

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahleb Blida

Faculté des sciences

Département d'aéronautique

*Pour l'Obtention du Diplôme des Etudes Universitaires Appliquées (DEUA)
en Aéronautique*

Option : Structure

THEME

**L'utilisation de contrôle
par courants de Foucault pour la détection et
L'identification des défauts**

Présenté par:

M^{ELLE} : HAYET ZARIF

Promoteur:

Mr: M.ZERGOUG

Co-promoteur:

Mr: S.MEBREK

Promotion 2005





Remerciements

Je remercie dieu le tous puissant de m'avoir donner le courage et la patience de finir cet étude.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur M^r Mourad Zergoug ainsi que mon co-promoteur M^r mebrek smain pour leur encadrement, leurs conseils, leurs encouragements qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

J'adresse également mes remerciements à: M^r ammirouche hammouda, M^r boucherou Nacer et M^e kamel ghania, pour leurs aides pratiques et théoriques.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin afin que ce travail soit un travail de qualité.

Au membre de jury d'avoir accepté d'honorer par leurs présences et de juger ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère .

A mon cher père.

A rafik et sa famille.

A ma sœur et mon frère.

A ma grand-mère et mon grand père.

A mes cousines et cousins.

A toute ma famille et a tous mes proches.

Sans oublier tous mes amis.

الملخص:

إن مختلف طرق المراقبة غير المتلفة أصبحت الحل المناسب و الاقتصادي. و من بينها نجد المراقبة بتيارات فوكولت. في هذا العمل استطعنا أن نحدد و نكشف العيوب القريبة من السطح للمعادن الناقله للكهرباء و التي تستعمل في مجال الطيران.

Résumé

Les différentes techniques des contrôles non destructifs deviennent de plus en plus la solution adéquate et économique dans l'industrie, on rencontre parmi elle la méthode du contrôle par courants de Foucault.

Dans ce travail nous avons pu détecter et dimensionner des défauts dans des matériaux conducteurs répondus dans l'industrie aéronautique.

Abstract :

Different the techniques from the non destructive testing become more and more the solution adequate and economic in industry, one meets among it the method of control by eddy currents.

In this work we could detect and dimension defects in conducting materials answered in the aircraft industry.



LISTES DES SYMBOLES

E	: Champ électrique
D	: Induction électrique
H	: Champ magnétique
B	: Induction magnétique
ϕ	: Flux magnétique
σ	: Conductivité électrique d'un matériau
μ	: Perméabilité magnétique
μ_r	: Perméabilité magnétique relatif
μ_0	: Perméabilité magnétique de l'air
ϵ_0	: Permittivité électrique
η	: Coefficient de remplissage
J	: Densité de Courant
V	: Tension électrique
I	: Courant électrique
t	: Temps
f	: Fréquence
ω	: Pulsation angulaire
Z	: Impédance
R	: Résistance
L	: Inductance
C	: Capacité
ϕ	: Phase
l	: Longueur de la bobine
δ	: Profondeur de pénétration standard des CF
CF	: Courants de Foucault
CND	: Contrôle non destructif
ρ	: Résistivité électrique.
S	: section de solénoïde.

List des figures, tableaux et organigrammes.

Chapitre I :

Figure 1.1 : Principe des courants de Foucault.....	1
Figure 1.2 : Répartition des courants de Foucault.....	2
Figure 1.3 le comportement des courants de Foucault.....	3
Figure 1.4: Diagramme d'impédance.....	5
Figure 1.5 diagramme d'impédance normalisé.....	6
Figure 1.6 : Diagramme d'impédance normalisée pour différente perméabilité	8
Figure 1.7 l'influence de coefficient de remplissage.....	9
Figure 1.8 : Diagramme d'impédance normalisée pour différents valeur de η	10
Figure 1.9 différents types de bobines	12
Figure 1.10 différents types de sondes	13
Figure 1.11 différents palpeurs de surfaces	13
Figure 1.12: Bobinage simple.....	14
Figure 1.13: Capteur à fonction séparée.....	14
Figure 1.14 : position de la sonde par rapport à l'échantillon.....	16
Figure 1.15 : Schématisation de la répartition des courants de Foucault dans un tube présentant un petit défaut	18

Chapitre II :

Figure II-1 sonde de forme conique.....	20
Figure II.2 variation de l'induction en fonction de la fréquence.....	25
Figure II-3 variation de la résistance en fonction de la fréquence.....	25
Figure II-4 diagramme d'impédance normalisé.....	26
Figure II-5 variation de la l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.....	27
Figure II-6 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.....	27

Figure II.7 diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium de la 3 ^{ème} sonde.....	28
Figure II-8 diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium du 1 ^{er} sonde.....	29
Figure II-9 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	29
Figure II-10 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	30
Figure II-11 diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium du 2 ^{ème} sonde.....	30
Figure II-12 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	31
Figure II-13 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	31
Figure II-14 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	32
Figure II-15 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.....	32
Figure II-16 diagramme d'impédance normalisé pour l'aluminium.....	33
Figure II-17 diagramme d'impédance normalisé pour le bronze	33
Tableau (II-1) : les différentes sondes réalisées.....	24

Chapitre III :

Figure III.1 le système de déplacement.....	35
Figure III.2 la chaîne d'acquisition et de contrôle.....	36.
Figure III.4 : Synoptique de la chaîne d'acquisition et de contrôle par courants de Foucault.....	37
Tableau (3-1) : les différents échantillons.....	34

Chapitre IV :

Figure IV-1 Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 29A029.....	41
Figure IV-2 Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 29A029.....	42
Figure IV-3 Image 3D de la pièce en aluminium 29A029.....	42
Figure IV-5 Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 7075.....	44
Figure IV-6 Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 7075.....	44
Figure IV-7 Image 3D de la pièce en aluminium 7075.....	45
Figure IV-8 Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 29A047.....	46
Figure VI-9 Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 29A047.....	46
Figure IV-10 Image 3D de la pièce en aluminium 29A047.....	47
Figure IV-11 Image 2D couleur de la pièce en bronze.....	48
Figure IV-12 Image 2D en niveau de gris de la pièce en bronze.....	48
Figure IV-13 Image 3D de la pièce en bronze.....	49
Figure IV-14 Image 2D couleur de la pièce en acier 31A008.....	50
Figure IV-15 Image 2D en niveau de gris de la pièce en acier 31A008.....	50
Figure IV-16 Image 3D de la pièce en acier 31A008.....	51
Figure IV-17 Image 2D couleur de la pièce en acier.....	51
Figure IV-17 Image 2D en niveau de gris de la pièce en acier 29A028.....	52
Figure IV-18 Image 3D de la pièce en acier 29A028.....	52

Annexes :

Figure A-1 : courbe de la première aimantation

Figure A-2 : courbe de première aimantation.

