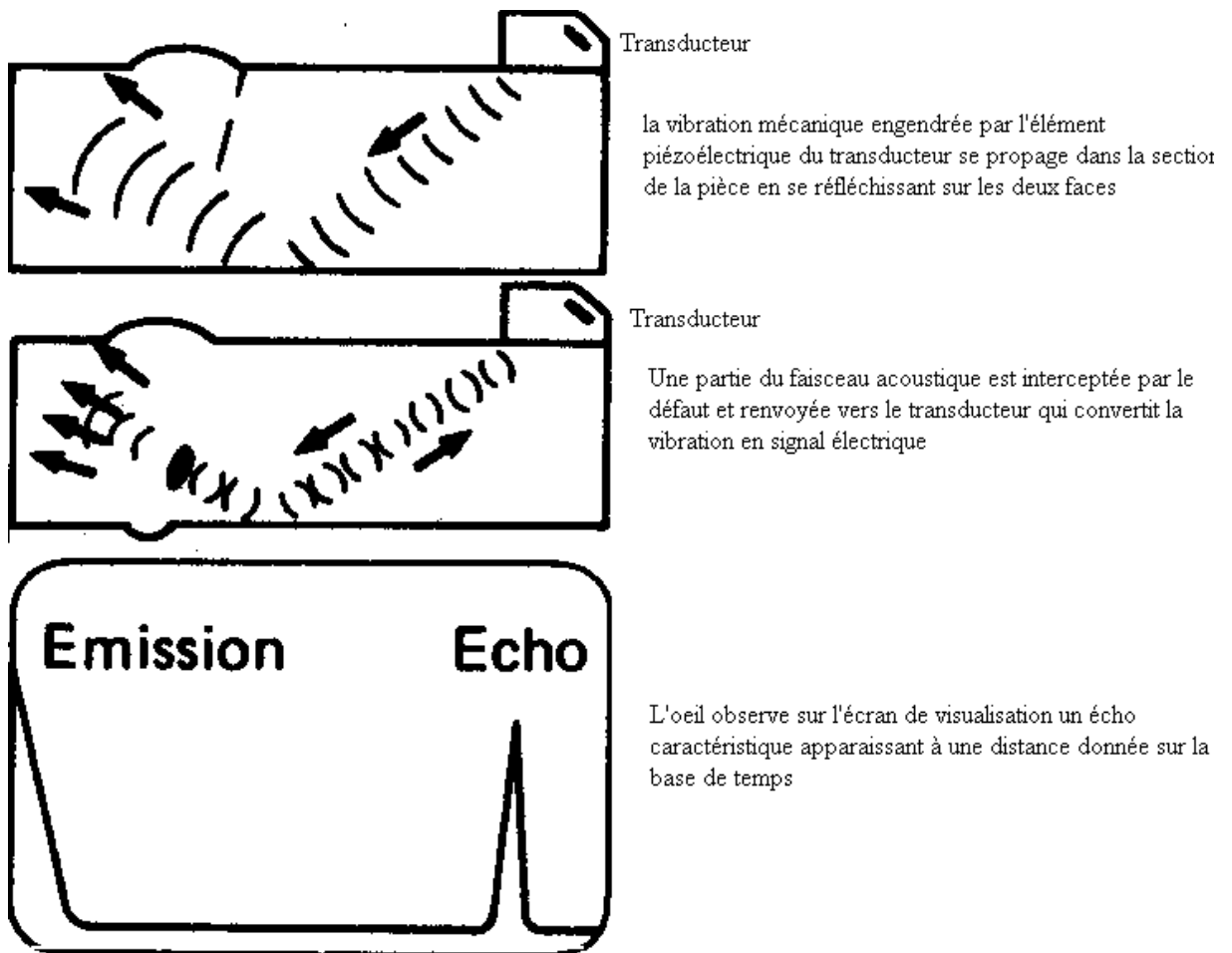


Figure 1.3: Principe des ultrasons

La méthode permet la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche de défauts plans. Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête bien à l'automatisation, alors que sa sensibilité est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.

Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation. L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience. La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux.

1.1.5 La magnétoscopie

Le contrôle par des particules magnétiques est employé pour le contrôle des matériaux qui peuvent être facilement magnétisés. Dans cette méthode l'échantillon est d'abord magnétisé en utilisant un aimant permanent ou un électro-aimant ou par passage de courant électrique par ou autour du spécimen [4].

Le champ magnétique présenté ainsi dans le spécimen se compose de lignes de force magnétiques. Toute anomalie va modifier le parcours des lignes de champs (figure 1.4), certaines de ces lignes doivent sortir et réintroduire le spécimen. Ces points forment des pôles magnétiques.

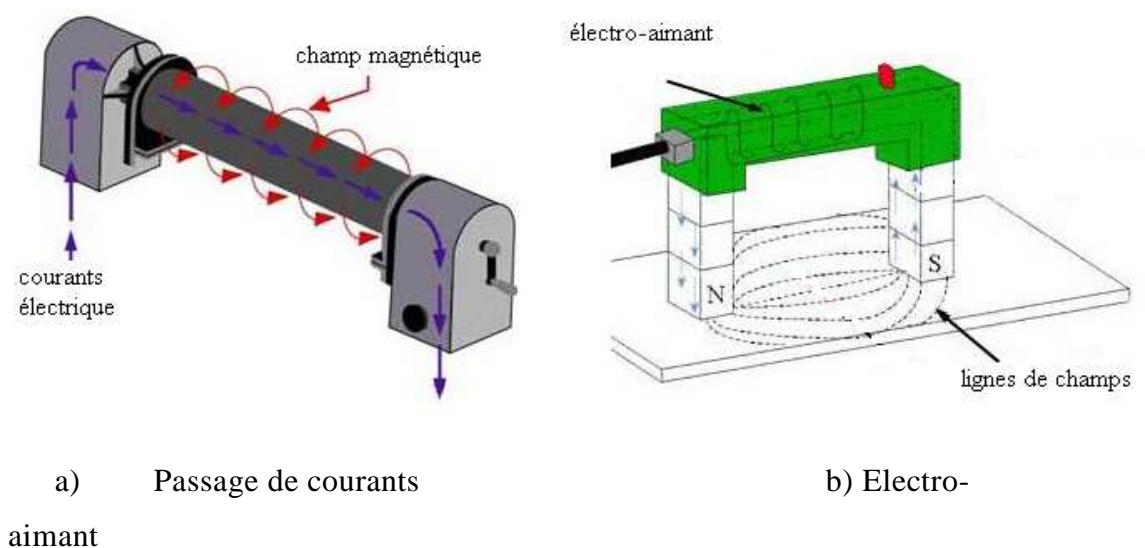


Figure 1.4: Principe de la magnétoscopie

1.2 Magnétisme

1.2.1 Introduction

Les plus anciens objets magnétiques (perles tubulaires) ont été retrouvés dans des tombes sumériennes et égyptiennes au quatrième millénaire avant Jésus-Christ. Les chinois et les grecs de l'antiquité ont été les premiers à constater les propriétés que possèdent certaines pierres à attirer des objets contenant du fer. Ces objets en fer une fois mis en contact avec ces pierres acquéraient à leur tour le pouvoir d'attirer d'autres objets en fer.

Ces pierres appelées « magnétite » sont constituées d'oxyde de fer. Vers le 2^{ème} siècle, les chinois ont exploité la propriété qu'a une aiguille métallique aimantée de s'orienter constamment vers la même direction ; c'est la naissance de la boussole.

Les premiers traités de magnétisme ont été rédigés vers 1600 par l'anglais William Gilbert. C. A. Coulomb a réalisé les premières mesures de forces magnétiques s'exerçant sur deux charges magnétiques, puis Hans Oersted a établi le lien entre l'électricité et le magnétisme en observant que l'aiguille magnétique est déviée par un courant parcourant un fil conducteur situé à proximité de cette aiguille.

W. Thomson a découvert l'effet magnétorésistance qui consiste en la propriété qu'ont certains matériaux de présenter une résistance qui évolue lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. Enfin S.A. Goudsmit et G. E. Uhlenbeck ont montré en 1925 que l'électron se comporte comme un aimant [5].

Les propriétés magnétiques d'un solide dérivent de sa structure cristallographique et du moment magnétique d'un atome libre qui a trois origines principales:

- Le spin de l'électron
- Le moment cinétique orbital de l'électron par rapport au noyau
- La variation du moment orbital créée par l'application d'un champ magnétique

Selon le comportement de cet ensemble, on distingue différents types de magnétisme. On appelle substance magnétique tous les milieux susceptibles de s'aimanter par un champ magnétique, c'est-à-dire de créer un champ magnétique propre [5].

1.2.2 Moments magnétiques

Un matériau est constitué d'atomes; ces atomes possèdent un noyau et un certain nombre d'électrons périphériques. La charge équivalente de ce noyau est une charge positive, celle des électrons est négative. La rotation des électrons autour du noyau donne naissance à une force centrifuge qui tend à éloigner les électrons du noyau, mais ils ne peuvent s'en éloigner car la force de Coulomb les retient et s'oppose à cette force centrifuge comme illustré sur la figure 1.5. La rotation des électrons autour du noyau de l'atome donne naissance à un courant électrique [6]. On définit deux notions élémentaires qui sont : le moment orbital et le moment de spin.

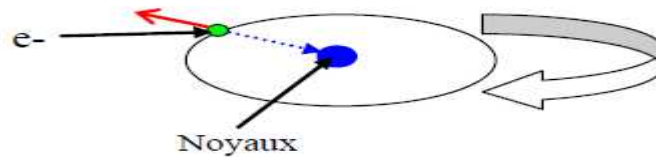


Figure 1.5: Représentation atomique

Moment orbital

L'électron décrit une orbite circulaire à raison de n rotations par seconde. Il est donc équivalent à un courant. Ce courant circulant dans une spire confondue avec l'orbite comme illustré sur la figure 1.6

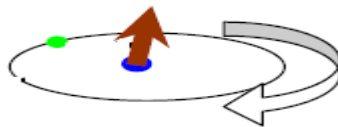


Figure 1.6 : Moment orbital

Moment de spin

La rotation de l'électron tourne sur lui-même engendre un moment de couramment le spin (figure 1.7), c'est est une propriété purement quantique des électrons.



Figure 1.7 : Moment de spin

Enfin, le moment magnétique total de l'atome est la somme des moments orbitaux et des moments de spin des électrons périphériques:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

(1.1)

De plus par définition, un matériau magnétique placé dans un champ magnétique acquiert un vecteur d'aimantation \vec{M} qui est proportionnel au champ d'excitation tel que :

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \chi \cdot \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \end{aligned}$$

(1.2)

Où

\vec{B} Induction magnétique

μ_0 Perméabilité du vide

\vec{H} Champ magnétique

\vec{M} Moment magnétique

χ Susceptibilité magnétique

1.2.3 Classification des substances magnétiques

Un matériau magnétique apparaît comme un ensemble de moments magnétiques élémentaires; 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 magnétisme. On appelle substance magnétique tous les milieux susceptibles de s'aimanter par un champ magnétique, c'est-à-dire de créer un champ magnétique propre [7].

1.2.3.1 Diamagnétisme

Le diamagnétisme décrit le magnétisme d'un matériau formé d'atomes sans moment magnétique. L'aimantation M induite dans ce matériau par un champ magnétique H appliqué, est très faible et s'oppose à ce dernier. La susceptibilité magnétique χ est négative et est définie par la pente pratiquement constante de la courbe d'aimantation $M(H)$:

$$\chi = \frac{\partial B}{\partial H} \quad (1.3)$$

Le diamagnétisme a pour origine les modifications du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ magnétique.

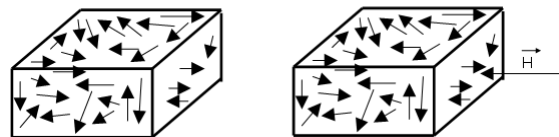


Figure 1.8: Diamagnétisme

1.2.3.2 Paramagnétisme

On appelle paramagnétisme l'ensemble des propriétés magnétiques de certaines substances dont les atomes (ions) possédant un moment magnétique constant indépendant du champ magnétique extérieur, caractérisé par une susceptibilité relative positive, de faible amplitude. C'est un magnétisme non coopératif, il ne fait pas appel aux interactions d'échanges, les matériaux qui relèvent de ce modèle n'ont pas d'aimantation spontanée, l'orientation des moments magnétiques est aléatoire ce qui donne un moment résultant nul. Sous un champ magnétique extérieur, les corps paramagnétiques possèdent une aimantation non nulle, la susceptibilité est positive et inversement proportionnelle à la température absolue.

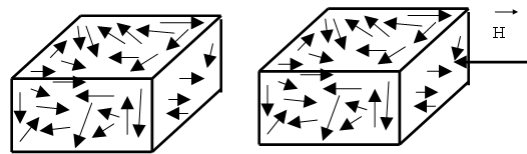


Figure 1.9 : Paramagnétique

1.2.3.3 Ferromagnétisme

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité positive avec une amplitude importante. Un matériau Ferromagnétique peut faire apparaître une induction très importante pour des faibles valeurs du champ d'excitation extérieur. Un corps ferromagnétique a un moment magnétique spontané à l'échelle microscopique, les spins électroniques sont arrangés de façon régulière. Le ferromagnétisme est dû à l'existence d'interactions internes entre les moments magnétiques qui tendent à aligner les spins. On observe en effet que les moments atomiques sont bien alignés dans des zones appelées domaines magnétiques de Weiss [8].

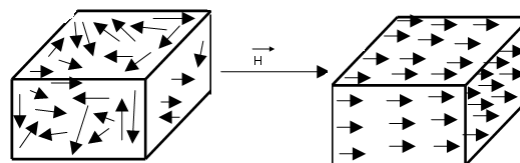


Figure 1.10 : Ferromagnétisme

1.2.3.4 Ferrimagnétisme

Le ferrimagnétisme est le magnétisme d'une classe d'oxydes appelés ferrites. Dans la structure cristalline de ces métaux, on peut distinguer deux familles, occupées par des ions possédant des moments magnétiques. Le couplage entre les deux familles donne une polarisation spontanée, c'est à dire, une polarisation existant en l'absence d'un champ magnétique appliqué. Comme dans les matériaux paramagnétiques, les atomes portent un moment magnétique permanent. Toutefois ces moments ne sont plus indépendants les uns des autres mais au contraire fortement liés. De cette interaction, qui porte le nom de couplage antiferromagnétique, résulte un arrangement antiparallèle des moments.

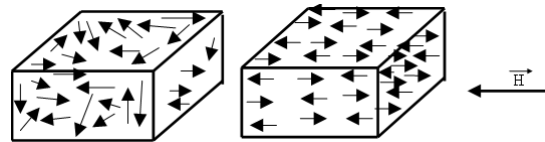


Figure 1.11 : Ferrimagnétisme

1.2.3.5 Antiferromagnétisme

Les moments magnétiques des atomes, en absence de tout champ extérieur, peuvent s'orienter deux à deux en sens inverse l'un de l'autre et de même module. L'aimantation spontanée est donc nulle et l'effet d'un champ extérieur est une aimantation très faible.

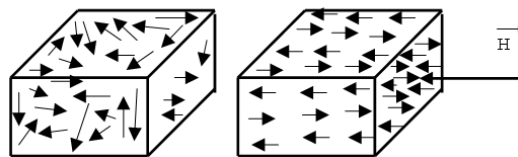


Figure 1.12 : Antiferromagnétisme

1.3 Domaines de Weiss

Tous les matériaux présentant un magnétisme important, donc exploitables magnétiquement et particulièrement les ferromagnétiques et les ferrimagnétiques, sont des matériaux hétérogènes d'un point de vue magnétique. Ils sont saturés localement, à l'échelle macroscopique ; en l'absence de champ magnétique extérieur ils présentent pratiquement une aimantation macroscopique nulle.

Un matériau ferromagnétique n'est pas toujours spontanément aimanté; il peut présenter un moment magnétique nul. Le matériau est divisé en domaines magnétiques appelés domaines de Weiss chacun regroupant 10^{17} à 10^{21} atomes qui sont aimantés à la saturation [9]. Historiquement, cette idée d'une structure en domaine a été introduite pour la première fois par *P. Weiss* en 1907 pour lever l'incompatibilité entre l'existence d'un arrangement ordonné des moments atomiques et la possibilité d'un état désaimanté. Les interfaces entre les domaines sont appelées « parois de Bloch » à travers lesquelles l'orientation des moments magnétiques passe progressivement d'un domaine à l'autre (Figure1.8).

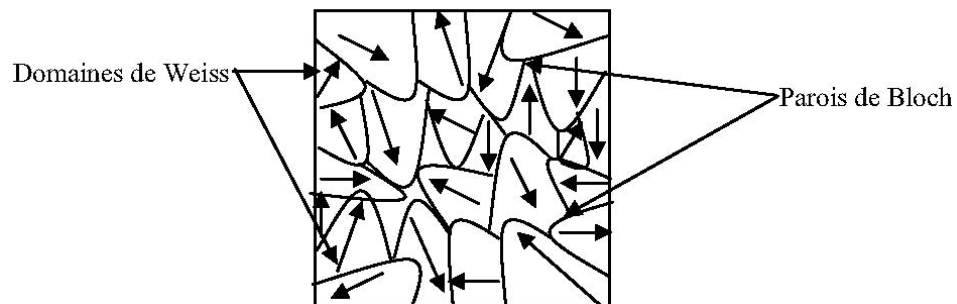


Figure1.13: Aspect de la répartition des domaines dans un matériau ferromagnétique

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.

Par anisotropie magnétique, on entend la dépendance de l'énergie interne d'un système vis-à-vis de la direction de son aimantation, relativement à ses axes de facile aimantation. Mais les origines de l'anisotropie magnétique peuvent être multiples, elles peuvent être d'origine cristalline, de forme, de surface ou de contrainte [10-11].

1.4 Evolution du ferromagnétisme

A l'échelle atomique [12], un matériau ferromagnétique se distingue par l'existence d'un fort moment magnétique atomique permanent.