Organigramme A-1 : système de mesureur d'impédance de la sonde.

OrganigrammeA-2 : système de déplacement

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I : Généralité sur le contrôle par courants de Foucault.

Introduction :

I - Le contrôle par les courants de Foucault :	1
I-1- Définition	1
I-2-principe de contrôle par courants de Foucault	1
I-3- La répartition des courants de Foucault	2
I- 4- la profondeur de pénétration standard	4
I-5- le diagramme d'impédance normaliser	5
I-5-1- les paramètres influençant le diagramme d'impédance	7
• L'influence de la conductivité électrique	7
• L'influence de la perméabilité	8
• l'influence de coefficient de remplissage ou le lift-off	9
• L'influence de la fréquence	11
I-5-2 – le choix de la fréquence de contrôle	11
II- Etude des sondes :	12
II-1 – Différents types de sondes	12
II- 2 Les fonctions du capteurs	14
II -2-1 capteurs a double fonction	14
II-2-2-capteur à fonction séparée (émission-réception)	14
II-3- les modes de mesure	15
II-3-1- mode absolu	15
II-3-2 : mode différentiel	15

III- détection des défauts :	15
III-1-Position de la sonde par rapport à l'échantillon	16
III-2- Influence du dimensionnement de la pièce sur les courants de Foucault	17
III-2-2-L'effet du bord	17
IV- Exemple d'application des courants de Foucault :	17
IV-1-mesure de conductivité électrique	17
IV-1-1-Analogie entre un petit défaut et une faible variation de la conductivité électrique	17

Chapitre II : Réalisation des sondes.

Introduction	19
I- Réalisation des sondes	19
I-1- support de sondes	20
I-2- Procède de réalisation des sondes	21
I-3- caractérisation des sondes	22
I-4- mesure de l'impédance de la sonde	22
II- Présentation des résultats.	23

Chapitre III : Procédures expérimentales

Introduction	34
I- Présentation des pièces étalon	34
II- Description du système de déplacement	35
III- la chaîne d'acquisition et de contrôle	36
Introduction	
I -Organigramme du mesureur d'impédance	38
II- Organigramme du système de déplacement	38
III- Reconstitution des données en images	39

Chapitre IV : Résultats et interprétations.

I- Introduction	40
II- Résultats et interprétation	41
II- 1- pièces en aluminium	41
• Aluminium 29A029	41
• Aluminium 7075	44
• Aluminium 29A047	46
II- 3 –pièce en bronze	48
II- 2 –pièces en acier	50
• Acier 31A008	50
• Acier 29028	51
III- Conclusion.	53

Conclusion Générale

Annexes

Bibliographie

Introduction.

Introduction :

Le contrôle non destructif est une science qui fait appel à des techniques de contrôle et d'inspections des matériaux, elle est utilisée dans divers domaines de l'industrie, où elle est sollicitée pour résoudre des problèmes très complexes dans l'aéronautique, la construction navale et le nucléaire.

Dans le contrôle non destructif, on trouve une multitude de technique d'inspections non destructives, telles que : le contrôle visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons et les courants de Foucault.

Le but du contrôle non destructif est l'inspection de l'état de la pièce, la recherche et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement des pièces sans les détruire.

Dans ce mémoire, on vas développer l'une de ces techniques, qui est le contrôle par courants de Foucault.

De même que les autres techniques non destructives, le contrôle par courants de Foucault permet la mesure des propriétés de matériaux, de détecter et d dimensionner les anomalies.

Dans l'aéronautique, le contrôle par courants de Foucault est surtout requis pour régler les problèmes de détection de la corrosion et des défauts de fatigue dans la structure d'avion.

L'objectif de ce travail consiste à caractériser des défauts dans des pièces ferromagnétiques et des pièces non ferromagnétiques

Notre travail, effectué au niveau du laboratoire des procédés électriques et magnétiques du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle (CSC de Cheraga), est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre, présente des généralités sur la technique de contrôle par courants de Foucault où nous avons définis ces courants et leur comportement, le principe de ce contrôle, les conditions importantes exigées pour ce contrôle ainsi que les différents paramètres influençant le bon déroulement de ce type de contrôle.

Le deuxième chapitre décrit la réalisation et la caractérisation des sondes à courant de Foucault.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit les différents échantillons étalons utilisées, ainsi qu'une description du système de déplacement et les logiciels qui vont être utilisés.

Et nous terminons par le chapitre quatre qui donne l'interprétation des résultats.

Chapitre I :

Le contrôle par courants de Foucault.

I - Le contrôle par les courants de Foucault :

I-1- Définition :

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode de contrôle non destructif qui connaît un développement de plus en plus important, et qui ne nécessite pas un contact entre le matériau et la tête de mesure.

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 (dimension, conductivité électrique, perméabilité magnétique.). De ce fait, ils sont très utilisés en technique de contrôle non destructif, qui permet la recherche, la mesure de certaines propriétés de matériaux, de dimensions et localisation des défauts [1] [2] [3] [12].

I-2-principe de contrôle par courants de Foucault :

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur la création des courants électriques dans le matériau à contrôler et sur l'observation de leur comportement (figure 1-1).

Par l'application d'un champ magnétique variable situé près d'un matériau conducteur, les courants de Foucault sont créés. Ils forment des boucles fermées de courants induits circulant dans des plans perpendiculaires au flux magnétique, et parallèlement aux spires de la bobine et au plan de la surface.

Les courants de Foucault créent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose au champ d'excitation, ce qui modifie l'impédance de la bobine d'excitation.

Cette variation d'impédance est à la base du contrôle par courants de Foucault

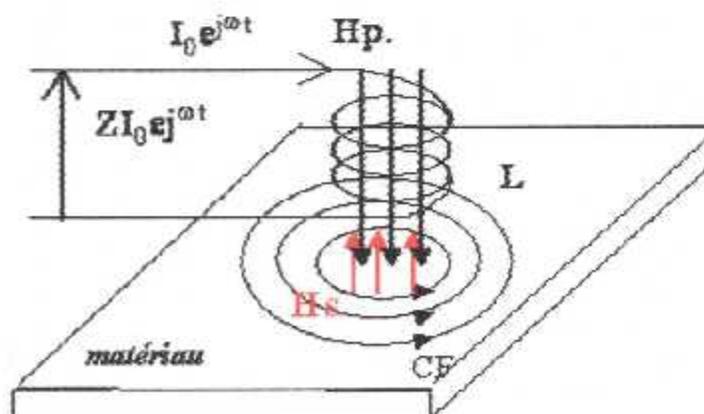


Figure 1.1 : Principe des courants de Foucault

I-3- La répartition des courants de Foucault :

Les lois mathématiques régissant les courants de Foucault sont celles de l'électromagnétisme vérifiées par les équations de J. C. MAXWELL [8]. (voir annexe 1).

La répartition des courants de Foucault est très importante pour la définition des caractéristiques du matériau, en effet elle dépend de sa structure (conductivité, perméabilité, géométrie de la pièce...). Dès lors, toute anomalie dans le matériau (changements dimensionnels, présence de défauts tels que fissures,...etc.) entraîne la modification du parcours et de l'intensité des courants de Foucault [2] [3] [10].

Après l'application d'un champ magnétique variable sur une surface d'un matériau conducteur, les courants de Foucault suivent des trajectoires fermées perpendiculaires au flux magnétique induit, et parallèle aux spires du bobinage.

La figure 1.2, montre le rapport existant entre les densités de courant à la surface et en un point x à l'intérieur du matériau. Elle est donnée par l'équation suivante [1] [12]:

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta) \dots\dots\dots (1.1)$$

Où $\frac{J_x}{J_0}$ est le quotient de la densité des courants de Foucault J_x à la profondeur x par la densité des courants à la surface J_0 , e avec $e = 2.718$.

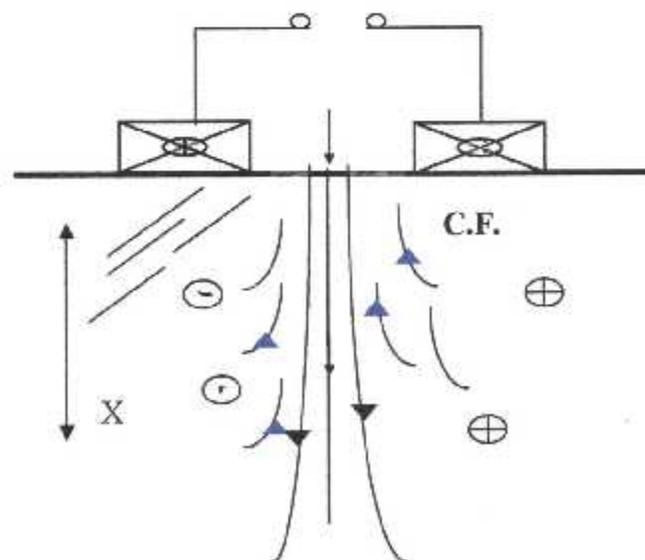


Figure 1.2 : Répartition des courants de Foucault

Dans n'importe quelle position interne de la surface, loin du bord et des discontinuités, la distribution des courants de Foucault est uniforme. Par contre autour du bord ou d'une discontinuité, leur distribution est perturbée (**figure 1.3**).