Par contre sur le réseau cristallin [12]; l'énergie responsable de l'orientation de l'aimantation le long de certaines directions cristallographiques est minimale dans la direction de facile aimantation, dans le cas d'une symétrie cubique, les axes de facile aimantation sont les arêtes c'est à dire les directions [001], [100], [010], alors que la diagonale [111] est de difficile aimantation.

A l'échelle du grain [12]; l'énergie magnétostatique est directement liée à la densité de charge, ce qui impose une structure macroscopique (multi domaines); les régions où l'aimantation est constante sont appelées « domaines de Weiss », ces domaines sont séparées par des parois appelées « parois de Bloch », on y trouve les parois à 180° et celles à 90°.

1.5 Modèle physique

L'introduction des différentes énergies permet bien de justifier les microstructures magnétiques observées expérimentalement. Par contre, la prise en compte dans des modélisations de toutes ces énergies restent extrêmement complexes, en particulier pour expliquer les modifications des microstructures magnétiques sous l'effet de sollicitations extérieures (magnétiques ou mécaniques) [13].

Le plus souvent, ces considérations ont conduit à utiliser une modélisation graphique très simplifiée, sensée représenter un cristal ferromagnétique (figure 1.9).

- a): Modèle rectangulaire permettant d'introduire la notion de domaines principaux, de domaines de fermeture et les différents types de parois.
- b): Modèle carré permettant d'introduire l'effet statistique d'une équipartition des domaines mais peu représentatif car uniquement constitué de parois à 90°
- c): Modèle volumique, plus proche de la réalité mais plus complexe.

Le modèle à deux dimensions (quatre domaines) est très pratique pour expliquer l'existence du cycle d'hystérésis et du bruit Barkhausen.

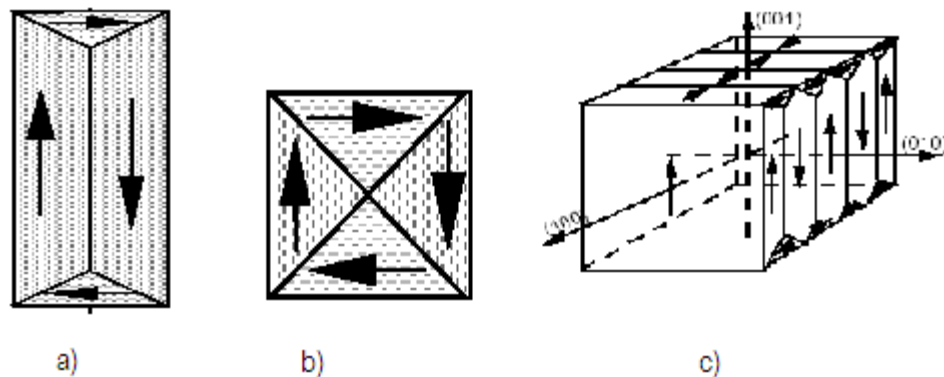


Figure 1.14 : Modèles de représentation

1.6 Bruit de Barkhausen

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 la discontinuités du processus d'aimantation sous la forme d'un bruit audible [14], 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 Liffshitz 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.

1.6.1 Expérience de Barkhausen

Un aimant tourne lentement, induisant dans un barreau ferromagnétique un renversement de Polarisation selon un mouvement périodique, un enroulement capte les variations de flux magnétique dans le barreau, qui sont transmises après amplification à un haut parleur (figure 1.10) [14]. A chaque renversement de la polarisation un bruit rappelant l'écoulement de petits grains dans un récipient, se fait entendre, ce phénomène démontre que sous l'effet d'un champ extérieure suffisamment important la polarisation ne se fait pas de façon continue, mais par petits sauts successifs:

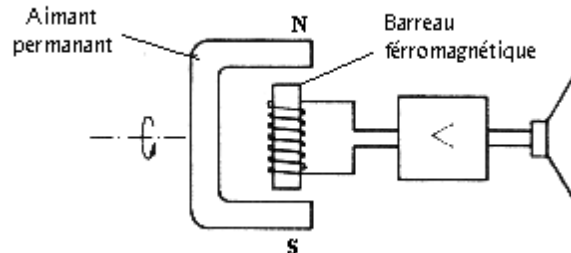


Figure 1.15: Expérience de Barkhausen

Le cristal peut contenir un grand nombre d'imperfections, en arrivant sur un défaut, la paroi va se bloquer et rester encrée, si le champ appliqué augmente la paroi va se détacher brusquement pour aller jusqu'à un nouveau défaut. La capacité qu'ont les défauts à bloquer une paroi dépend de leur nature et de l'énergie d'interaction qui existe entre eux et la paroi. Le mouvement brusque de la paroi se traduit par une impulsion Barkhausen, le bruit qu'engendre ce mouvement est de haute fréquence, il entraîne le mouvement des parois de Bloch.

1.6.2 Discontinuités du processus d'aimantation

L'aimantation d'un matériau ferromagnétique est définie :

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

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

Sous l'effet d'un champ magnétique, la microstructure magnétique d'un matériau modifie les domaines. Cette modification magnétique se traduit par le déplacement des parois de Bloch [15]. Sur leurs trajets les parois rencontrent toutes les imperfections présentes dans le matériau, tous ces défauts vont agir comme des points d'encrage; ils stoppent le déplacement des parois. Si le champ appliqué augmente encore alors l'énergie apportée est suffisamment importante pour provoquer le décrochage de la paroi qui se déplace brusquement jusqu'aux défauts suivants [16].

La discontinuité de déplacement des parois dépend de la nature et de la taille de ces défauts par exemple un atome de carbone, en solution solide dans le fer ne présentera pas la même force d'encrage pour une paroi d'un autre élément, il est en générale admis que les encrages les plus puissants sont donnés par les défauts de taille équivalente à l'épaisseur d'une paroi de Bloch.

1.6.3 Mesure du bruit de Barkhausen

Chaque saut d'une paroi de Bloch induit une perturbation électromagnétique, une Sonde judicieusement placée et orientée sur le spécimen permet de transformer les variations de flux induit par la perturbation à des impulsions électriques, chaque événement de Barkhausen dans le matériau induit une impulsion de tension aux bornes de la bobine réceptrice et la somme de tous ces événements forment ce qu'on appelle « bruit de Barkhausen » dont l'intensité dépend du champ appliqué et de la nature des défauts.

1.6.4 Équipements et paramètres de mesure

Avec le développement des techniques de contrôle non destructif, l'utilisation de la technique du contrôle du bruit de Barkhausen a pris une place de plus en plus importante pour la caractérisation des matériaux [16].

La mesure de bruit Barkhausen nécessite un appareillage comportant deux parties :

L'excitation magnétique

L'acquisition du signal de Barkhausen (BN)

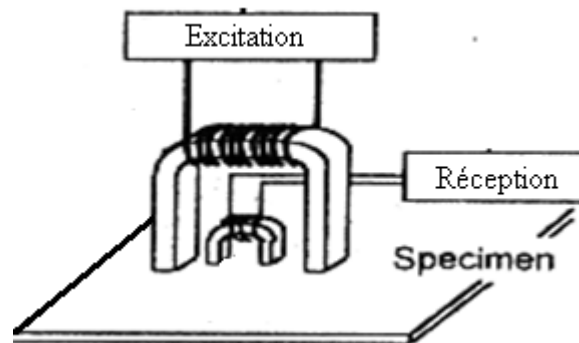


Figure 1.16: Système de mesure du bruit de Barkhausen

1.6.4.1 Excitation magnétique

L'excitation magnétique de la pièce à contrôler est assurée par un électroaimant, sa forme dépend de la géométrie de la pièce à contrôler, il peut être avec ou sans noyau magnétique.

La bobine excitatrice est alimentée par un courant variable, un champ intense est nécessaire pour magnétiser la pièce, l'utilisation de noyau nous a permis d'amplifier et de focaliser le champ magnétique.

L'excitation magnétique conditionne fortement la qualité de la mesure de bruit BN ; cela est due à la fréquence d'excitation (relaxation).

1.6.4.2 Acquisition du signal Barkhausen

L'acquisition du bruit est assurée par un enroulement récepteur, le signal mesuré est de très faible amplitude. D'où la nécessité de la pré-amplification. Le bruit BN couvre une large gamme de fréquence, il faut prévoir un filtre passe bande pour éliminer les parasites hautes fréquences et pour s'affranchir aux variations lentes de flux magnétique à travers la section du capteur de réception.

1.7 Cycle d'hystérésis

1.7.1 Courbe de première aimantation

Prenons un morceau de fer initialement désaimanté, lorsqu'une excitation est appliquée, la configuration en domaines va évoluer de façon à s'orienter dans le sens du champ appliqué:

Pour des valeurs faibles de champ appliqué : les domaines dont l'aimantation est proche par rapport au champ extérieur vont croître au détriment d'autres moins bien orientés (processus réversible).

Pour des valeurs de champ plus élevées : les phénomènes s'amplifient et deviennent irréversibles, cette étape intervient jusqu'à la disparition complète des domaines défavorablement orientés.

Pour des valeurs de champ appliqué encore plus élevé : l'aimantation dans le cristal va quitter, une direction de facile aimantation pour s'orienter dans le sens de champ. La saturation magnétique est alors atteinte.

Ceux-ci peuvent être résumés sur la figure 1.17 représentant une courbe d'aimantation d'une substance ferromagnétique, où on distingue les trois régions :

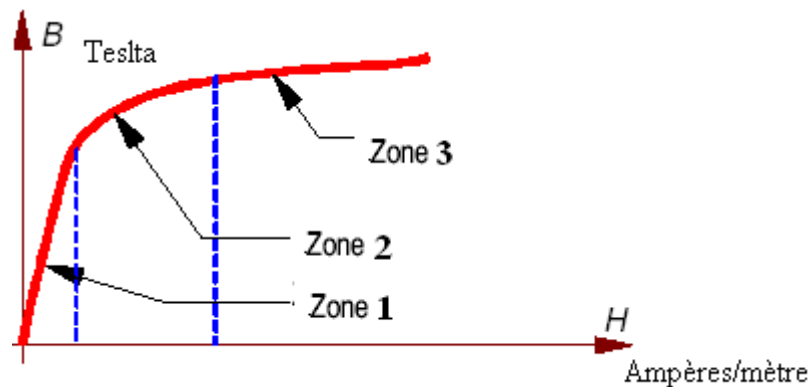


Figure 1.17: Courbe de première aimantation

1.7.2 Tracé de la courbe du cycle d'hystérésis

A partir d'un point (H, B) de la courbe de première aimantation, on diminue le champ H , l'induction B ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence, B nulle ne correspond plus à une valeur nulle de H . Il subsiste une induction rémanente B_r (l'induction qui demeure après la disparition du champ). Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler B , c'est le champ coercitif H_c (le champ à appliquer pour annuler l'induction). L'induction maximale est l'induction de saturation B_{sat} .

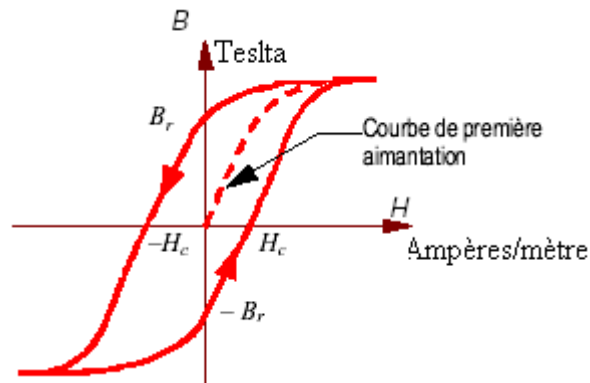


Figure 1.18 : Cycle d'hystérésis

1.7.3. Différents stades

En faisant décroître le champ appliqué à partir de la saturation magnétique, les phénomènes inverses à ceux décrit pour la courbe de première aimantation vont se produire :

- Le retour de l'aimantation vers une direction de facile aimantation.
- La création de nouveaux domaines et de domaines de fermeture (germination). Cependant pour une valeur de champ appliqué nulle, l'état désaimanté n'est pas obtenue, il subsiste une induction rémanente B_r . Pour trouver un matériau globalement désaimanté il est nécessaire d'appliquer un champ extérieur négatif c'est le champ coercitif H_c , cette grandeur dépend très fortement de la mobilité des parois de Bloch.

L'ensemble de ces propriétés traduit le phénomène d'hystérésis, le cycle hystérésis s'obtient en ramenant un matériau de saturation à saturation en sens inverse.

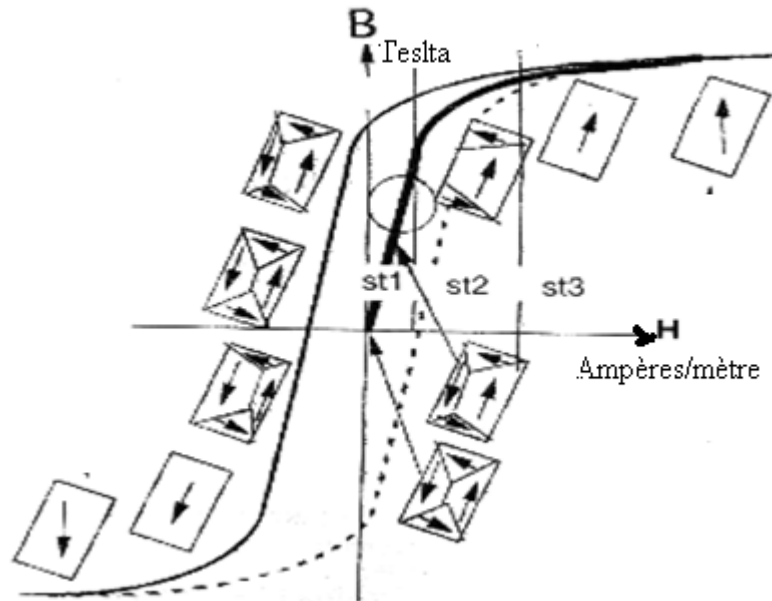


Figure 1.19 : Evolution du cycle d'hystérésis

Stade 1 : Les domaines de Weiss principaux les mieux orientés par rapport à la direction du champ d'excitation magnétique grandissent au détriment des autres. Cette modification de la microstructure magnétique s'effectue par des mouvements de parois de Bloch à 180° .

Stade 2 : Il correspond à la disparition des domaines de fermeture. Cette partie s'accompagne principalement de mouvements de parois de Bloch à 90° . A la fin du stade 2, chaque cristal est un mono domaine magnétique orienté dans la direction de magnétisation.

Stade 3 : Il correspond à la saturation magnétique sous l'effet de l'excitation magnétique croissante, les moments magnétiques atomiques vont progressivement quitter les directions cristallines de facile aimantation pour s'aligner dans la direction de magnétisation. C'est un phénomène continu qui nécessite un très fort champ pour être complet.

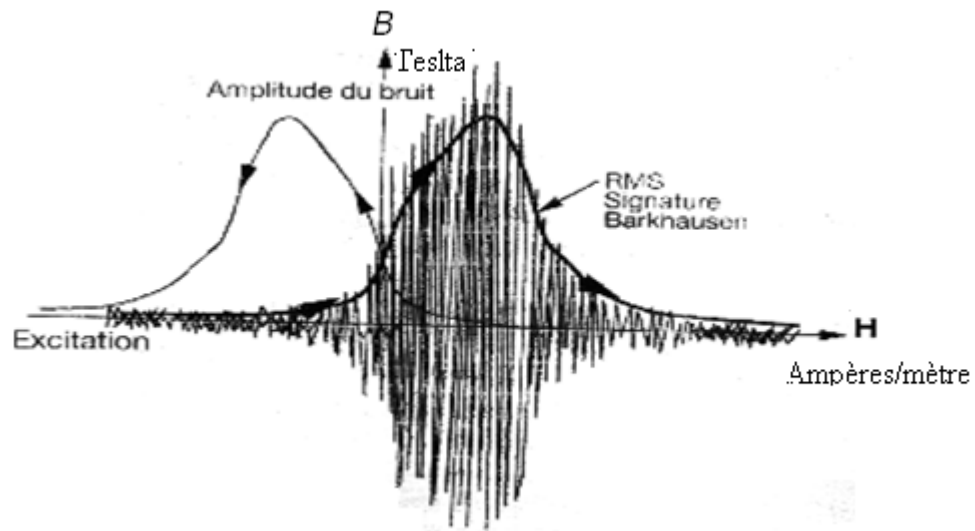


Figure 1.20: Signal de Barkhausen

Bruit de Barkhausen : Les stades 1 et 2 correspondent à des mouvements de parois de Bloch à 180° et 90° . Ces mouvements sont discontinus figure 1.13, car les parois sont ancrées sur les imperfections de la microstructure cristalline. Ces mouvements discontinus (sauts Barkhausen) correspondent à des variations locales et rapides du flux magnétique qui génèrent des ondes électromagnétiques, il est alors possible de les capturer avec une bobine judicieusement placée, c'est le bruit Barkhausen. La présence des défauts cristallins influe sur la forme du diagramme B (H).

1.7.4 Caractérisation des matériaux par cycle d'hystérésis

L'induction rémanente B_r et le champ coercitif H_c sont des propriétés spécifiques qui permettent la caractérisation des différents matériaux. On distingue deux classes de matériaux :

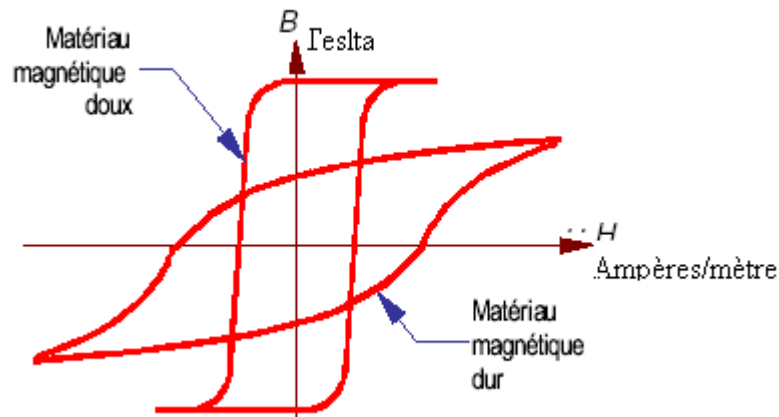


Figure 1. 21 : Cycle d'Hystérésis des matériaux magnétiques doux et dur.