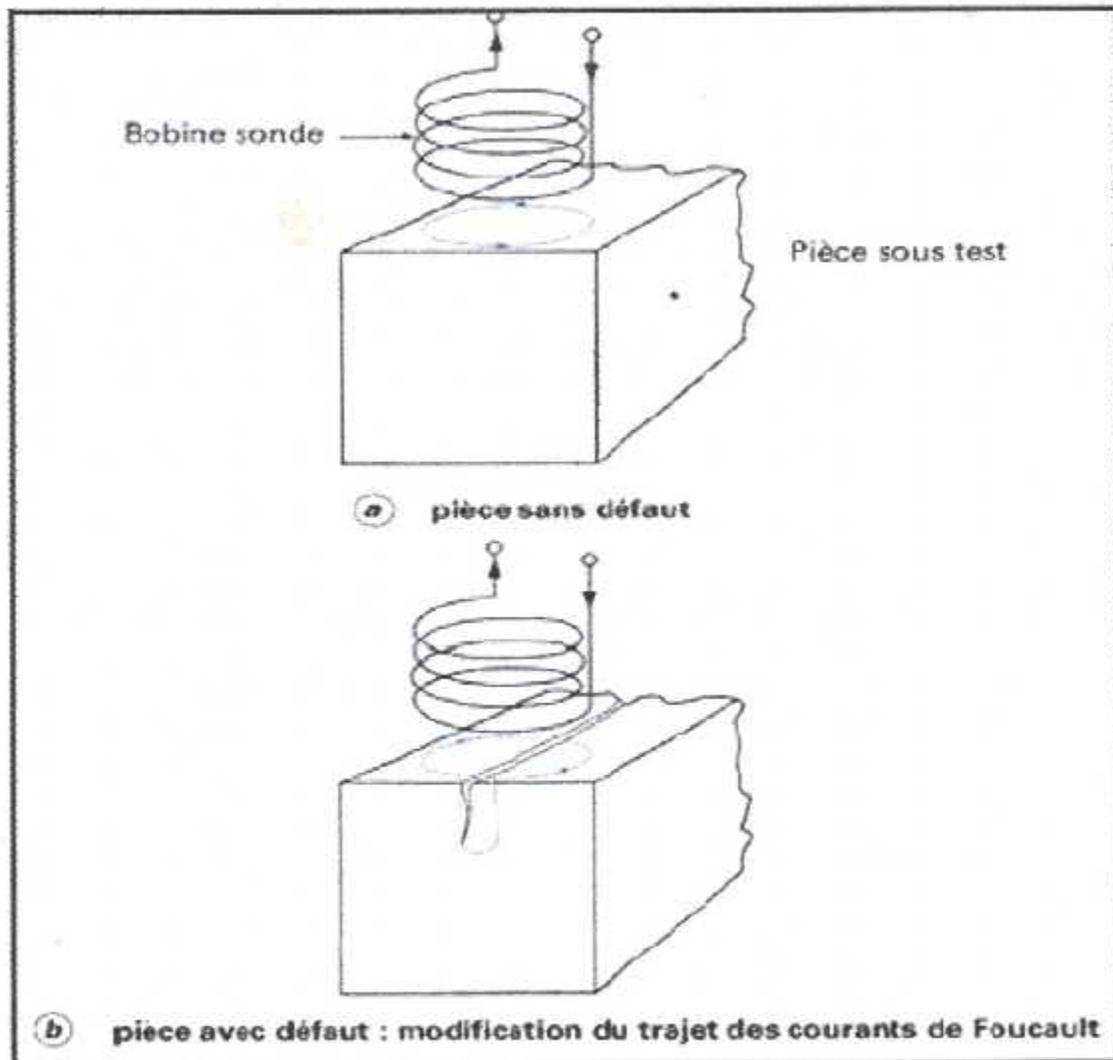


Figure 1.3 le comportement des courants de Foucault

I- 4- la 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 densité à la surface, elle dépend de la résistivité du matériau, de sa perméabilité, et de la fréquence [1] [9].

$$\text{Où } \delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_r f}} \dots \dots \dots (1.2)$$

f : est la fréquence en hertz,

μ_r : est la perméabilité magnétique relative (sans unités), avec : $\mu = \mu_r \times \mu_0$

$$\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$$

σ : la conductivité en $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

δ étant exprimé en m,

La pénétration des courants de Foucault diminue lorsque la conductivité, la perméabilité magnétique ou la fréquence augmente [1] [13], les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface « phénomène de peau ».

La densité de courant s'atténue exponentiellement avec la profondeur. A une profondeur δ la densité de courant atteint 37 % de la densité de surface, La sensibilité de mesure ou de la détection dépend de ce paramètre. A deux fois la constante de pénétration standard (2δ), la densité de courant de Foucault atteint 13.5% de celle de la surface et à (3δ) la valeur de densité est inférieure à 5% [13].

Le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur à contrôler. En général, afin de négliger l'influence de l'épaisseur du matériau sur les mesures, le choix de la fréquence de contrôle est déterminé pour des épaisseurs supérieures à (3δ) [9] [10].

I-5- le diagramme d'impédance normaliser :

Les résultats du contrôle par courants de Foucault sont obtenus indirectement, en connaissant la valeur de l'impédance du capteur à tout moment du contrôle. 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 successivement R_0 et L_0 . La présence de l'échantillon modifie la valeur de l'impédance du capteur Z_1 , dont la partie résistive est R_1 et la partie inductive est L_1 [10] [1].

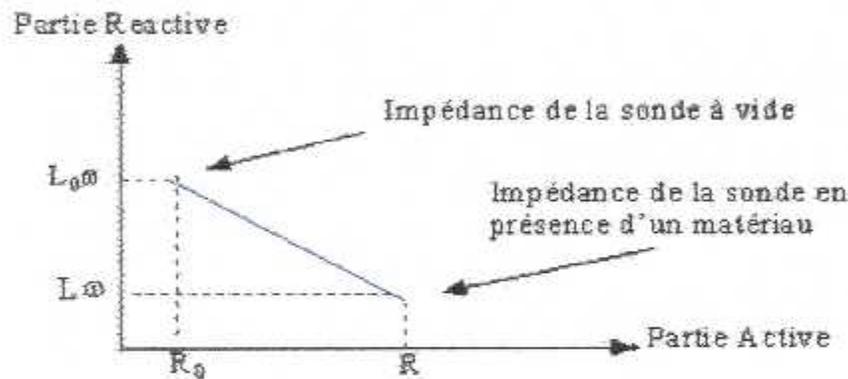


Figure 1.4: Diagramme d'impédance

$$Z_0 = R_0 + jL_0\omega \longrightarrow \text{Bobine à vide}$$

$$Z = R + jL\omega \longrightarrow \text{En présence du matériau conducteur}$$

$$Z' = R' + jL'\omega \longrightarrow \text{En présence d'un défaut}$$

Le tracé de la partie inductive en fonction de la partie résistive donne le diagramme d'impédance, c'est l'outil indispensable pour l'interprétation des résultats pour le contrôle non destructif par courant de Foucault. L'évolution de ce diagramme est :

- 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 le point (0,1).
- 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 le point (0,0).

Différentes grandeurs sont dépendante linéairement de la fréquence. Pour éliminer cet effet « d'amplification » on divise les impédances par la pulsation ω , Cela permet d'éliminer toute dépendance du nombre de spires.

Le tracé de la courbe donnant L/L_0 en fonction de $R/L_0\omega$ donne le diagramme d'impédance normalisé [9].

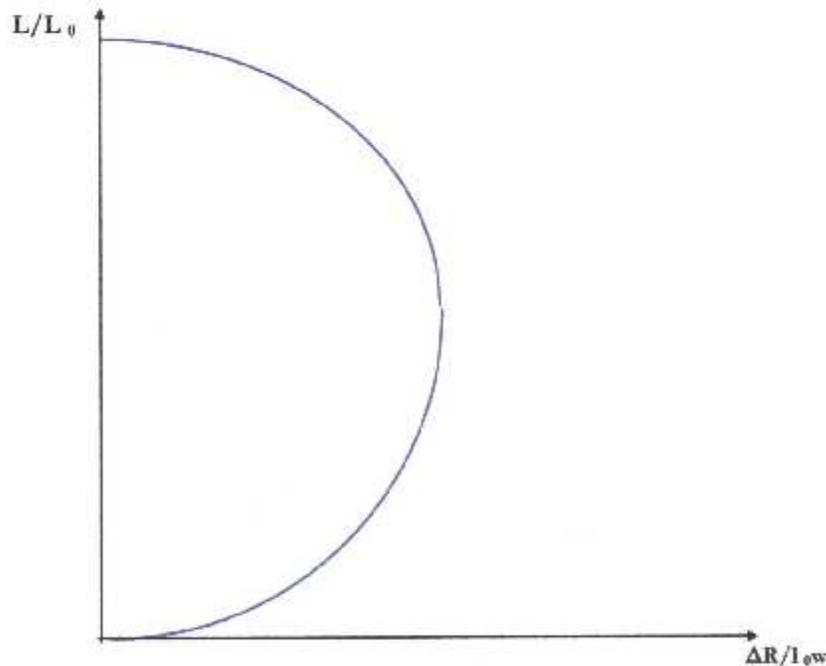


Figure 1.5 diagramme d'impédance normalisé.

Le point (0.0) correspond à:

1. Est un matériau supraconducteur (conductivité très importante).
2. La bobine est excitée par une fréquence élevée, les courants de Foucault circulent en surface (effet de peau).

Le point (0.1) correspond à:

1. La bobine ne contient aucun matériau.
2. La bobine contient un matériau isolant.
3. La bobine est excitée par un courant continu.

I-5-1- les paramètres influençant le diagramme d'impédance :

Les différents paramètres influençant l'impédance de la bobine sont: la conductivité électrique, la fréquence, la perméabilité, l'épaisseur et la présence d'un défaut. Tous ces paramètres permettent une représentation semi-circulaire à mesure qu'ils augmentent ou qu'ils diminuent :

- **L'influence de la conductivité électrique :**

La conductivité électrique est une grandeur physique σ , caractérisant la capacité de conduction de courant électrique appliqué E ($j = \sigma E$). L'unité SI de conductivité électrique est $(\text{ohm mètre})^{-1}$ $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ou siemens par mètre $(\text{S} \cdot \text{m})$ [9].

Une conductivité nulle représentant un isolant correspond au point géométrique haut de la courbe (0.1). l'impédance de la sonde est due seulement à sa propre inductance, Par contre une conductivité infinie représenterait les supraconducteurs, le point géométrique est présenté au bas de la courbe (0.0).

Une augmentation de la conductivité électrique correspond à un déplacement le long de la courbe d'impédance.

- **L'influence de la perméabilité :**

La perméabilité magnétique est une grandeur physique μ qui caractérise la capacité d'une substance à acquérir une aimantation, son produit par le champ magnétique H est égale à l'induction magnétique B ($\mu=B/H$) [9].

L'influence de la perméabilité se manifeste par un déplacement de la courbe d'impédance. Si la perméabilité relative est supérieure à l'unité, la composante réactive du capteur ce trouve amplifier.

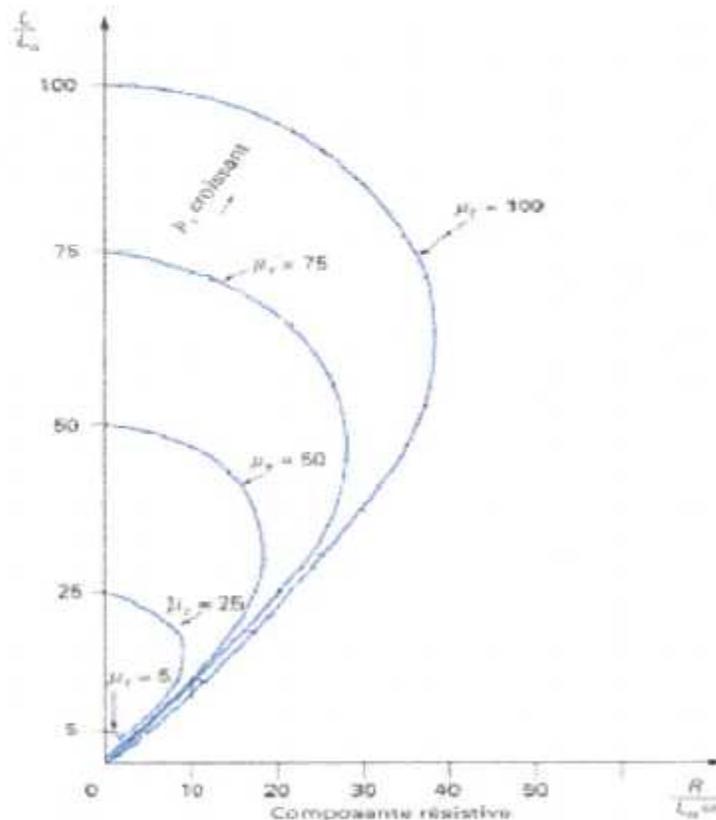


Figure 1.6 : Diagramme d'impédance normalisée pour différente perméabilité.

- l'influence de coefficient de remplissage ou le lift-off:

Qui gouvernent le couplage entre le capteur et le matériau : il s'agit soit du coefficient de remplissage (η) pour les bobines encerclant, rapport entre la section de la barre et celle de la bobine [1]; soit du lift-off, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce au-dessus.

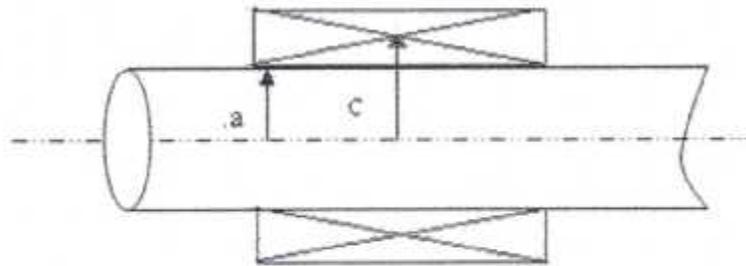


Figure 1.7 l'influence de coefficient de remplissage

$$\eta = \left(\frac{a}{c}\right)^2 \text{ Ou } 0 < \eta < 1 \quad \dots (1.3)$$

avec **a** : rayon externe

c : rayon moyen du bobinage

De même pour la perméabilité, le coefficient de remplissage crée un déplacement de la courbe d'impédance. La variation d'impédance dans ce cas nous permet de mesurer l'épaisseur du revêtement ou de l'épaisseur d'une couche d'isolant sur un matériau.

Pour des résultats plus précis, il est impératif de travailler avec un coefficient de remplissage proche de l'unité.