Matériaux ferromagnétiques doux : Leurs propriétés fondamentales est la capacité à réagir à un champ magnétique extérieur de faible intensité. Le champ coercitif doit être le plus faible possible (de l'ordre de 1 mT dans les matériaux les plus performants), l'induction rémanente B_r plutôt élevée, la Surface du cycle d'hystérésis faible et la perméabilité initiale doit être maximale (supérieure à 10^5).

Matériaux ferromagnétiques durs : dans ce type de matériaux l'aimantation rémanente et le champ coercitif sont les paramètres physiques essentiels. B_r est plutôt faible, H_c plutôt élevé, Surface du cycle d'hystérésis élevée.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les techniques du contrôle non destructif les plus convoitées dans l'industrie nationale, ainsi que les lois régissant l'électromagnétisme dans le domaine de l'inspection.

CHAPITRE II

CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT

2.1 Principe

Les courants de Foucault sont des courants induits dans un matériau conducteur en présence d'un champ magnétique variable. Ils dépendent des caractéristiques électriques, magnétiques et structurelles du matériau.

Les anomalies dans la structure conductrice sont détectées par la variation d'impédance de la sonde d'excitation. Toute variation ou modification des lignes de courants induits dans la pièce se manifeste par une variation du flux magnétique, ce qui entraîne une variation de l'impédance de la sonde.

Le système de mesure par courants de Foucault repose sur la mesure de cette variation d'impédance. Le passage d'un courant variable à travers une bobine génère un champ magnétique, la propagation de ce dernier dans une pièce conductrice d'électricité induit des courants ; ce sont les courants de Foucault, qui à leurs tour créent un champ magnétique opposé au champ d'excitation entraînant une variation de l'impédance de la bobine, la mesure de celle-ci est à la base de contrôle par courant de Foucault (figure 2.1).

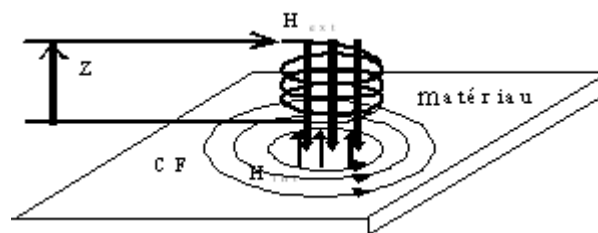


Figure 2.1 : Principe des courants de Foucault

Ce procédé de contrôle permet de déterminer les caractéristiques de la pièce à contrôler (conductivité électrique, perméabilité magnétique, dimension, revêtement,...), et déceler certaines anomalies dans la structure métalliques.

Un capteur à courants de Foucault sans la présence d'un échantillon à contrôler, possède une valeur Z_0 (dite à vide), dont les parties résistives et inductives sont respectivement R_0 et L_0 . La présence d'un échantillon à contrôler modifie l'impédance du capteur Z_1 , dont la partie résistive est R_1 et la partie inductive est L_1 (figure 2.2).

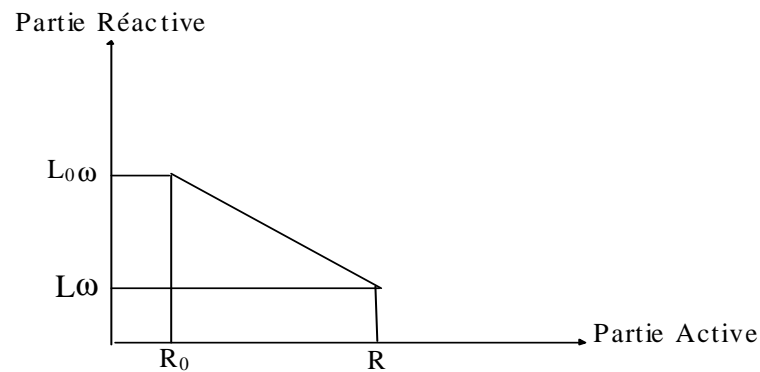


Figure 2.2 : Variation d'impédances

Les caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques de l'échantillon peuvent être extraites. Il en découle dans le matériau conducteur un champ résultant qui varie en module et en phase, en fonction de la profondeur pénétrée.

Leur intensité et leur répartition dépendent de certains paramètres tels que:

- La conductivité électrique,
- la perméabilité magnétique,
- la fréquence de travail,
- le couplage entre la pièce à contrôler et le capteur.

2.2 Théorie du contrôle par courants de Foucault

La répartition des courants de Foucault est très importante dans la définition des caractéristiques électriques et magnétiques du matériau. En effet elle est dépendante de sa structure (conductivité, perméabilité, géométrie de la pièce...), d'où toute anomalie dans le matériau entraîne la modification du parcours et de l'intensité des courants de Foucault [17]. La variation du flux dans le capteur entraîne une variation d'impédance (figure 2.2).

Pour un contrôle d'un matériau non ferromagnétique, la présence des courants de Foucault modifie les composantes de l'impédance, l'énergie magnétique des courants induits vient en déduction de celle de la bobine. On observe donc une diminution de la composante inductive [17].

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques, deux cas sont à discuter; si l'échantillon n'est pas saturé, l'énergie magnétique mise en jeu par le capteur se trouve multipliée par la perméabilité relative et la composante inductive augmente. Pour un matériau ferromagnétique saturé (perméabilité relative tend vers l'unité), les courants induits se comportent de la même manière qu'un matériau non ferromagnétique [17].

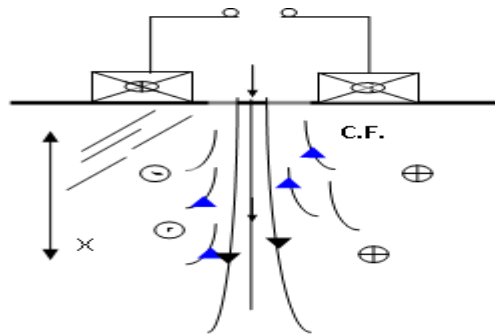


Figure 2.3 : Répartition des courants de Foucault

L'équation donnant la répartition de la densité du courant par rapport à la surface est

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (2.1)$$

Où x représente la profondeur de pénétration.

β est le déphasage entre la partie réelle et imaginaire

2.3 Profondeur de pénétration standard

La profondeur de pénétration standard est la profondeur à laquelle la densité des courants de Foucault diminue de 37% de leur valeur à la surface figure 2.4, elle dépend de la résistivité du matériau, de sa perméabilité, et de la fréquence.

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.2)$$

- où
- f est la fréquence du signal traversant le capteur en hertz,
 - μ_r est la perméabilité magnétique relative (sans unités),
 - ρ est la résistivité électrique en microhm-centimetres
 - δ Profondeur standard en millimètre

Cette relation permet de déduire la pénétration des courants dans les matériaux. Ce paramètre est important dans la mesure où il permet de quantifier les courants de Foucault ; ils subissent un déphasage qui est en fonction de la profondeur traversée [17].

$$\beta = \frac{x}{\delta} = \frac{x}{50 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}} \quad (2.3)$$

X étant la distance par rapport à la surface de la pièce en mm.

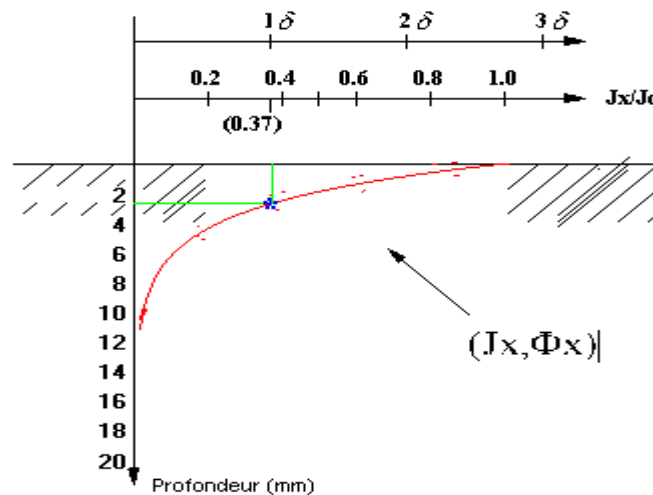


Figure 2.4 : Profondeur de pénétration

Lorsque la fréquence augmente, la profondeur de pénétration diminue. Dans ce cas, les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface du matériau. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur à contrôler.

2.4 Diagramme d'impédance normalisé

L'interprétation des résultats du contrôle par courants de Foucault est obtenue indirectement en connaissant la valeur de l'impédance du capteur à tout moment du contrôle.

Le tracé de la partie inductive en fonction de la partie résistive donne le diagramme d'impédance, qui est l'outil indispensable pour l'interprétation des résultats lors du contrôle non destructif par courant de Foucault. Ce diagramme évolue de la manière suivante:

L'augmentation de la fréquence à partir de zéro provoque l'apparition des courants de Foucault, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente de la bobine. Ces courants diminuent le flux d'où une décroissance de la réactance.

Lorsque la fréquence augmente, les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface, ils créent un champ en opposition avec le champ induit, le flux total à l'intérieur du conducteur diminue.

Pour une fréquence très élevée, le flux total tend vers zéro (effet de peau), les courants de Foucault étant localisés à la surface. Il en résulte une diminution des parties réactives et résistives de l'impédance qui tendent vers zéro.

Pour une normalisation on trace la courbe donnant L/L_0 en fonction de $R/L_0\omega$, on obtient ainsi un abaque (figure 2.4).

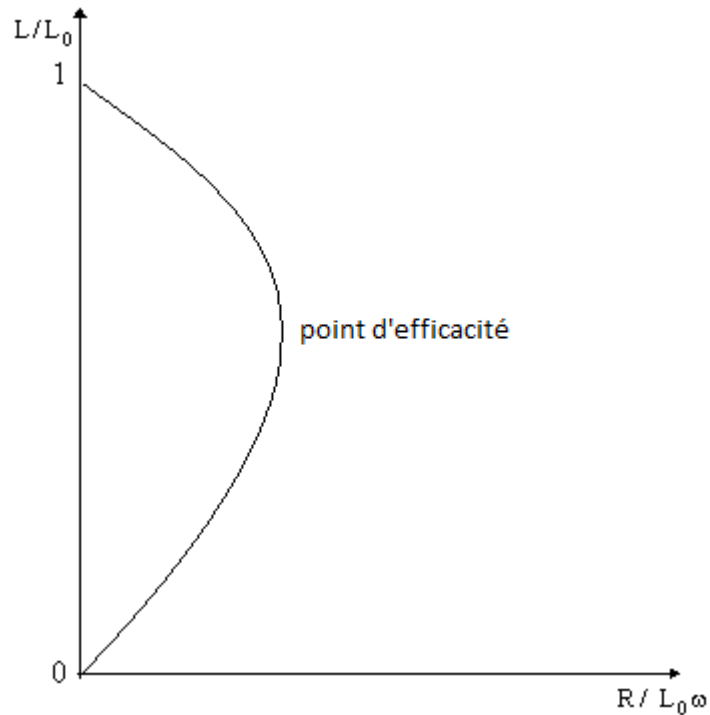


Figure 2.4 : Diagramme d'impédance normalisé

2.5 Variation des paramètres dans le diagramme d'impédance

Dans certaines conditions, il est avantageux de travailler à des endroits précis du diagramme d'impédance. Ceci est normalement possible en choisissant les paramètres appropriés pour le contrôle.

Pour des caractéristiques constantes de l'échantillon (conductivité électrique, perméabilité magnétique et dimensions), une augmentation de la fréquence de contrôle fera descendre le point d'efficacité vers le bas du diagramme.

Une augmentation de la résistivité (étant donné les autres paramètres constants) entraîne une augmentation de la résistance à la circulation des courants de Foucault, d'où le point d'efficacité se déplace vers le haut du diagramme.

Si la perméabilité relative est supérieure à l'unité, la composante réactive du capteur se trouve amplifiée et le diagramme se décale vers le haut.

Une diminution du facteur de remplissage entraîne une diminution du rayon du demi-cercle.

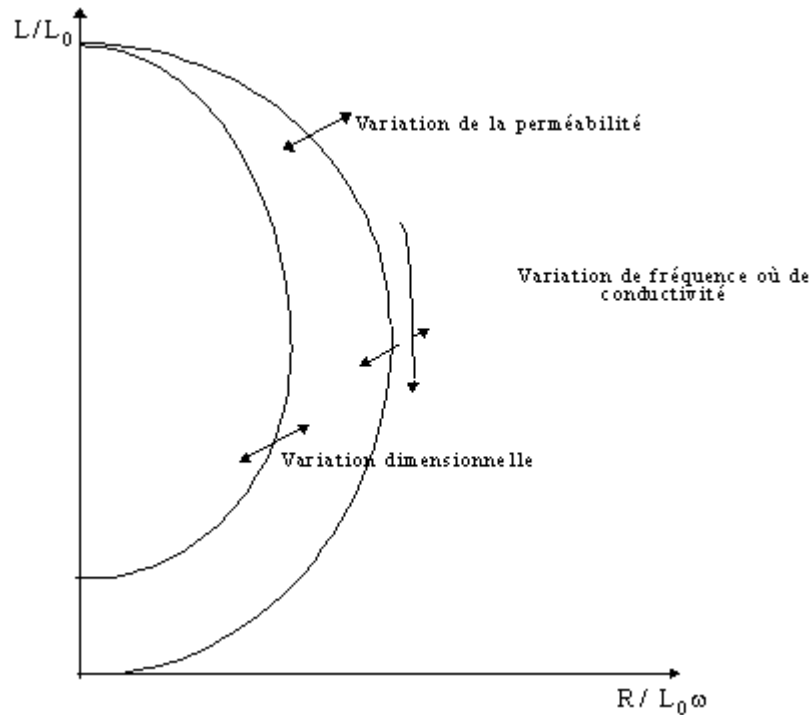


Figure 2.5 Influence des paramètres sur le Diagramme d'impédance normalisé

2.6 Choix de la fréquence de contrôle

Le premier facteur qui intervient dans le choix de la fréquence est la pénétration des courants de Foucault. Pour le contrôle, l'utilisation d'une basse fréquence permet une profondeur importante. L'autre paramètre concerne la grandeur à mesurer (caractérisation des matériaux). Concernant la mesure de conductivité, si le matériau est non ferromagnétique, l'application des équations donnent de bons résultats, par contre, si le matériau est ferromagnétique, la gamme de fréquence de contrôle est relativement faible (résistance à la pénétration des courants de Foucault). D'après les équations 2.2 et 2.3 et à une profondeur maximale qui peut être atteinte par les courants de Foucault 3δ [17].

La fréquence de contrôle appropriée est : $f = 3 \frac{\rho}{x^2}$

2.7 Types de palpeurs

Pour la technique des courants de Foucault, la réalisation de sondes ou palpeurs est très importante, elle est le lien entre le système d'analyse et le matériau. Les études les plus récentes montrent que pour chaque application, l'élaboration du palpeur doit être étudiée et optimisée. Il apparaît nécessaire de souligner, après étude de différents types de sondes avec différentes géométries, que le succès d'une recherche de faisabilité dépend en grande partie de la maîtrise des paramètres du capteur de mesure, de telle sorte que celui-ci soit adapté au mieux au problème considéré.

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault, ces bobinages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler ou selon leurs fonctions.

2.7.1 La méthode de bobinage

Capteurs absolu : le même bobinage est utilisé pour l'excitation (la génération des courants de Foucault) et la réception, c'est un capteur dont la mesure est fournie directement.

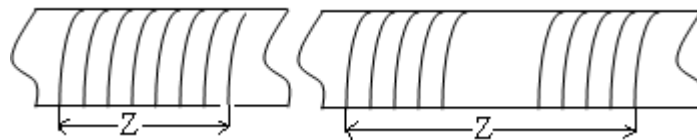


Figure 2.6 : Bobinage simple

Capteur différentiel : deux bobinages sont enroulés sur le même support en opposition, l'un est utilisé pour l'excitation et l'autre pour la réception, la mesure est la différence entre les deux.

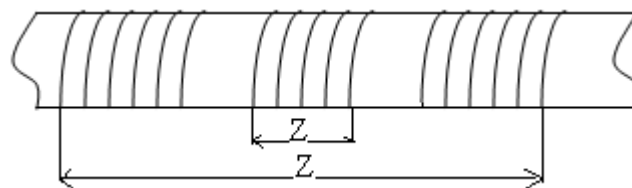


Figure 2.7 : Bobinage à fonctions séparées

2.7.2 La méthode de mesure

La méthode de l'impédance : toute variation de l'impédance permet de déceler la cause et cela grâce aux diagrammes d'impédances normalisés.

La méthode de la transmission et de la réception : dans cette méthode le contrôle par courants de Foucault se base sur les variations de la différence de tension aux bornes des deux capteurs et du déphasage entre les deux.

2.7.3 Le domaine d'utilisation

Il dépend de la géométrie de l'échantillon à contrôler, telle que les pièces cylindriques ou planes ainsi que des conditions d'emplois : températures, et vitesse du contrôle. Dans la pratique, le diamètre des transducteurs est compris entre 2.5 mm à quelques centaines de mm. Pour une construction particulière et pour un contrôle bien défini, on se base :

- Sur la valeur de la résistance.
- La valeur de l'inductance.
- L'aptitude du transducteur à déceler les variations des caractéristiques métallurgiques du matériau (éventuellement la présence de défauts).

2.8 Les pièces étalons

La méthode de contrôle par les courants de Foucault est basée sur la reproductibilité des résultats par rapport à une référence (étalon). Il est important de connaître parfaitement les qualités à exiger d'une pièce étalon.