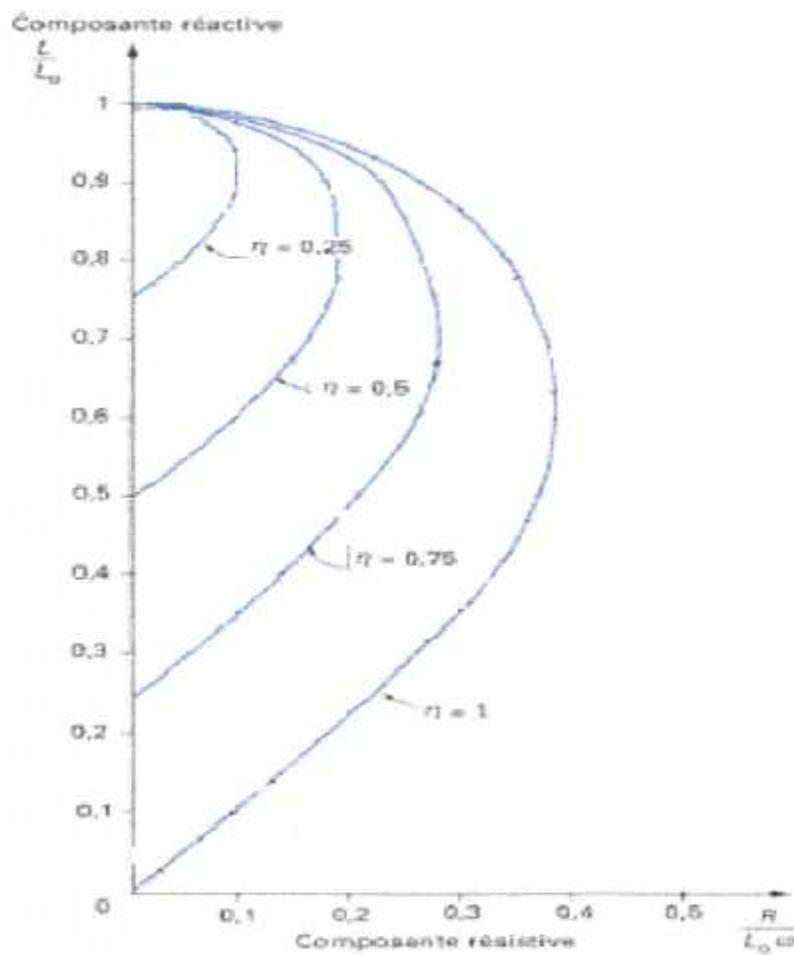


Figure 1.8 : Diagramme d'impédance normalisée pour différents valeur de η .

- **L'influence de la fréquence :**

L'influence de la fréquence pour une conductivité électrique et une perméabilité magnétique constante est la même que l'influence de la conductivité électrique.

Pour une fréquence nulle correspondant au point haut de la courbe, les courants de Foucault sont nuls (champ magnétique constant). par contre, pour une fréquence infinie, la constante de pénétration standard tend vers zéro, la circulation des courants de Foucault est en surface.

Une augmentation de la fréquence provoque un déplacement de point (0,1) correspondant à une fréquence nulle au point (0,0) correspondant à une fréquence infini.

I-5-2 – le choix de la fréquence de contrôle :

Le premier facteur qui intervient dans le choix de la fréquence est la pénétration des courants de Foucault. L'utilisation d'une basse fréquence permet une profondeur importante [9].

Les matériaux ferromagnétiques, la gamme de fréquence de contrôle choisie relativement faible (résistance à la pénétration des courants de Foucault).

Dans certaines conditions, il est avantageux de fonctionner à des endroits précis du diagramme d'impédance, cela est possible en choisissant les paramètres appropriés pour le contrôle [4].

La fréquence de contrôle appropriée est :

$$f = 3 \frac{\rho}{x^2} \dots\dots\dots(1.4)$$

Où ρ est la résistivité électrique,

$x=3\delta$ (δ est la profondeur de pénétration standard), la profondeur maximal a tendre par les courants de Foucault [9].

II- Etude des sondes :

Il apparaît, après études des différents types de sondes (ferritique, acier doux, isolant) avec des géométries différentes (plate, conique,...), nécessaire de souligner que le succès d'une recherche de faisabilité dépend en grande partie de la bonne définition des capteurs de mesure, de telle sorte que ceux-ci soient pour le mieux adaptés au problème considéré.

La sensibilité aux défauts et autres paramètres de contrôle de pièces peuvent être modifiés 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 bobine de taille appropriée et de la géométrie de la pièce à contrôler [5] [13].

Les sondes permettent des mesures ponctuelles, elles sont maintenues perpendiculaires à la surface, leur profil doit épouser le mieux possible celui de l'échantillon.

II-1 – Différents types de sondes :

Le capteur à courants de Foucault est un des paramètres essentiels du contrôle par courants de foucault. On distingue trois grandes familles de capteurs [1] [13] :

- **Bobines encerclantes** : elles sont utilisées pour le contrôle des produits cylindriques.



Figure 1.9 différents types de bobines [9]

- **Sonde internes** : C'est une bobine de petite section, qui permet le contrôle interne des produits cylindriques creux.

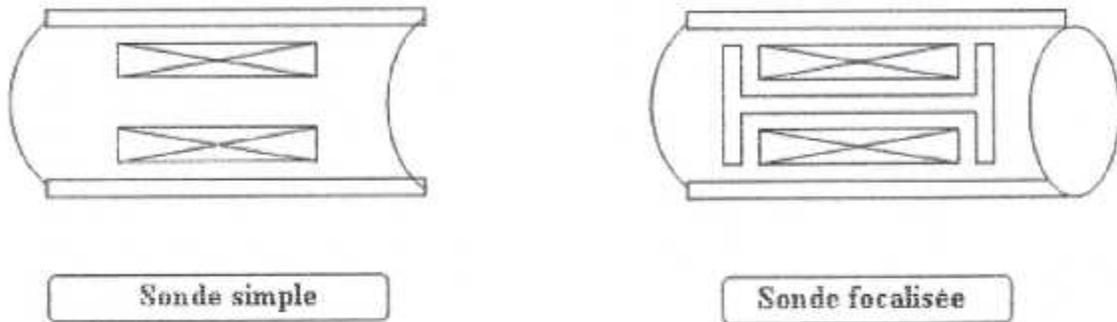


Figure 1.10 différents types de sondes [9].

- **Palpeurs de surfaces** : ils sont destinés aux surfaces planes, et maintenus perpendiculairement à eux, leur profil doit épouser le mieux possible celui de l'échantillon, pour l'obtention d'une meilleure sensibilité.

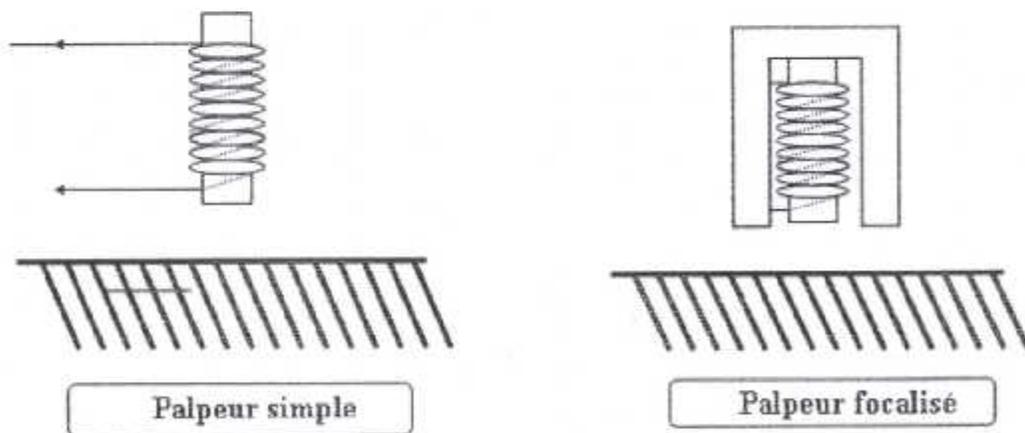


Figure 1.11 différents palpeurs de surfaces [9].

Il existe aussi des sondes focalisées afin de réduire la dépression du champ magnétique qui permettent aussi :

- une mesure ponctuelle.
- Meilleure concentration.
- Augmentation de la densité de courants en surface.
- Diminution de la profondeur de pénétration.

II- 2 Les fonctions du capteurs:

II -2-1 capteurs a double fonction :

Dans ce cas, le capteur est constitué de un ou plusieurs bobinages qui agissent à la fois comme émetteur et récepteur.

Le même bobinage est utilisé pour induire des courants dans la pièce, et recevoir les informations, par la mesure de l'impédance de la bobine d'excitation [11].



Figure 1.12: Bobinage simple

II-2-2-capteur à fonction séparée (émission-réception) :

Il est constitué de deux bobinages, l'un produit une induction d'excitation et l'autre de récepteur du flux magnétique. Ils sont souvent utilisés pour un contrôle qui nécessite un champ magnétique intense [11].

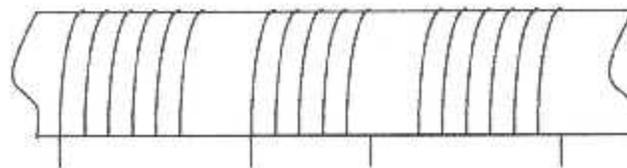


Figure 1.13: Capteur à fonction séparée

II-3- les modes de mesure :

II-3-1- mode absolu :

Un capteur en mode absolu : c'est un capteur qui génère les courants de Foucault et fait la mesure directement à ces bornes.

II-3-2 : mode différentiel :

On parle de capteur en mode différentiel lorsque la réception se fera par comparaison de deux zones voisines. La bobine de réception comporte deux enroulements montés en opposition, enroulés sur le même support, l'un est utilisé pour l'excitation et l'autre pour la réception. La mesure est la différence entre les deux.

III- détection des défauts :

Soit une pièce plane de matériau non ferromagnétique contenant des défauts artificiels (fissure). Le point de fonctionnement se déplace vers le centre (0,1) au fur et à mesure que la profondeur augmente.

Toutefois le bord des pièces se situe dans la zone d'action du palpeur, il en résulte une perturbation du signal qui se traduit par une diminution du couplage magnétique mais surtout par une augmentation de la composante résistive (interruption des lignes de courants) comme si l'élément circuit équivalent matériau-bobine devenait plus résistif (phénomène de bord) [9].

III-1-Position de la sonde par rapport à l'échantillon :

L'amplitude du signal d'un défaut est en fonction de la dimension du capteur.
La meilleure détection est obtenue lorsque les courants de Foucault sont perpendiculaires aux défauts.

L'augmentation des dimensions du capteur améliorent la surface examinée par contre la sensibilité est réduite. L'éloignement du capteur de l'échantillon à contrôler diminue la sensibilité [9].

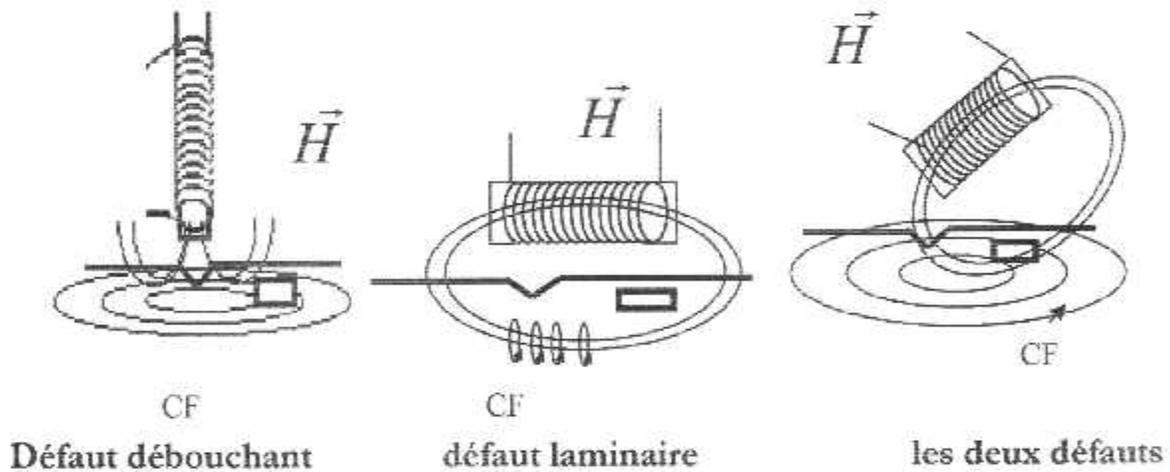


Figure 1.14 Position de la sonde par rapport à l'échantillon

III-2- Influence du dimensionnement de la pièce sur les courants de Foucault :

III-2-1-L'effet du bord :

L'effet de bord peut être démontré par le mouvement du capteur vers le bord de la pièce, en observant le changement du résultat de la mesure.

L'emplacement de la sonde par rapport au bord de la pièce a une influence sur le contrôle. Pour éviter toute perturbation, nous devons travailler à une distance de 5mm au delà de l'extrémité de la pièce.