- Pièces de géométrie simple.
- Nécessité d'avoir un lot identique de même nuance, de même dimensions.
- Les défauts étalons à réaliser doivent être proche des défauts réels.

2.9 Modèles

Les phénomènes électromagnétiques reliés au contrôle non destructif par courants de Foucault sont issus des principes de base de la théorie. La résolution des équations de MAXWELL a intéressé beaucoup de scientifiques, la complexité de l'interaction du champ avec la matière a limité les modèles capables de décrire ses phénomènes électromagnétiques à des cas bien spécifiques, en particulier les applications en contrôle non destructif, où il n'y a pas de modèle capable de décrire tous les phénomènes électromagnétiques. Toute cette complication a fait apparaître différents types de modèles (Modèles Mathématiques, Modèle Numérique...).

2.9.1 Modèles Mathématiques

Par définition, un modèle est la conception d'un système mathématique qui obéit à certaines conditions de base qui découlent des lois de la physique afin d'expliquer et de comprendre les systèmes physiques analogues [18].

La valeur du modèle établi dépend de son habilité à reproduire les mêmes réponses du système réel. Les phénomènes électromagnétiques et celles relatés au contrôle non destructif par courants de Foucault sont décrites par les équations de Maxwell. La conception de modèles mathématiques n'est pas possible avant d'avoir pu expliquer l'interaction du champ électromagnétique avec le matériau dans tous ses aspects.

2.9.2 Modèle Analytique

Les modèles analytiques sont issus des principes de bases de la théorie du champ et essayent de résoudre directement les équations de Maxwell. Ces modèles offrent des solutions à ces équations différentielles non linéaires à trois dimensions, pour des cas de géométrie spécifiques et des conditions d'excitations simples [19].

2.9.3 Modèle Numérique

L'aspect le plus important de la modélisation numérique est que les conditions initiales établies dans le modèle analytique ne sont pas nécessaires pour avoir une solution approchée. De même que le modèle analytique, les équations du système découlent des équations de Maxwell. Il y'a différentes manières de procéder et chacune demande une formulation des équations d'origines selon une forme particulière pour obtenir une formulation simple mais pas nécessairement résoluble. Une formulation linéaire devra être établie en premier lieu comme première approximation. Les modèles numériques sont plus puissants que les modèles analytiques et ils s'attaquent à des problèmes plus complexes. Les solutions approchées sont obtenues comme des données numériques ou il n'est pas possible de déduire les paramètres tel que le permet le modèle analytique [18].

2.9.4 Modèle de calcul d'impédance de la bobine

Le système sonde-conducteur est équivalent à une inductance en série avec une résistance [20] dont on peut calculer les valeurs, en s'appuyant sur le fonctionnement d'un circuit RLC, avec une valeur constante de la capacité de décharge. Ce circuit se compose d'un condensateur, d'une self-inductance et d'une résistance; il est représenté par la figure (2.8).

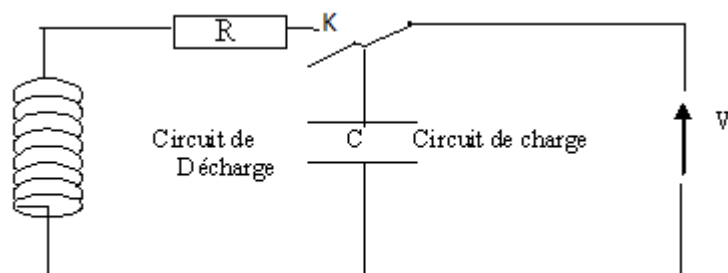


Figure 2.8: Analogie électrique d'un matériau à contrôler

Soit Q la charge du condensateur de ce circuit à l'instant t . V est la différence de potentiel aux bornes du condensateur. La relation entre le courant I et la tension V aux bornes du condensateur est:

$$I = -\frac{dQ}{dt} \quad (2.4)$$

$$Q = C V \quad (2.5)$$

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (2.6)$$

D'après les équations ci-dessous ; nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2V}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC} V = 0 \quad (2.7)$$

C'est une équation différentielle du deuxième ordre, dont la solution est de la forme:

$$V = A e^{-\alpha t} \cos \omega t \quad (2.8)$$

Où A et α sont des constantes.

En remplaçant l'expression de V dans l'équation (2.7), on obtient :

$$\left(\alpha^2 - \omega^2 - \alpha \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}\right) \cos(\omega t) + \left(2\alpha\omega - \frac{R}{L}\omega\right) \sin(\omega t) = 0$$

Les conditions aux limites nous permettent de trouver les équations:

$$\left(\alpha^2 - \omega^2 - \alpha \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}\right) = 0 \quad (2.9)$$

$$\left(2\alpha\omega - \frac{R}{L}\omega\right) = 0 \quad (2.10)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{R}{2L} \quad (2.11)$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} - \alpha^2 \quad (2.12)$$

Ce qui implique la détermination des parties importantes du capteur, à savoir ses parties inductive et résistives, qui sont :

$$L = \frac{1}{(\omega^2 + \alpha^2) C}$$

$$R = \frac{2\alpha}{(\omega^2 + \alpha^2) C}$$

Avec ω la pulsation d'oscillation et α le coefficient d'amortissement.

2.10 Conclusion

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est destinée uniquement pour des matériaux conducteurs, il est utilisé exclusivement pour le scan des couches minces telles les revêtements et épaisseurs d'isolations.

CHAPITRE III

CONSTRUCTION DES CAPTEURS

3.1 Introduction

Dans le contrôle non destructif par courant de Foucault, la conception des capteurs ainsi que leurs caractérisations sont très importantes pour faciliter l'interprétation des résultats.

C'est par l'intermédiaire d'un champ magnétique variable que s'établit l'interaction entre le dispositif de mesure et le spécimen à contrôler. La mesure peut s'effectuer sans contact. Toutefois une distance faible est recommandée du fait de la décroissance rapide des champs électromagnétiques dans l'air [21] afin de focaliser au maximum le champ produit vers la zone utile.

3.2 Principe d'un capteur

La sensibilité aux défauts et autres paramètres du contrôle des pièces peut être modifiée par la conception des sondes. Les capteurs à courants de Foucault sont des enroulements électriques qui génèrent un champ magnétique lorsqu'ils sont alimentés par un signal variable. Dans le contrôle non destructif par courants de Foucault, on rencontre:

- Les bobines, pour le contrôle extérieur de tubes (ou de barres pleins),
- Les sondes pour le contrôle intérieur de tubes, ou le contrôle de pièces planes.

Un capteur est constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant variable. L'approche d'une pièce conductrice modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et l'apparition des pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la pièce.

3.3 Principaux paramètres influant la construction des capteurs

La caractérisation du matériau dépend directement de la conductivité électrique σ et la perméabilité magnétique μ dont il faut tenir compte [22,23]. Elle dépend en plus de la distance séparant le capteur de la pièce à inspecter [23-24,25].

La fréquence d'excitation de la bobine sera choisie en tenant compte des profondeurs de pénétration adéquates. Le point de fonctionnement sur le diagramme d'impédance permet une bonne discrimination des différents paramètres.

L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité électrique envoyée dans la bobine n'est pas un facteur déterminant du contrôle dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour travailler dans la zone de Weiss [26, 27,28].

En conclusion ; lors de conception des sondes à courants de Foucault, il faut tenir compte des paramètres suivants :

- La position du point de fonctionnement sur le diagramme d'impédance.
- L'inductance et la résistance de la sonde.
- L'aire de détection.
- La variation de sensibilité en présence d'un noyau (ferrite).

3.4 Construction des sondes

La forme de la sonde, sa section transversale, sa taille, sa configuration et sa source d'excitation sont tous des paramètres qui interviennent dans la construction des sondes à Courants de Foucault. Elles peuvent être aussi longues ou courtes, à section transversale rectangulaire, circulaire ou elliptique, avec noyaux magnétiques, non magnétique ou à air, avec ou sans blindage. La construction de capteurs est gouvernée par les paramètres, inductance de la sonde, sa résistance, distribution du champ à son voisinage, sa réponse en présence d'un matériau vis à vis d'un défaut et de la distance du matériau.

La construction des sondes peut être aussi influencée par d'autres paramètres assez complexes tel que la fréquence d'excitation, le champ magnétique requis, impédance requise, forme spéciale et lignes de champ de trajectoires spécifiques. Certains de ces paramètres réagissent de manière opposée d'où la nécessité d'optimiser ces paramètres judicieusement.

La caractérisation des sondes par courants de Foucault est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance normalisé, il est obtenu par un balayage de fréquences ; il permet de déterminer la meilleur gamme de fréquences où l'interaction sonde matériau est optimale ainsi que la sensibilité du capteur.

3.4.1 Choix de la forme de la sonde

On assimilant le champ magnétique résultant à un point matériel, on minimise le champ latéral, d'où le choix de la forme conique pour la construction des sondes figure 3.1.

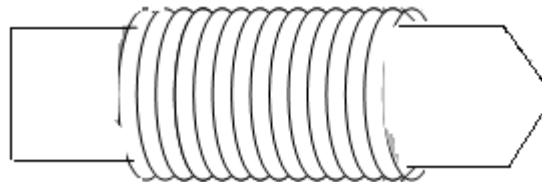


Figure 3.1 Forme du capteur à courants de Foucault

La sensibilité aux défauts et autres paramètres du contrôle de pièces peut être modifié par la conception de la sonde, il suffit d'établir la direction de circulation des courants de Foucault, de régler l'intensité du champ magnétique, de choisir la sonde de taille appropriée et de la géométrie de la pièce à contrôler.

Les sondes, que nous avons réalisées effectuent des mesures ponctuelles, elles sont maintenues perpendiculaires à la surface, la distance bout de sonde et plan de l'échantillon (coefficient de remplissage) doit être minimum, le support que nous avons utilisé est un bâtonnet de ferrite de forme circulaire, dont le bout est de forme conique.

3.4.2 Calcul des différents paramètres

L'impédance d'une sonde à Courants de Foucault est donnée par :

$$Z = R + jL\omega \quad (3.1)$$

La partie réelle de la sonde R est donnée par la loi d'ohm :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad \text{avec } L \text{ Longueur du fil} \quad (3.2)$$

S section du fil

Le diamètre de la sonde est un des paramètres important de la sonde d'où :

$$R = \frac{\rho \pi D N}{S} \quad \text{avec } D \text{ Diametre de la sonde} \quad (3.3)$$

N Nombre de spires

Le calcul de l'impédance se fait pour des sondes à vide, afin de prendre en considération les pertes dans le noyau qui sont très difficile à évaluer, en particulier pour les noyaux de ferrites.

La partie réactive est alors calculée en supposant seulement l'effet inductif [19].

$$L = \frac{4 \Pi S 10^{-7}}{l} \quad \text{avec } S : \text{section et } l : \text{longueur du fil} \quad (3.4)$$

Si la longueur de la bobine n'est pas grande devant son diamètre, un paramètre correcteur « k » est introduit appelé le coefficient de « Nagaoka » obtenu selon la formule de « Nagaoka » ou selon des tables en fonction du rapport (r/l).

Les sondes à courants de Foucault sont généralement fabriquées à section rectangulaire, courte, multicouche.

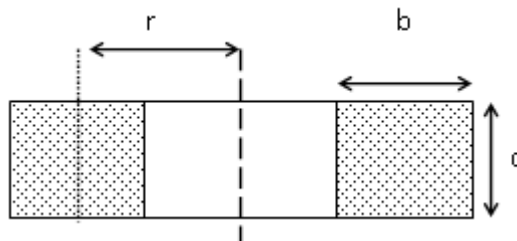


Figure 3.2: Sonde à courants de Foucault

Deux expressions existent pour un solénoïde relativement long ($c \gg b$) ou relativement court ($b \gg c$).

$$\begin{aligned} \text{pour } c > b \quad L &= 0.019739 \frac{2 r N^2 (K - k)}{b} \\ c > b \quad L &= 0.001 (N^2 r p f) \end{aligned} \quad (3.5)$$

(K, k, p, f): coefficients déterminés selon des tables de « Nagaoka » en fonction de c/b pour un solénoïde. Ces formules sont précises mais demandent des interpolations selon des graphes et des tables [2,3,4]. Dans différents cas, des formules approximatives plus simples sont utilisées.

$$\begin{aligned} \text{pour } \frac{b}{c} > 10 \quad L &= \frac{r^2 N^2}{9r + 10b} - \frac{cr N^2}{10 \Pi b} \\ b \text{ et } c < r \quad L &= \frac{r N^2}{13.5} \log_{10} \left(\frac{4}{\sqrt{b^2 + c^2}} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.4.3 Champ magnétique créée par une spire

La représentation suivante simule une spire; elle permet d'évaluer le comportement des courants de Foucault dans un matériau ; ainsi que l'influence de l'impédance de la bobine excitatrice sur le matériau [30].

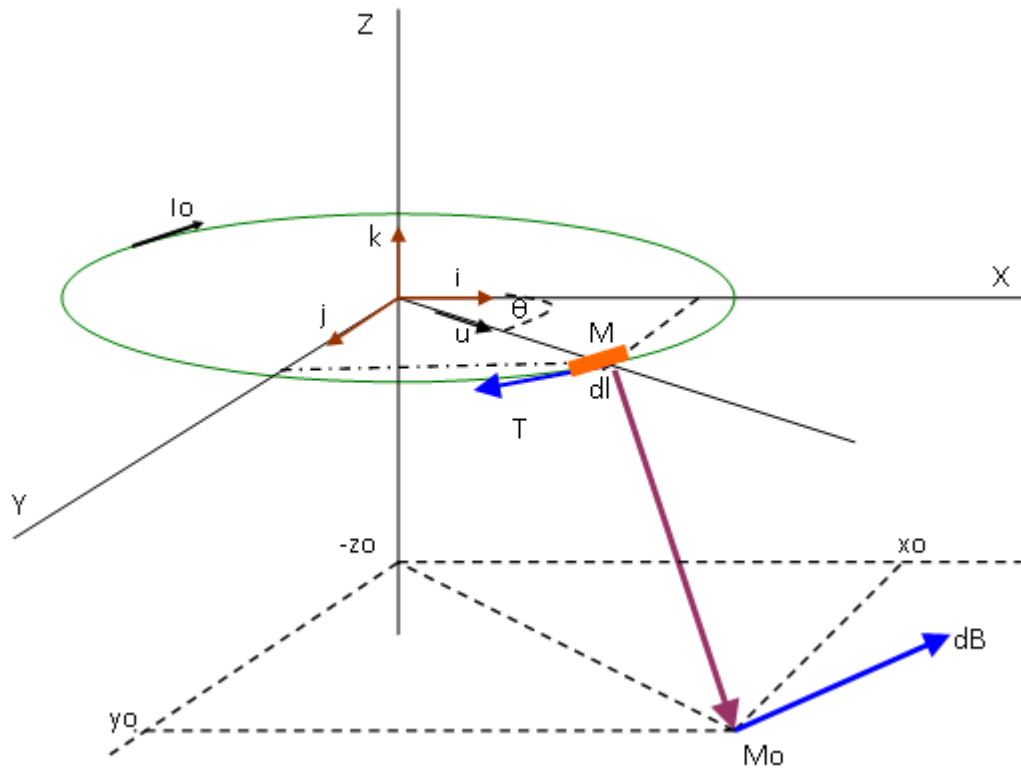


Figure 3.3 : Champ magnétique créée par une spire

$$\vec{OM} = x \vec{i} + y \vec{j} = R [\cos\theta \vec{i} + \sin\theta \vec{j}]$$

$$\vec{OMo} = x_o \vec{i} + y_o \vec{j} - z_o \vec{k}$$

$$MMo^2 = (x_o - R\cos\theta)^2 + (y_o - R\sin\theta)^2 + z_o^2$$

$$MMo^2 = x_o^2 + y_o^2 + z_o^2 + R^2 - 2R(x_o \cos\theta + y_o \sin\theta)$$

$$dl = R d\theta$$

$$\vec{dl} = R d\theta \vec{T} \quad \text{avec} \quad \vec{T} = x_t \vec{i} + y_t \vec{j} \quad (3.7)$$

$$\vec{u} = \cos\theta \vec{i} + \sin\theta \vec{j}$$

$$\vec{T} \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{d'où} \quad \vec{T} = \sin\theta \vec{i} - \cos\theta \vec{j} \quad (3.8)$$

$$d\vec{l} = (R \sin\theta \, d\theta) \vec{i} + (R \cos\theta \, d\theta) \vec{j} \quad (3.9)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 d\vec{l} \wedge \frac{\vec{MM}_0}{MM_0^3} \quad (3.10)$$

Sachant que $\vec{i} \wedge \vec{j} = \vec{k}$, $\vec{j} \wedge \vec{k} = \vec{i}$ et $\vec{k} \wedge \vec{i} = \vec{j}$

$$d\vec{l} \wedge \vec{MM}_0 = \left[(R \sin\theta \, d\theta) \vec{i} - (R \cos\theta \, d\theta) \vec{j} \right] \wedge \left[(x_0 - R \cos\theta) \vec{i} + (y_0 - R \sin\theta) \vec{j} - z_0 \vec{k} \right] \quad (3.11)$$

$$d\vec{l} \wedge \vec{MM}_0 = (R \sin\theta \, d\theta)(y_0 - R \sin\theta) \vec{k} + z_0 (R \sin\theta \, d\theta) \vec{j} + (R \cos\theta \, d\theta)(x_0 - R \cos\theta) \vec{k} + z_0 (R \cos\theta \, d\theta) \vec{i} \quad (3.12)$$

$$d\vec{l} \wedge \vec{MM}_0 = R d\theta \left[(Z_0 \cos\theta) \vec{i} + (Z_0 \sin\theta) \vec{j} + (\sin\theta \, y_0 + x_0 \cos\theta - R) \vec{k} \right] \quad (3.13)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 R d\theta \frac{\left[(Z_0 \cos\theta) \vec{i} + (Z_0 \sin\theta) \vec{j} + (\sin\theta \, y_0 + x_0 \cos\theta - R) \vec{k} \right]}{\left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + R^2 - 2R(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta) \right]^{3/2}} \quad (3.14)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 R \int_0^{2\pi} \frac{\left[(Z_0 \cos\theta) \vec{i} + (Z_0 \sin\theta) \vec{j} + (\sin\theta \, y_0 + x_0 \cos\theta - R) \vec{k} \right]}{\left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + R^2 - 2R(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta) \right]^{3/2}} d\theta \quad (3.15)$$

L'expression analytique de B [31] dépend de la résolution de l'intégrale. L'emploi de procédés numériques d'intégration est plus judicieux, vu que nous recherchons que les propriétés de l'induction elle-même en fonction de certains paramètres où l'allure est suffisante.

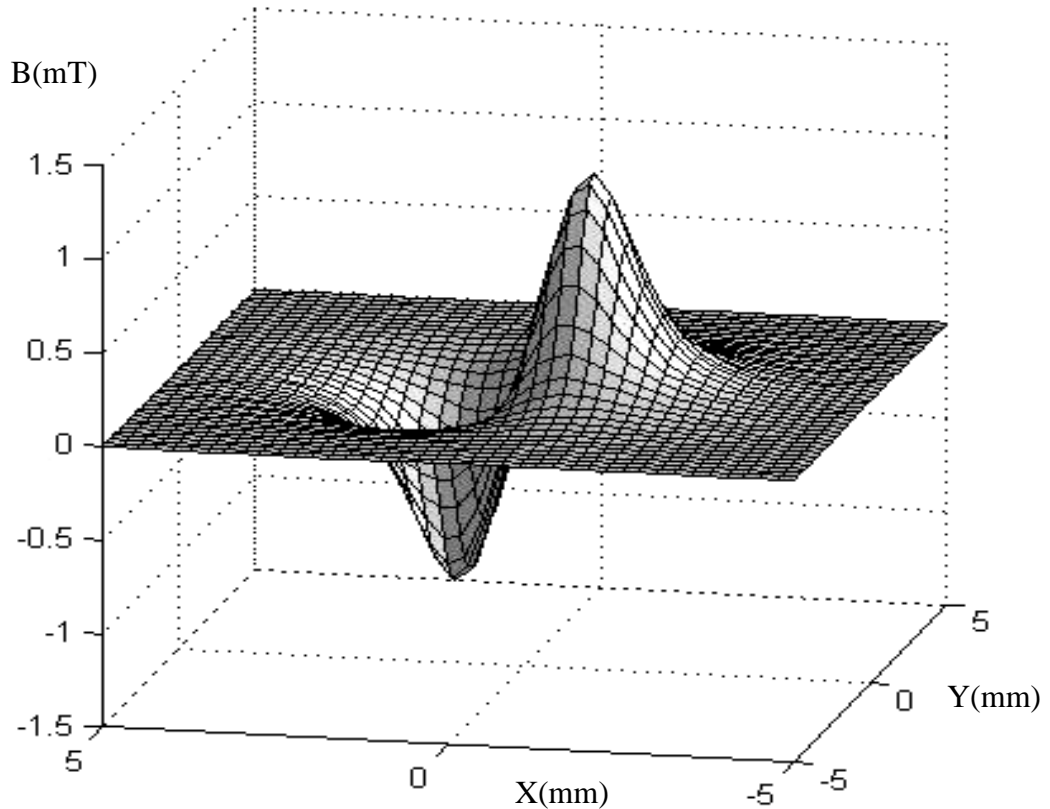


Figure 3.4: L'allure de l'induction magnétique B_x selon le plan (O,X,Y)

La figure (3.4) montre le comportement du champ magnétique B_x créée par une spire de rayon 1 mm en fonction des coordonnées cartésiennes x , y . L'allure de l'induction nous indique que l'influence de celle-ci est négligeable au centre de la spire due à la symétrie du système mais elle est importante à ses extrémités jusqu'au changement total du sens d'orientation de l'induction.

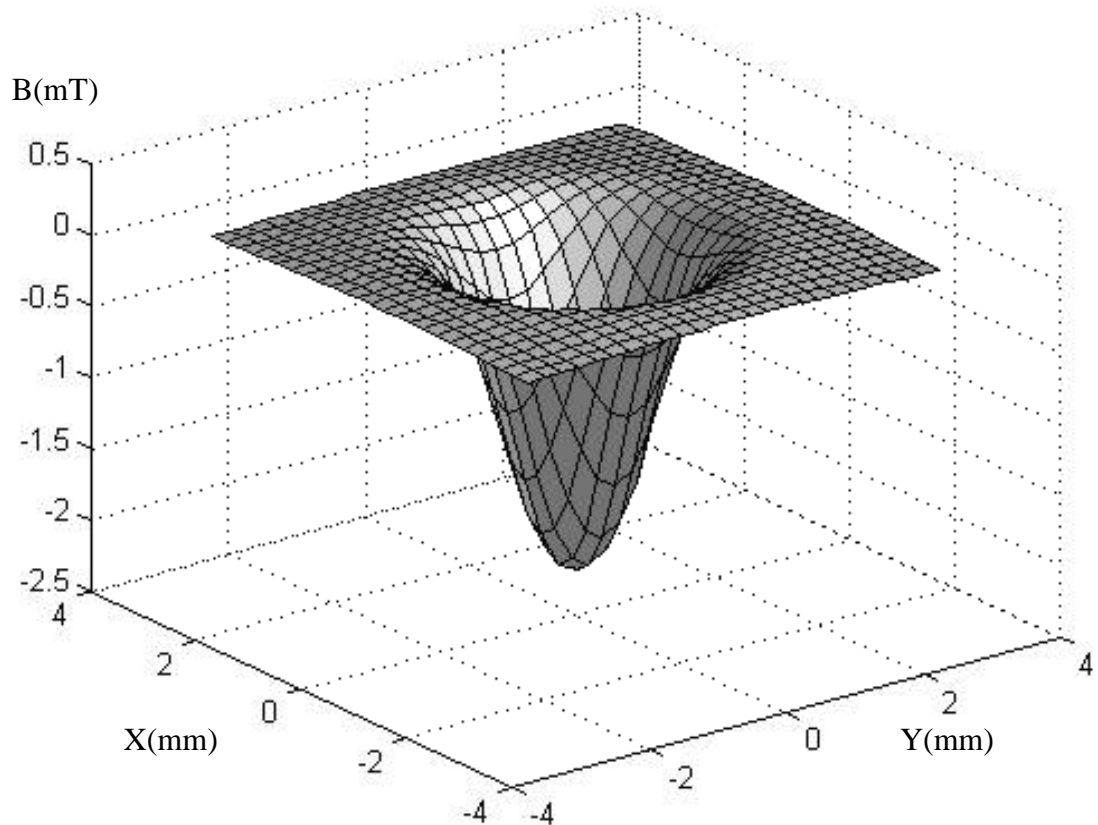


Figure 3.5 : L'allure de induction magnétique B_z selon le plan (O,X,Y)

La figure (3.5) nous montre le comportement du champ magnétique B_z selon le plan (O,X,Y). L'induction en forme de cloche nous indique que l'induction est maximale au centre de la spire et s'atténue exponentiellement.

Selon les figures (3.3 et 3.4) on constate que le champ d'action d'une sonde peut s'étendre jusqu'à deux fois son diamètre et l'uniformité peut être considérée si on travaille près du centre de la bobine.

Un bobinage est caractérisé par les valeurs de son inductance et de sa résistance.

La tension aux bornes de la bobine de contrôle est : $V = ZI$

Où I est le courant passant dans la bobine et Z son impédance.

La valeur de l'impédance est calculée à l'aide de l'équation : $|Z| = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$

Et la phase de l'impédance est calculée à l'aide de : $|\theta| = \text{Arctg} \frac{L\omega}{R}$

3.4.3.1 Calcul de la résistance

Le calcul de la valeur de la résistance R de la sonde se fait par la loi d’OHM:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3.16)$$

L : longueur du fil [m],

ρ : Résistivité du fil [Ω/m],

S : section du fil [m^2],

R : est la valeur de la résistance en ohm [Ω]

3.4.3.2 Calcul de l’inductance

La valeur de l’inductance L est calculée par la formule approchée de NAGAOKA:

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \quad (3.17)$$

On suppose que c’est un circuit fermé

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l} \quad (3.18)$$

μ : est la perméabilité magnétique du milieu(Annexe I-1), elle égale à $\mu_0 \mu_r$, avec μ_r est la perméabilité relative.

N : nombre de spire,

S : section de solénoïde [mm],

l : longueur de solénoïde [mm],

L : valeur de l’inductance en henry (H)

Les courants de Foucault et le flux magnétique qui leur est associé sont proportionnel à la distance radiale du centre de la sonde.

Le flux magnétique est proportionnel à l’induction du capteur et par suite au courant de passage. Le calcul théorique de cette inductance est donné par la relation suivante:

$$L_0 = 4\pi \mu_r N^2 \left[l_n \frac{8F}{K} - 0.2 \right] 10^{-10} \quad (3.19)$$

Avec

$$r = \frac{a + c}{4} \quad \text{en mm}$$

$$k = 0.112 [2l + a + d] \quad \text{en mm}$$

3.5 Réalisation des capteurs

Nous avons opté pour le contrôle des pièces planes, d'où la nécessité d'utiliser des capteurs. La réalisation des capteurs est très importante dans le domaine du contrôle non destructif par les courants de Foucault. Il permet à la fois de créer les courants et de recueillir le signal, dans notre cas nous maintenons la surface de contact constante, l'induction est proportionnelle à:

- la perméabilité relative (élevée, ferrite)
- le courant (aucune accessibilité)
- le nombre de spires (permettant d'avoir une tension importante).

Afin de construire un capteur fiable, nous avons optimisé le nombre de spires en prenant un fil de très faible section.

3.6 Conclusion

La réalisation des capteurs est très importante dans le domaine du contrôle non destructif par les courants de Foucault. Il permet à la fois de créer les courants et de recueillir le signal, dans notre cas nous maintenons la surface de contact constante, l'induction est proportionnelle à la perméabilité relative, aux courants et au nombre de spires.

On augmente la sensibilité et le champ généré par le capteur en choisissant un noyau de géométrie spécifique (conique) et de matière hautement magnétique (ferrite).

CHAPITRE 4

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Réalisation des échantillons

4.1.1 Introduction

Malgré l'avènement de nouveaux matériaux, Les aciers fer-carbone restent d'une importance capitale pour le monde industriel. Dans cette partie de la thèse, nous allons expliquer la réalisation des échantillons qui seront utilisés.

Le centre de recherche en technologies de soudages et techniques de contrôle est un pôle de référence au niveau nationale et régionale dans ce domaine. La réalisation de nos échantillons a été confiée à l'atelier de soudage, où une équipe de soudeurs hautement qualifiés s'est penchés pour la réalisation des défauts.

4.1.1. Soudage

Le soudage est une opération consistant à assembler deux ou plusieurs parties d'un système, de manière à assurer la continuité. On distingue plusieurs procédés ; les plus répandus sont :

- Procédé à l'arc avec électrode enrobée.
- Procédé à l'arc en milieu gazeux inerte.
- Procédé à l'arc en milieu gazeux actifs.
- Procédé à l'arc sous flux.

Le soudage à l'arc électrique est le procédé industriel le plus répandu pour l'assemblage des aciers. Il est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. Un générateur électrique fournit le courant, son intensité dépend de plusieurs paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler [32].

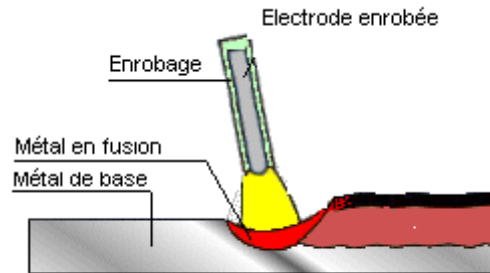


Figure 4.1 : Soudage à l'arc

Une fois l'opération de soudage achevée, le produit obtenu doit être inspecté pour déceler d'éventuels défauts nuisibles lors de sa future utilisation. Pour cela, on fait appel au domaine du contrôle non destructif, qui fournit une panoplie de méthodes pour l'évaluation.

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser les structures, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. Le choix d'une technique dépend essentiellement de :

- Défauts recherchés
- Coût
- Sécurité
- Qualification du personnel

On énumérera les défauts les plus rencontrés dans l'industrie du soudage :

Fragilité : Le soudage chauffe localement le métal, il s'agit d'un traitement thermique. Il y a donc une modification locale de la microstructure.

Corrosion : La soudure est la juxtaposition de deux métaux différents.

Porosités : Il s'agit de défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchant. Elles sont causées par l'air ou l'eau.

Soufflures : Ce terme désigne un groupe de porosités non débouchantes. Quand elles sont allongées, on parle de soufflures vermiculaires. Si elles sont débouchantes, on parle alors de piqûres.

Inclusions : Elles désignent un composé étranger à la soudure et peuvent contenir du tungstène ou du laitier ou encore des oxydes.

Collage ou manque de pénétration : Le métal de base n'est pas fondu, ce qui diminue la section efficace de la soudure.

Fissures : Elles sont dues à des contraintes mécaniques lors de l'opération de soudage ou durant la phase de refroidissement

Défauts géométriques : Ces défauts peuvent être des défauts d'alignement entre les pièces.

Une fois les échantillons soudés, meulés et nettoyés de toutes salissures et bavures (figure 4.2), un contrôle par une technique de contrôle non destructif sera utilisé afin de déterminer l'existence d'éventuels défauts. Pour cela nous avons fait appel à la radiographie par les rayons X.

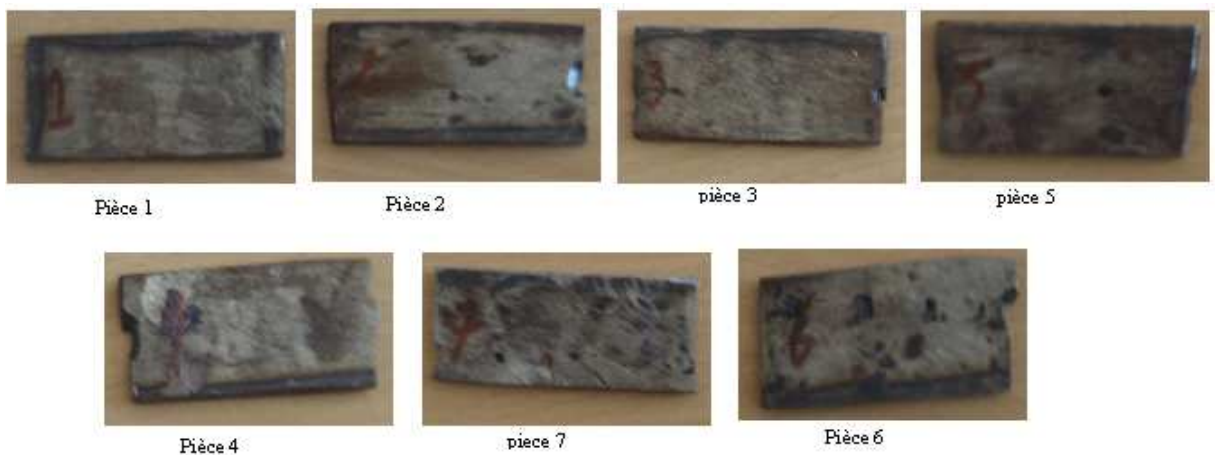


Figure 4.2 échantillons

4.1.3 Radiographie des échantillons

Le choix des rayons X est motivé pour deux raisons ; l'une sécuritaire, c'est-à-dire, à tout moment on peut interrompre l'opération en éliminant la source d'alimentation et la seconde est dictée par les dimensions des échantillons, il est plus facile de radiographier des pièces minces par rayons X.

Le principe de la technique de l'examen par radiographie utilise un faisceau de radiations électromagnétiques pénétrantes dirigé vers la pièce à inspecter. Suivant la nature et la géométrie de la pièce, une portion du faisceau est absorbée et/ou déviée. La radiographie par X consiste à bombarder une cible de tungstène par des électrons de haute énergie, ils sont déviés en raison de leur charge négative. Cette déflexion impose une diminution de l'énergie de l'électron; énergie qui est émise sous la forme d'un rayonnement X (figure 4.3).

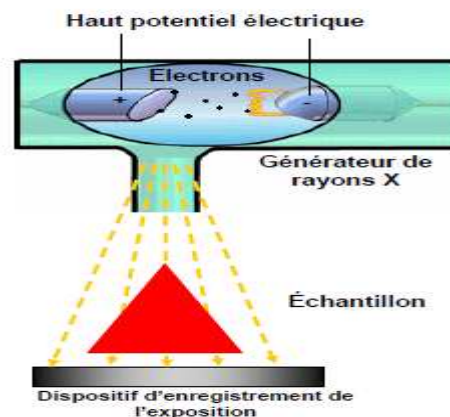


Figure 4.3 : principe de la radiographie

En créant une image à partir de l'intensité de la radiation derrière la pièce, des variations d'intensité sont donc observées. Ces variations correspondent à l'ombrage produit par les différentes structures (internes et externes) de la pièce inspectée (figure 4.4).

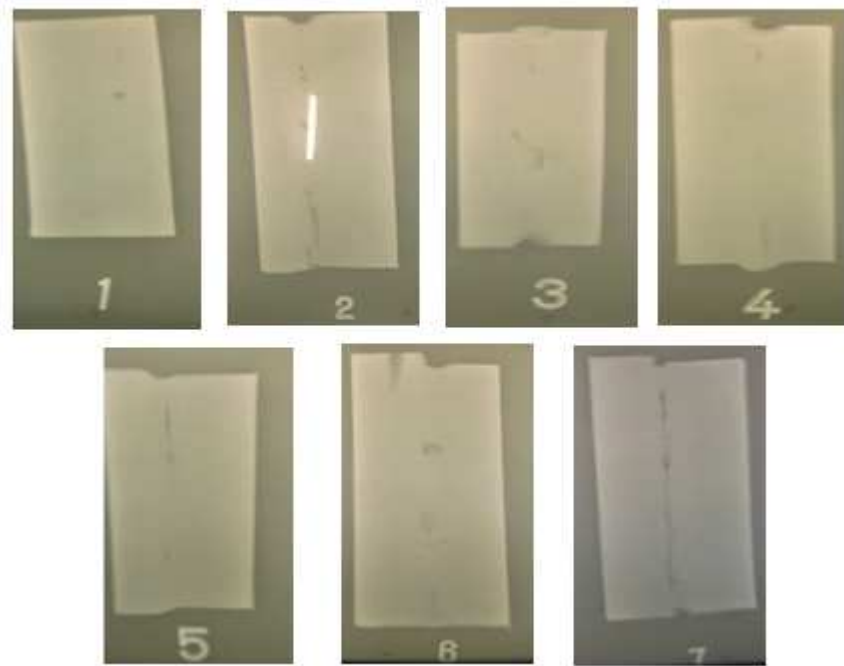


Figure 4.4 clichés des échantillons

L'interprétation des radiogrammes se fait dans une chambre noire, sous une lumière blanche intense, les résultats sont portés dans le tableau 4.1

Repère	1	2	3	4	5	6	7
Interprétation	Saine	Inclusion de tungstène	Soufflures vermiculaire	Inclusion de laitier	Soufflure allongée	Porosités	Manque de fusion

Tableau 4.1 : interprétations des résultats

4.2 Inspection par Barkhausen

Une des techniques choisie pour la détection des défauts réalisés est la technique du bruit de Barkhausen ; l'objectifs de cette partie de ce travail est de mettre en évidence le système réalisé au sein du laboratoire, il faut rappeler que dans le même système se trouve une partie destinée à l'évaluation par le tracé du cycle d'hystérésis

La génération du bruit de Barkhausen consiste à magnétiser les pièces à contrôler jusqu'à la saturation.

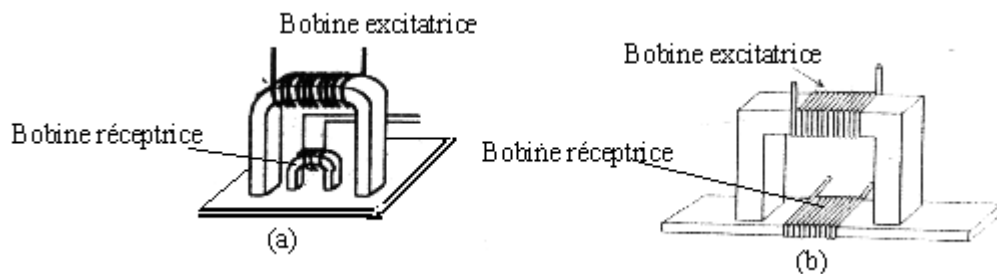


Figure 4.5 : principe de la génération du bruit de barkhausen

L'excitation magnétique de la pièce à contrôler est assurée par un électroaimant. Sa forme dépend de la géométrie de la pièce à contrôler, comme illustré sur la figure 4.5 (a) et (b); il peut être avec ou sans noyau.

Le cas idéal est l'application d'un champ à vitesse constante, car le niveau du bruit Barkhausen à chaque instant dépend de la vitesse d'application du champ.

Le bruit Barkhausen est l'image des variations brusques de l'induction magnétique. C'est la tension induite aux bornes d'un capteur électromagnétique situé dans une position bien déterminée par rapport aux lignes de champ de la pièce à contrôler (figure 4.6).

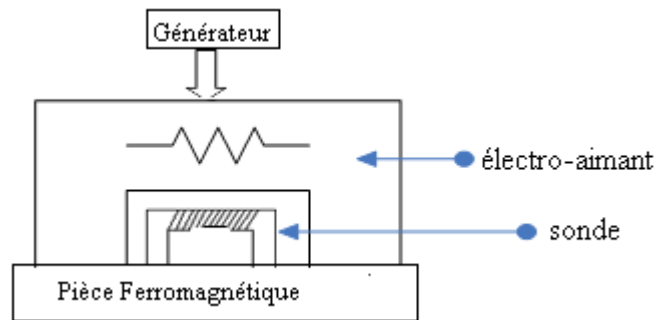


Figure 4.6 Schéma synoptique du système de mesure par bruit barkhausen

Actuellement dans le domaine du contrôle non destructif, la sensibilité des équipements est importante, dans cette partie de ce chapitre nous allons exposer la chaîne de mesure par bruits de barkhausen réalisée au niveau du laboratoire du département des procédés électriques et magnétiques du centre de recherche, le système est représenté sur la figure 4.7

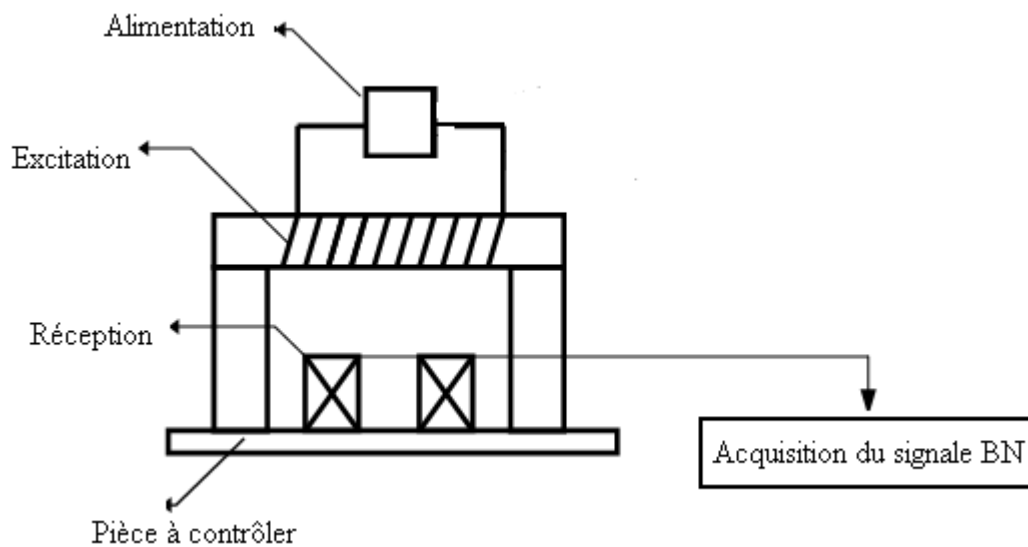


Figure 4.7 systeme de mesure du bruit barkhausen

L'acquisition et la numérisation sont faites par un oscilloscope numérique, il permet un échantillonnage de signal sur une gamme variable allant de 128 à 10000 échantillons, l'enregistrement se fait sur des supports magnétiques.

Un logiciel a été développé pour permettre le traçage des différents signaux à savoir le bruit de barkhausen et le cycle d'hystérésis. Il est à noter que durant l'acquisition des signaux, tous les paramètres pouvant altérer notre mesure à savoir un champ magnétique de fuite doivent être écartés. Le travail nécessite une sensibilité extrêmement élevée.

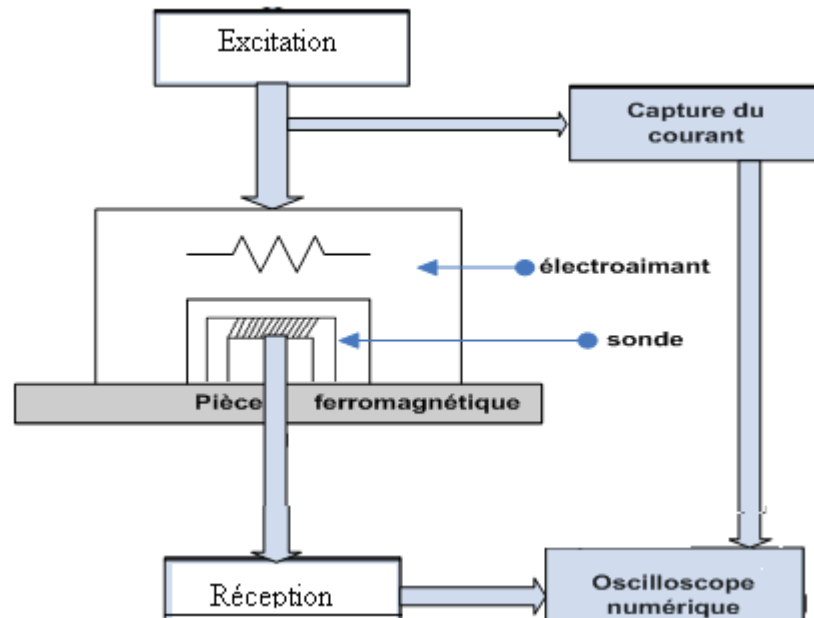


Figure 4.8 : Schéma synoptique du système

Comme illustre le schéma synoptique, Un appareillage de mesure du bruit Barkhausen comporte deux parties

L'excitation magnétique qui vise à appliquer un champ magnétique variable à la pièce à contrôler pour provoquer l'effet Barkhausen.

L'acquisition et le traitement du signal mesuré par la sonde Barkhausen et sa présentation sous une forme utilisable.

Le passage du signal du bruit de barkhausen par un filtre passe bande permet d'extraire la réponse maximale ainsi que la fréquence.

4.3 Cycle d'hystérésis

Le tracé du cycle d'hystérésis est une technique très utilisée dans le cadre du contrôle non destructif pour la caractérisation des matériaux ferromagnétiques et la détection des défauts macroscopiques. Le tracé du cycle d'hystérésis consiste à capter le vecteur d'induction magnétique B pendant une période complète et de le tracer en fonction du vecteur du champ d'excitation H .

4.3.1 Capture du champ magnétique H

La formule qui lie le paramètre magnétique H du paramètre électrique I c'est la loi de courant total

$$H = \frac{N}{l} I$$

Etant donné N : nombre de spires.

l : la longueur du circuit magnétique.

Il existe une relation linéaire entre le courant électrique qui circule dans le bobinage de l'électroaimant et le champ d'excitation magnétique créée par ce dernier. Si on fait appel à une résistance de 1Ω en série avec l'électroaimant on obtient l'image du courant de l'électroaimant aux bornes de cette résistance.

$$H = \frac{N}{l} I \quad \Rightarrow \quad V = I = \frac{l}{N} H = \alpha H \text{ Et}$$

Avec $\alpha = N/l$

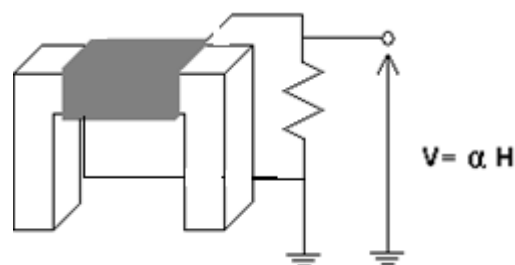


Figure 4.9 capteur magnétique

4.3.2 Capture du champ d'induction magnétique B

Le capteur magnétique traduit les variations du flux qui traversent la surface de son bobinage en une tension électrique, donc il y a le facteur dérivé entre le paramètre électrique (tension) et le paramètre magnétique (induction). La formule suivante montre cette liaison

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS\left(\frac{dB}{dt}\right)$$

Pour résoudre le problème il faut intégrer la composante basse fréquence du bruit barkhausen. On a fait l'intégrale par deux méthodes:

- Intégration analogique par un circuit intégrateur.
- Intégration numérique à l'aide des modèles mathématiques.

4.3.3 Résultats et interprétations

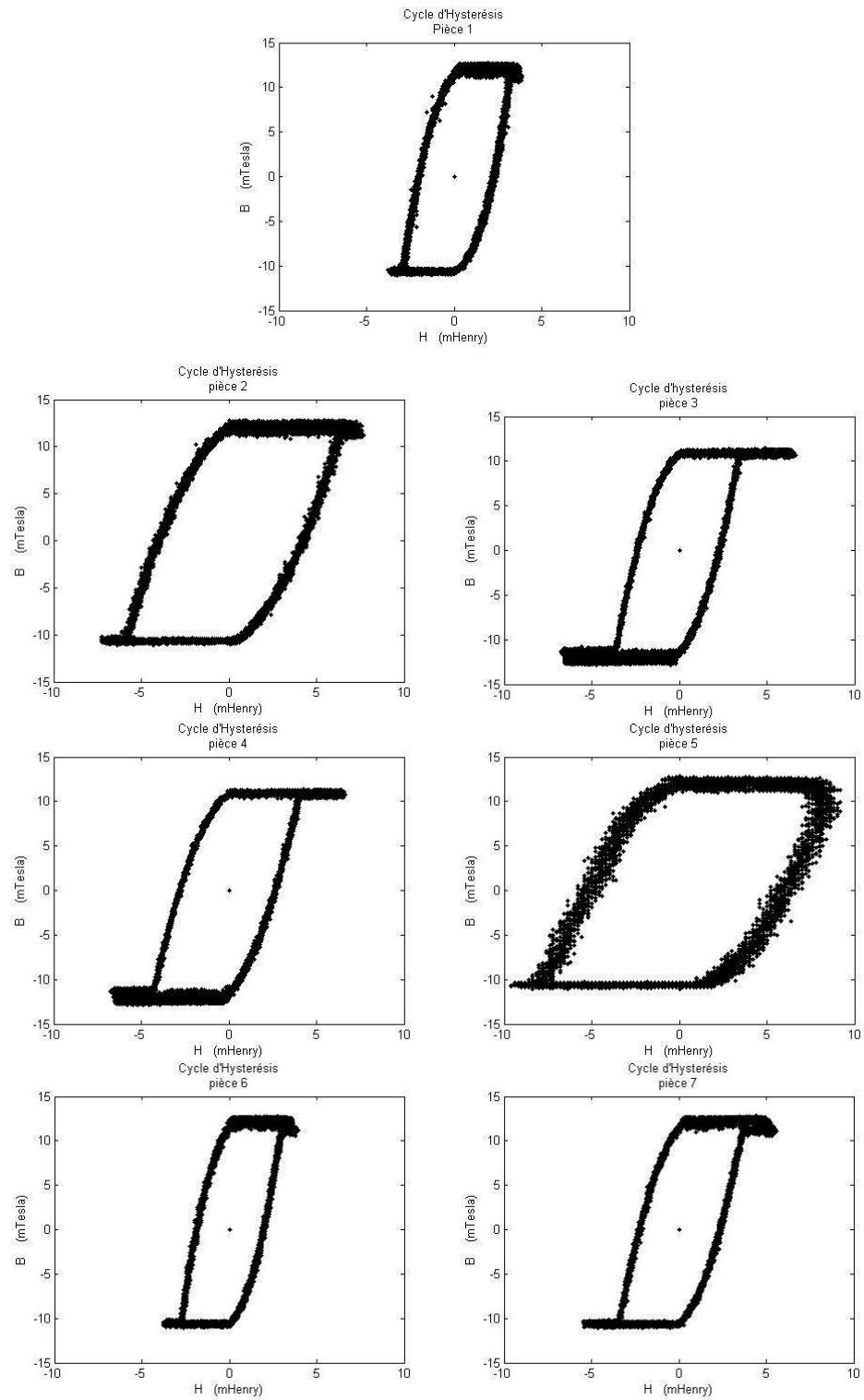


Figure 4.10 : tracé du cycle d'hystérésis

Les allures du tracé du cycle d'hystérésis est semblable pour toutes les pièces sauf pour les pièces 2 et 5 où le cycle est plus large qui présente, pour la première la présence d'un corps étranger (inclusion de tungstène) alors que la seconde présente des poches d'air, ce qui perturbe les mouvements magnétiques dans les deux structures.

4.4 Inspection par courants de Foucault

4.4.1 Développement informatiques

L'outil informatique a énormément contribué au développement de la physique des courants de Foucault, car il offre la possibilité de gérer les appareils de mesure pour acquérir les informations, de les enregistrer et de les traiter. nous avons développés un programme permettant de caractériser les sondes réalisées et en parallèle l'acquisition des données lors du contrôle ; tout en assurant la gestion automatisée des différents appareils utilisés. La chaîne d'acquisition et de contrôle, se compose (figure 4.13) :

- D'un mesureur d'impédance pilotée par l'ordinateur par le biais d'une interface GPBI NI488.2.
- D'un système de déplacement commandé par ordinateur par le biais de l'interface RS232 qui commandera les déplacements du capteur.
-

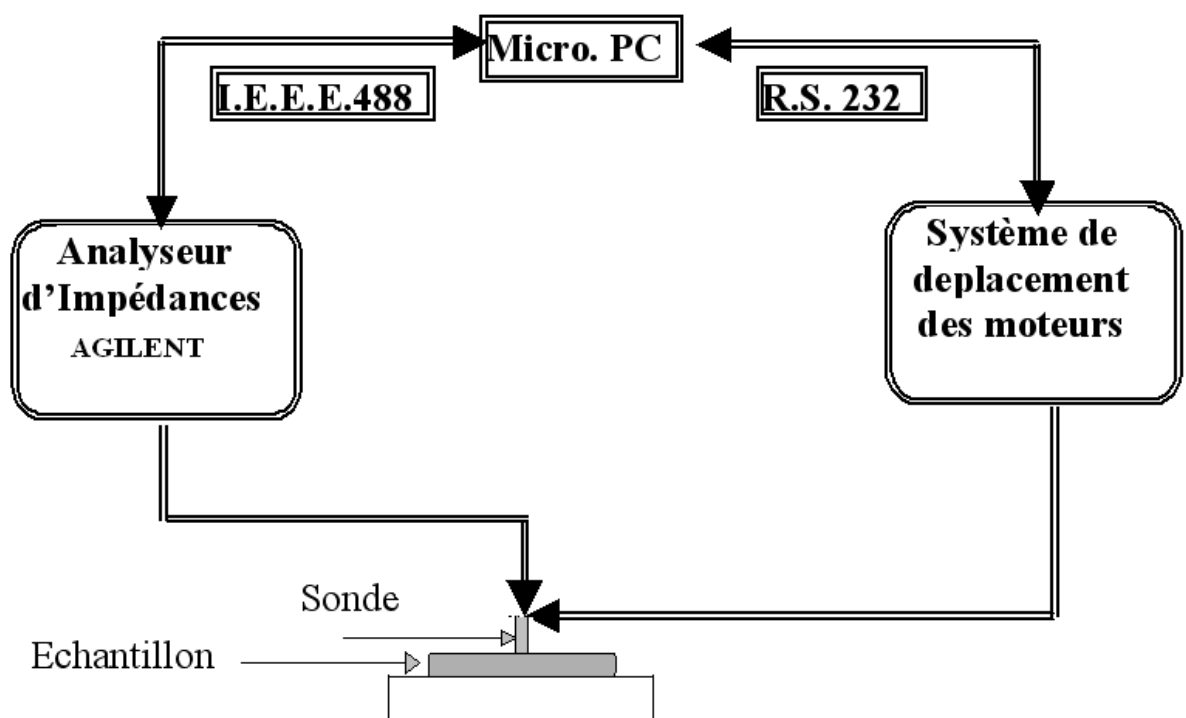


Figure 4.11 : synoptique d'une chaîne de mesure automatisée par courants de Foucault

4.4.2 Description du système de mesure

Le système de mesure est assuré par un appareil de type AGILEN. C'est un mesureur d'impédance permettant les mesures de l'impédance de la sonde, sa résistance, son inductance avec une précision de l'ordre de 10^{-12} pour des fréquences allant de 20 Hz à 1Mhz. L'appareil est interfacé avec le micro ordinateur par le biais de l'interface GPIB. Le logiciel développé doit alors assurer :

- Initialisation de la carte GPIB.
- Initialisation du mode opératoire de l'appareil
- Transmission des fréquences de mesures.
- Acquisition des mesures et leurs stockages.

4.4.3 Description du système de déplacement

Le système de déplacement est un appareil de type OWIS. Il assure des déplacements selon les trois degrés de libertés grâce à ces moteurs pas à pas de $5\mu\text{m}$ de résolution. Interfacé par le biais de l'interface série RS232. Le programme développé doit alors assurer l'initialisation du port série pour une communication synchrone et une transmission des commandes de déplacement à savoir le choix du moteur et le pas de déplacement.

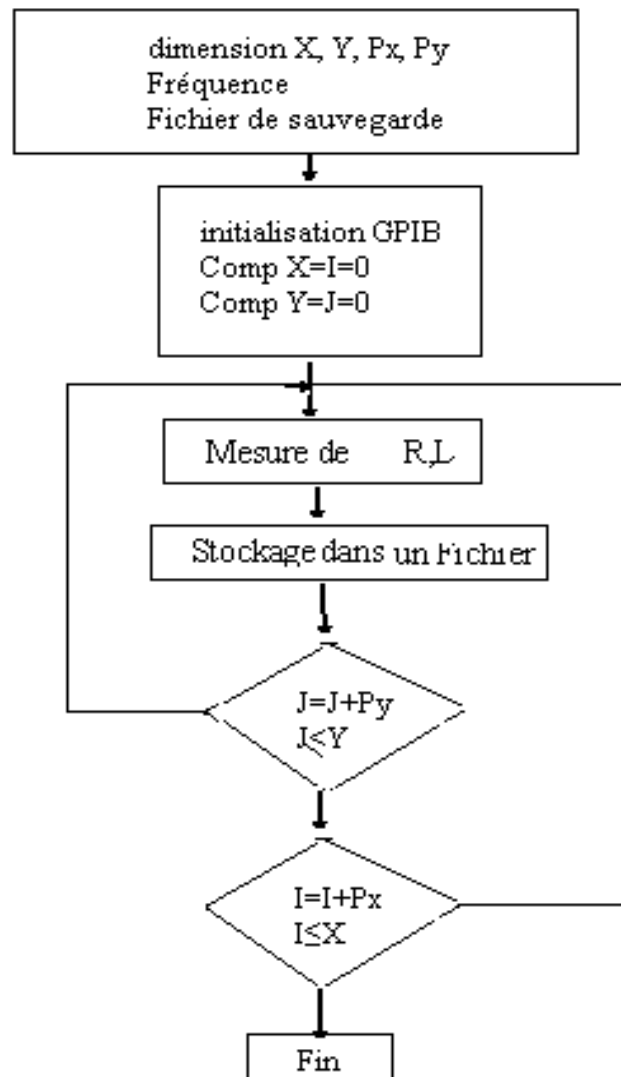


Figure 4.12 : organigramme du balayage par courants de Foucault

L'interface du programme est portée sur la figure 4.16

The screenshot displays two main panels in a software interface:

- Acquisition de AGLENT:**
 - Acquisition:** A list of parameters with checkboxes and input fields:
 - Fréquence: 0
 - Impédance (ohm): 0
 - Phase (degré): 0
 - Résistance(ohm): 0
 - Inductance (H): 0
 - Capacité (µF): 0
 - Gammes de Fréquence (Hz):** A table with columns for initial frequency (Fr (init)), final frequency (Fr (fin)), and number of points (nb(point)).

Fr (init)	Fr (fin)	nb(point)
100	1000	10
1000	10000	10
10000	20000	10
20000	100000	10
100000	1000000	10
 - Below the table: "Nom du Fichier:" followed by an empty text box.
 - Two buttons: "Debut" and "Fin".
- Système de déplacement µ-métrique:**
 - Paramètre:**
 - Nom du Fichier: [empty text box]
 - Fréquence (Hz): [spin box]
 - Port Série: COM: [dropdown menu]
 - Button: "Initialisation du port"
 - Balayage:**
 - Pas X (µm): [spin box]
 - Pas Y (µm): [spin box]
 - Distance X (µm): [spin box]
 - Distance Y (µm): [spin box]
 - Button: "Balayage Automatique"

Figure 4.13 : interface du programme

Le côté gauche de l'interface est destiné à gérer le mesureur d'impédance lors de la caractérisation des sondes ; en lui injectant les fréquences ainsi que le saut et à chaque mesure les valeurs inductives et résistives de l'impédance de la sonde ainsi que la fréquence sont stockés dans un fichier.

Le côté droit sert à l'automatisation de l'opération de contrôle ; à savoir fournir la fréquence de travail, après avoir tracé le diagramme d'impédance de la sonde réalisée, les dimensions de l'échantillon ; à savoir sa longueur et sa largeur ainsi que les pas de déplacement, à chaque déplacement le mesureur d'impédance envoie à l'interface des valeurs résistives et inductives du capteur qui seront stockés dans un fichier pour un futur traitement

4.4.4 Réalisation des capteurs

Comme, nous avons choisi de contrôler des pièces planes, nous avons conçus des palpeurs. Nous décrivons dans le tableau (4-2) les palpeurs réalisés au sein du laboratoire.

Diamètre	Diamètre du fil (mm)	longueur de la sonde (cm)	L(mH)	R(Ω)
3.4	0.123	4.4	1.354	39.278
3.4	0.123	3.9	1.222	34.276
2.6	0.123	2.8	0.053	21.765
1.8	0.123	1.9	1.258	28.688
1.1	0.123	1.3	2.076	24.613
1.5	0.23	1.5	6	13

Tableau 4.2 : sondes réalisées

Le diamètre du fil de bobinage a été choisi de telle façon à augmenter l'inductance propre des capteurs (augmentation du nombre de spires) et à diminuer la valeur de la résistance (échauffement par effet joule). L'utilisation de la ferrite comme noyau (support) des capteurs a permis:

- D'augmenter l'inductance magnétique (perméabilité magnétique importante).
- D'augmenter le flux magnétique (réluctance très faible).
- De diminuer la surface de contact.

Le choix s'est porté sur la sonde dont le diamètre de fil est de 0.23 mm. Le tracé des parties inductives et résistives en fonction des fréquence (figure 4.17 et 4.18) de la sonde choisie conforte notre choix dans la stabilité de la sonde pour un large domaine fréquentiel alors que le tracé des diagrammes d'impédances des différentes pièces réalisées (figure 4.19) permet de situer le point de fonctionnement où le transfert d'énergies entre la sonde et les échantillons est maximale

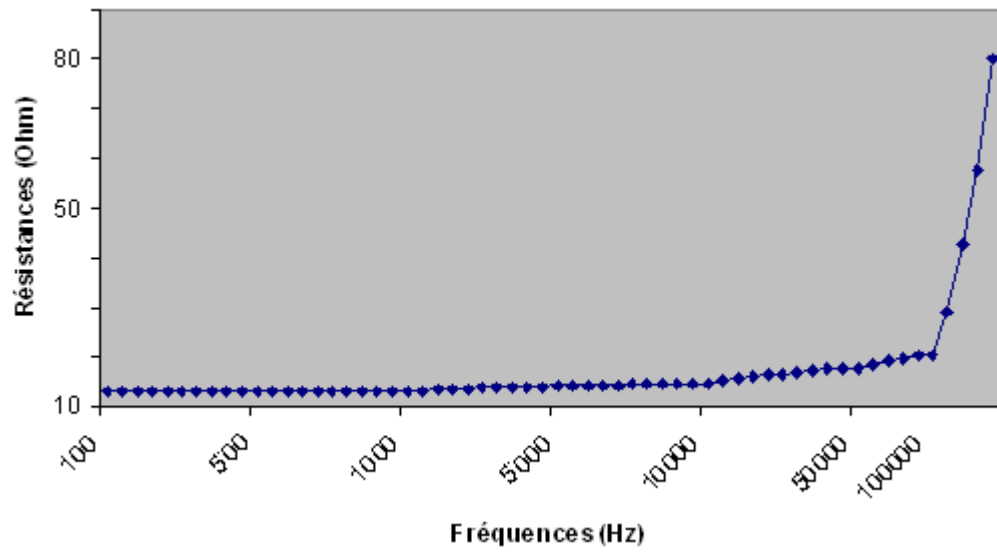


Figure 4.14 : évolution de la résistance

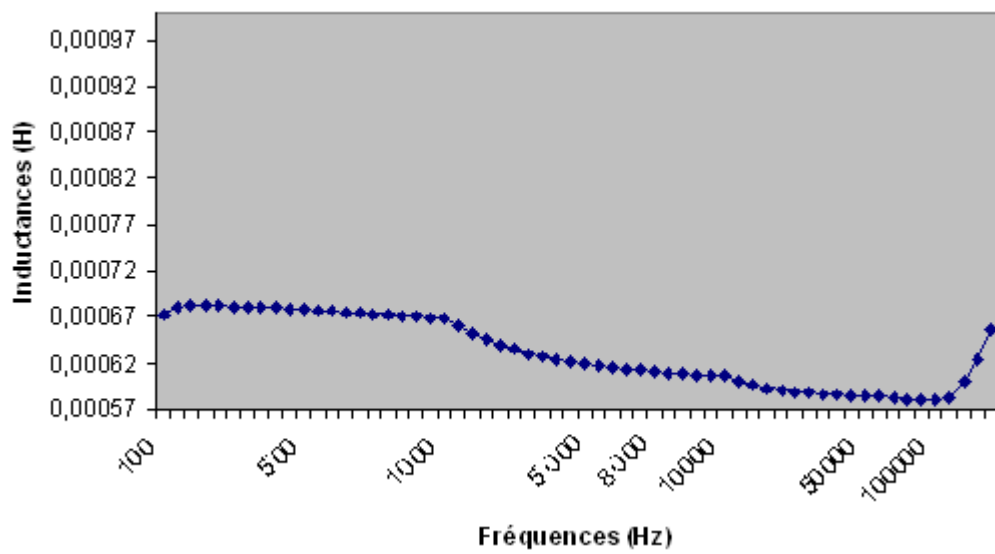


Figure 4.15 : évolution de l'inductance

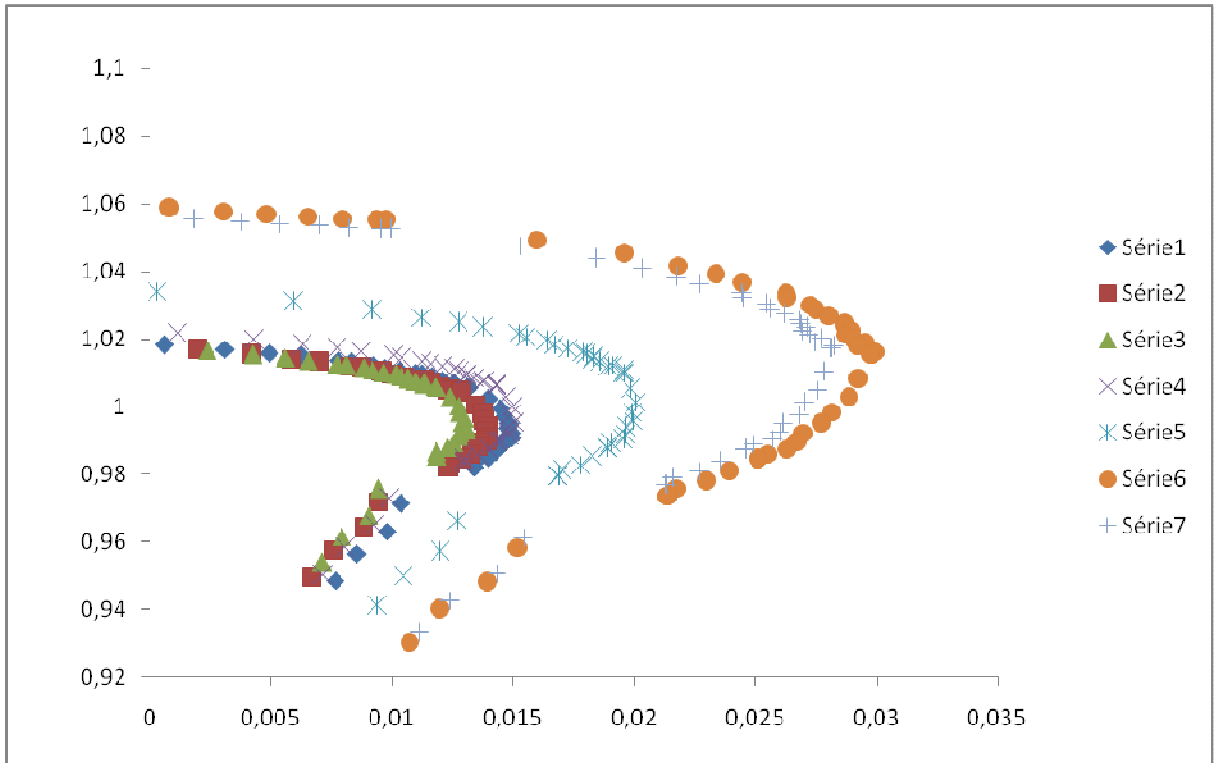


Figure 4.16 : diagramme d'impédance normalisé

La figure 4.19 met en évidence les tracés des diagrammes d'impédance normalisés de la sonde choisie sur tous les spécimens réalisés ; nous constatons que l'échange maximale d'énergie s'effectue au milieu de la courbe, là où le rapport des parties réactives tend vers l'unité, elle est équivalente à une fréquence de 1Khz, si on se fait à les formules théoriques développées au chapitre 2 (2.2) ainsi que celles donnant la fréquence de travail se basant sur la pratique, où nous considérons que la profondeur de pénétration est l'épaisseur de la pièce à inspecter sont identiques nous trouvons la fréquence qui oscille entre 750 et 1000hz

4.4.5 Représentation des résultats et discussions

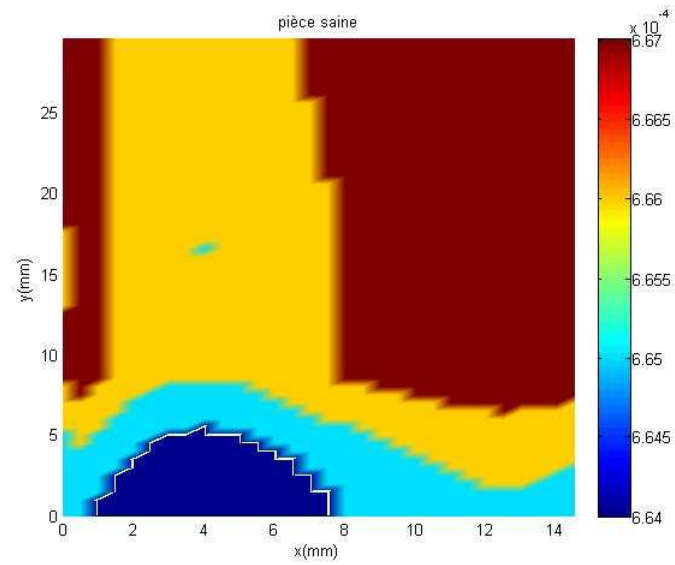


Figure 4.17 a- pièce saine

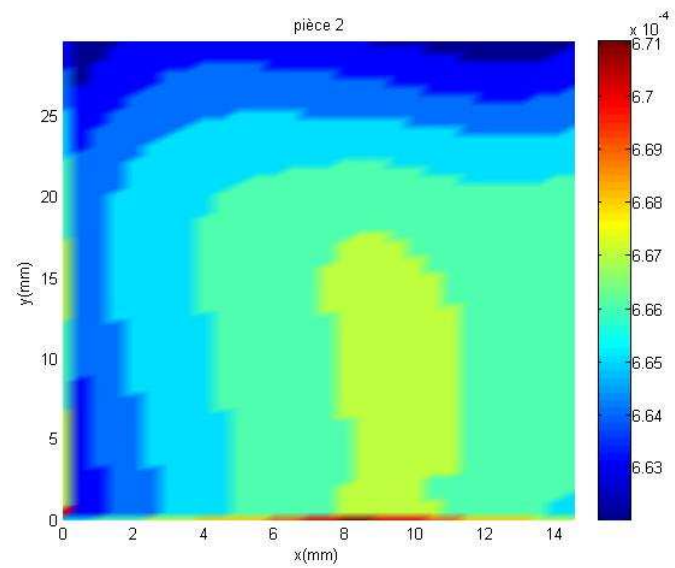


Figure 4.17 b-pièce avec inclusion de tungstène

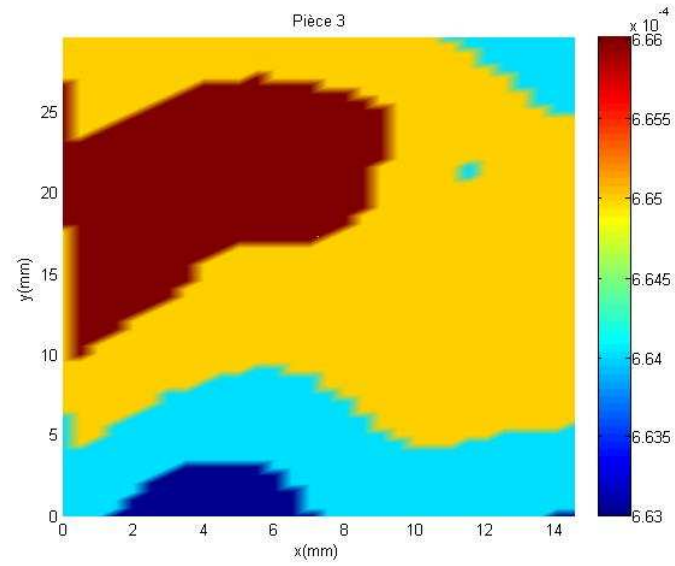


Figure 4.17 c-pièce avec soufflore vermiculaire

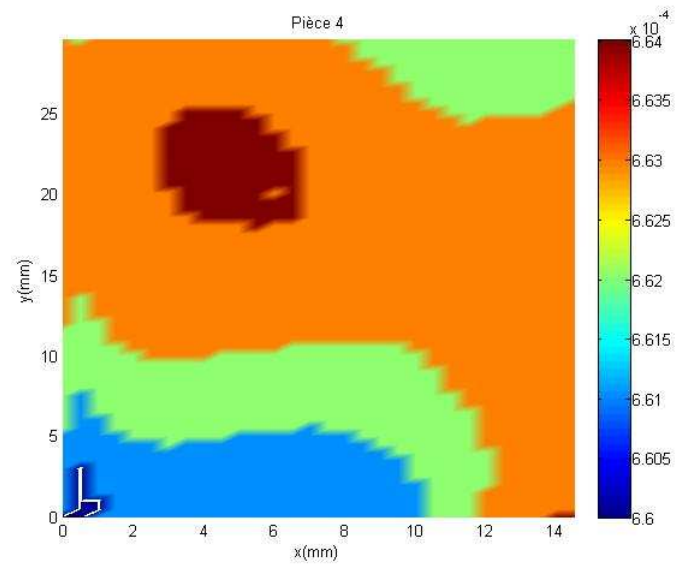


Figure 4.17 d-pièce avec inclusion de laitier

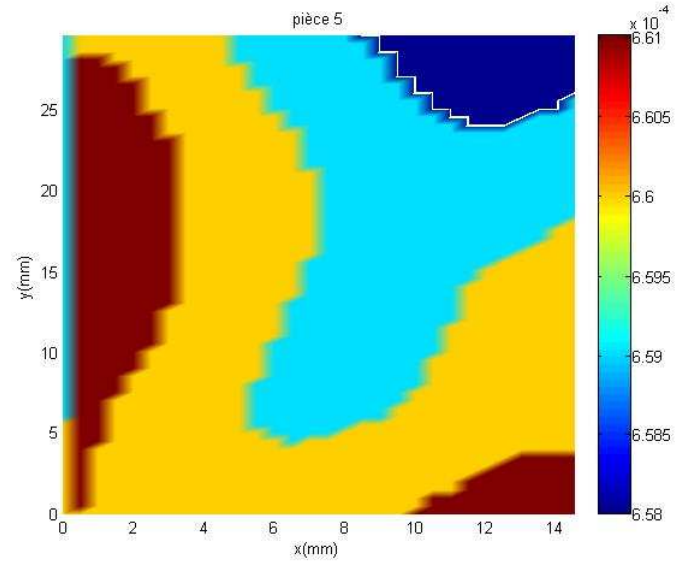


Figure 4.17 e-pièce avec soufflure allongée

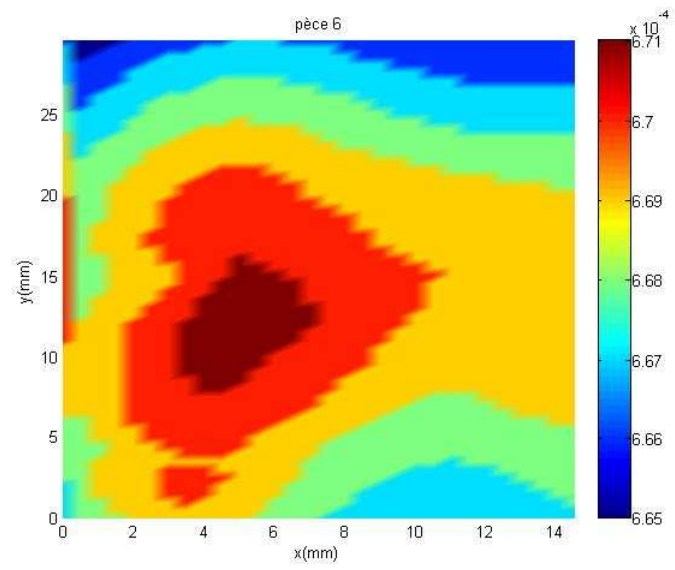


Figure 4.17 f- porosité

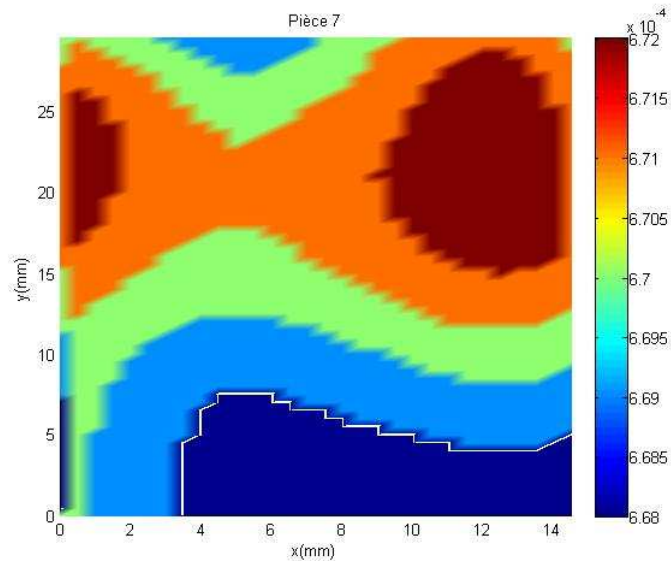


Figure 4.17 g- collage

4.4.6 Interprétations

La représentation en deux dimensions des résultats du contrôle par courants de Foucault s'est faite grâce à un programme écrit en MATLAB permettant de présenter les coordonnées x et y des pièces à contrôler en fonction des valeurs des parties résistives où inductives de l'impédance du capteur collectées lors de l'opération de l'inspection.

On constate que les défauts telles les porosités et les soufflures quelque soient leurs natures tendent vers la même couleur alors qu'une inclusion de tungstène qui est un métal ferromagnétique se détache de l'ensemble des autres échantillons.

4.5 Conclusion

Les différents dispositifs réalisés ont permis d'accéder de plus près aux ambiguïtés que présente la technique. L'approche et l'étude expérimentale concernant le contrôle non destructif par courants de Foucault ont contribué à la détermination de la fiabilité et la performance de cette méthode de contrôle. Il apparaît, après étude des différents types de sondes à géométrie différente nécessaires de souligner que le succès d'une recherche de faisabilité dépend en grande partie de la conception de la sonde, de telle sorte que celles ci soient le mieux adapté au problème considéré.

CONCLUSION GENERAL

Le contrôle et l'évaluation non destructifs par procédé magnétique des matériaux sont très sollicités dans l'industrie par le gain économique et temporel qu'elles apportent. En plus de l'augmentation de la durée de vie de l'installation et de la minimisation du risque d'accident. La recherche et l'investigation dans ce domaine étant très compétitives, les techniques magnétiques sont souvent sollicités pour résoudre des problèmes complexes.

Les contrôles par bruit de barkhausen et le tracé du cycle d'hystérésis présentent de grandes potentialités dans le développement des applications de contrôle non destructif des matériaux. Actuellement, ses applications ne sont qu'au stade du laboratoire. Le travail que nous avons présenté à pour objectif d'évaluer et d'optimiser les paramètres et déterminer la capacité de ces techniques.

L'étude théorique exposée a permis la compréhension des phénomènes électromagnétiques, d'où la génération du bruit de barkhausen et l'évolution de la magnétisation des matériaux jusqu'à saturation d'où la compréhension de l'évolution du cycle d'hystérésis.

L'approche et l'étude expérimentale concernant le contrôle non destructif par courants de Foucault ont contribué à la détermination de la fiabilité et la performance de cette méthode de contrôle.

Le succès de la faisabilité d'une recherche de faisabilité dans le domaine du contrôle par méthode magnétique dépend en grande partie de la conception de la sonde, de telle sorte que celles ci soient le mieux adapté au problème considéré.

Les différents dispositifs réalisés au sein du laboratoire du département des procédés électrique et magnétique ont permis d'accéder de plus près aux ambiguïtés que présente les techniques magnétiques.

La sensibilité aux défauts et autres paramètres du contrôle peut être modifiée par la conception de la sonde. Il suffit d'établir la direction de circulation des courants de Foucault, de régler l'intensité du champ magnétique et de choisir la bobine de taille appropriée à la géométrie de la pièce à contrôler. La caractérisation des sondes améliore les performances du système.

Les résultats obtenus expliquent le comportement des courants de Foucault et l'influence des différents paramètres sur le contrôle.

Contrairement au courants de Foucault où la pénétration ne dépasse pas les millimètres, les deux autres techniques ; à savoir le bruit de barkhausen et le tracé du cycle d'hystérésis atteignent la globalité des épaisseurs choisie dans notre étude.

La réalisation de sondes de contrôle par courants de Foucault a été satisfaisante au vue des résultats de contrôle des échantillons. Les paramètres fondamentaux à retenir pour la construction d'une sonde sont surtout de réduire la réluctance du circuit de mesure et de permettre un échange d'énergie optimale entre la sonde et le matériau à tester. Un palpeur magnétique doit être réalisé avec un matériau de forte perméabilité magnétique et de faible conductivité électrique.

Un logiciel a été développé pour assurer la communication entre les différents équipements d'acquisition du signal, de déplacement micrométrique de la sonde, du traitement du signal et de visualisation des signaux et la représentation des défauts en images Scan. Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans la pratique du contrôle industriel.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES

B	: Induction magnétique en Weber
BN	: Bruits de Barkhausen
C	: Constante de curie
CF	: Courants de Foucault.
CND	: Contrôle Non Destructif
D	: Induction électrique en Coulomb par mètres carrés
E	: Champ électrique en Newtons par mètre
F	: Force en Newtons
H	: Champ magnétique en Tesla
J0	: Amplitude des courants à la surface.
J	: Amplitude des courants à une profondeur x.
K	: Constante sans unité 0.02
L	: Inductance en Henry
P _h	: Perte par hystérésis en watt
R	: Résistance en Ohm
T	: Température en °C
V	: Volume en m ³
Z	: Impédance en ohms
e	: Force électromotrice en volt
f	: Fréquence en hertz
g	: Facteur de landé
j	: Densité de courant en A/m ²
q	: Charge électrique en Coulomb
r	: Rayon de l'orbite
s	: Section en Mètres carrés
w	: Pulsation en Radian par seconde
σ	: Conductivité (siemens/mètre s/m)
δ	: Profondeur de pénétration standard (mètre m)
ε _r	: Permittivité relative
ε ₀	: Permittivité du vide, elle vaut 8,854187×10 ⁻¹² F/m
φ	: Flux magnétique en weber
ρ	: Densité de charge en C/m ³
μ ₀	: Perméabilité du vide, elle vaut 4 π 10 ⁻⁷ H/m
μ _L	: Moment magnétique orbital en A.m ²
μ _r	: Perméabilité relative
μ _s	: Moment de spin en A.m ²
χ _m	: Susceptibilité magnétique

APPENDICE B

PROGRAMMES

1- Tracée des signaux de BN, FFT et Cycles d'hystérésis

```
load H1.DAT;    nb1=H1;
load B1.DAT;    nb2=B1;
load Bn1.DAT;   nb3=Bn1;
x=nb1;
y=nb2;
b=nb3;
T=0.0002
tt=0:length(b)-1;
t=tt*T;
figure(1)
plot(x,y,'. k')
Xlabel('H (Henry)')
Ylabel('B (Tesla)')
figure(2)
plot(t,b,'. k')
Xlabel('t (S)')
Ylabel('Bn (mV)')
```

2- Tracée de la cartographie 2D obtenue par Cf

```
load saine.dat
nb=saine;
lg=length(nb);
l=nb(1:lg,3);
r=nb(1:lg,4);
x=60;
nx= x;
y=30;
ny=y
c=1;
o=1;
for i=1:x
    for j=1:y
        L(i,j)=l(c);
        R(i,j)=r(c);
        c=c+1
    end
end
figure
surface(L)
shading interp
colormap(hsv);
figure
surface(R)
shading interp
```

REFERENCES

1. Klyvev, V., Wusman, G.V., " Non destructive testing and diagnostic", 2004.
2. Robert, C., "Non destructive testing Handbook ", Edition ASNT, 1986.
3. Castle, "Contrôle non destructif: Magnétoscopie, Ressuage, Courants de Foucault", 1983.
4. P.Giron, P.Pichard, SGC, "Qualitest ultrason", centre de formation 1987.
5. Edward, M. and all, "Electricité et magnétisme", Collection Berkeley, volume 2, 1973 .
6. Javaan Boweler "Electromagnetic fields". MCGraw-Hill, 1964.
7. Haasen, P., "physical metallurgy" 2004.
8. Pavlov. P, Khokhlov. B, "Physique du solide", édition MIR, Moscou, 1989.
9. Elie Boridy "Electromagnétique, théorie et applications" 2008.
10. J. S. Miller and M. Drillon "Magnetism: Molecules to Materials III Models and Experiments", ISBN 3-527-29772-3. p. 453 Wiley-VCH, 2001.
11. D Fiorani, "Surface Effects in Magnetic Nanoparticles", SBN 978-0-387-23279-9, p300 springer 2005.
12. P.Brissonneau, " magnétisme et matériaux magnétique pour électrotechnique", ISBN 2-86601-579-7, hernes, 1997.
13. Paul McIntire, "Non destructive testing handbook", ASNT, Second edition, Volume 4, electromagnetic Testing, editor 1986.
14. Paul. L, Dale. C, François. L, "Les phénomènes électromagnétiques", Collection: Sciences Sup, Dunod EAN13, 2002.
15. J. S. Miller and M. Drillon, "Magnetism: Molecules to Materials III Nanosized Magnetic Materials", ISBN: 9783527303021, Wiley-VCH, 2002.
16. Chester C.H.LO "A review of the Barkhausen effect and applications to non-destructive testing "materials evaluation July 2004.
17. H.L. Libby, Introduction to electromagnetic non-destructive methods, ISBN 0882759647, p365, Wiley-Interscience, 1979.
18. Paul McIntire, "Non destructive testing handbook", ASNT, Second edition, Volume 4, electromagnetic Testing, editor 1986
19. CHEMIN, GUILLAUD, "Contrôle non destructif" N-II et N-III, C.A.S.T ;1991.

20. G. WACHE, J. JARDIN, R. LINK. "Caractérisation des capteurs utilisés en contrôle non destructif par courants de Foucault". 6^{ème} Conférence Européenne sur les Contrôles Non Destructifs ;2002.
21. B.P.C. RAO, "Simulation of eddy current signals from multiple defects". NDT & E International, Vol. 29, 1996.
22. Hugol,L., "Introduction to electromagnetic non destructive test methods",1971.
23. H.Nagaoka, "the inductance coefficients of solenoids", journal of the college of science, imperial university Tokyo, Japan Vol. XXVII, Article 6 1909.
24. A. Hammouda ,” Detection of Defect Applying conductivity measured by Eddy Current” ,11th International Symposium on Non destructive Characterization of Materials, Springer 2002/
25. R.Grimberg,“D Eddy current sensor array”, NDT & E International, V 39, Issue 4, 2006.
26. P.Mix, ”introduction to NDT” second edition wiley interscience 2005.
27. T.Uchimoto, ”Eddy current evaluation of cast irons for material characterization”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2003.
28. T. Ding, X. Chen et Y. Huang : “Ultra-thin flexible eddy current sensor array for gap measurements”. Tsinghu a Science and Technology, 2004.
29. M. Zergoug, ”Optimisation a digital methods processing of eddy current”, 11th International Symposium on Non destructive Characterization of Materials, Springer 2002.
30. M. Zergoug, ”Conductivity simulation for material characterisation by eddy current”. 3rd International conference on NDE to structural integrity for nuclear and pressurised components , sevile –Espagne. 2001.
31. Hiroshi Hoshikawa, ” A novel surface eddy current probe with phase information on surface flaw depth”, 15^{ème} Conférence internationale sur le CND, Rome2000.
32. Lakhtine. I » Métallographie et traitements thermiques des métaux”, MIR, 1989.
33. Gibert, D., "Elements de traitement du signal",1994.
34. Paccini, A., "Developpement d'un modele elements finis 3D", 2005/
35. Joly, P., "Mise en œuvre de la méthode des éléments finis",1990/
36. Boudu, D., Molimet, F., " Méthodes asymptotiques en électromagnétisme evaluation",1994.
37. Maldagne,X.P.V., "Advances in signal processing for non destructive “;1999.