Afin d'éviter ce phénomène, la sonde doit être focalisée et éloignée du bord de la pièce d'une distance bien déterminée [6].

IV- Exemple d'application des courants de Foucault :

IV-1-mesure de conductivité électrique :

Une différence de conductivité électrique provoque une variation d'impédance de la sonde. Les valeurs de l'impédance sont établies en utilisant des pièces de références standard où l'effet de l'épaisseur et du lift-off, doit être atténués.

La mesure de conductivité électrique est fait par des appareils commerciaux fonctionnent à de $F > 50\text{kHz}$.

IV-1-1-Analogie entre un petit défaut et une faible variation de la conductivité électrique :

Considérons un tube de section (S) portant une rainure longitudinale de surface (ΔS) et de longueur (ΔL). ΔL est très faible devant la longueur moyenne (L) d'une ligne de courant. La bobine induit des nappes de courants cylindriques situés dans le plan de section principale du tube [9].

R_s et R_d sont respectivement les résistances de la zone saine et de la zone défectueuse.

$$R_s = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \quad (1.5) \quad \text{et} \quad R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L - \Delta L}{S} + \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta L}{S - \Delta S} \dots\dots\dots (1.6)$$

$$R_d = \frac{L}{\sigma S} \left(1 - \frac{\Delta L}{L}\right) + \frac{\Delta L}{\sigma S} \left[1 + \frac{\Delta S}{S}\right] \dots\dots\dots (1.7)$$

Soit : après calcul $R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \left[1 + \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right]$ donc $R_d = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right)}\right] \dots\dots\dots (1.8)$

Tout se passe comme si $\sigma' = \sigma \left[1 + \frac{\Delta L}{L} \frac{\Delta S}{S}\right] \dots\dots\dots (1.9)$

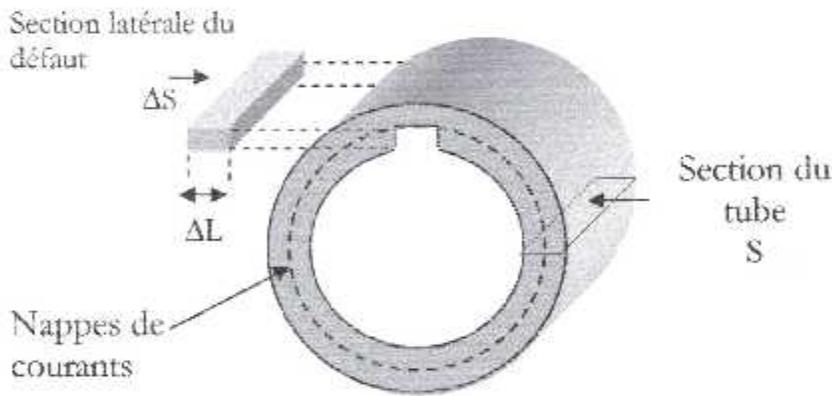


Figure 1.15 : Schématisation de la répartition des courants de Foucault dans un tube présentant un petit défaut [9].

Chapitre II

Réalisation des sondes

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.

La construction des sondes à courant de Foucault est régie par un choix optimal de ses paramètres afin d'augmenter leurs sensibilités.

L'étude du champ magnétique créé au voisinage d'une sonde nous permet de montrer le champ d'action de cette sonde pour un contrôle optimal.

I- Réalisation des sondes :

Pour la réalisation des capteurs notre travail s'est fait sous la direction des ingénieurs du laboratoire d'électronique du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle.

La méthode de contrôle par les courants de Foucault consiste à mesurer la variation d'impédance d'un capteur.

Dans ce travail, il nous a été proposé d'analyser des pièces planes, d'où la nécessité d'utiliser des palpeurs de surface, de forme conique qui effectue des mesures ponctuelles.

La construction des sondes à Courants de Foucault d'une configuration donnée est basée sur des principes relativement simples. La forme de la sonde, sa section transversale, sa taille, sa configuration et sa source d'excitation sont tous des paramètres qui peuvent servir au constructeur pour fabriquer des sondes particulières, souhaitables pour des applications spécifiques ou générales.

La construction de capteurs est gouvernée par les paramètres, inductance de la sonde, résistance, distribution du champ à son voisinage, sa réponse en présence d'un matériau vis à vis d'un défaut (de type fissure, trou, discontinuité) et de la distance du matériau (lift-off).

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.

I-1- support de sondes :

Le support que nous avons utilisé est un bâtonnet de ferrite de forme circulaire.

L'utilisation de la ferrite comme noyau (support) des sondes à permet :

- D'augmenter l'inductance magnétique (perméabilité magnétique importante).
- D'augmenter le flux magnétique (réductance très faible).

De diminuer la surface de contact (usinage facile) pour focaliser le champ magnétique.

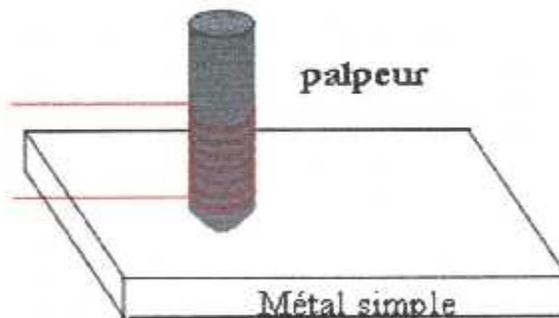


Figure II-1 sonde de forme conique

Et comme la ferrite a une structure fragile. On a trouvé une grande difficulté pour la transformer à une forme circulaire et cela nous oblige d'utiliser le papier vers et la transformer manuellement par toute précaution et délicatesse, ce qui nous prend beaucoup de temps.

I-2- Procède de réalisation des sondes :

Le diamètre de fil de bobinage à été choisi de telle façon à augmenter l'inductance propre des sondes (nombre de spires élevé) et diminuer la valeur de la résistance (échauffement par effet joule).

La variation du diamètre de la sonde montre que:

- pour des petits diamètres, le champ d'action est petit mais l'induction est plus forte.
- pour des sondes à large diamètre, le champ d'action est large et l'induction est approximativement constante.
- L'effet de décollement (lift-off) montre que l'atténuation de l'induction magnétique est importante pour des sondes de petit diamètre [10].

Afin de déterminer les valeurs respectives de la résistance et l'inductance du solénoïde il faut tenir compte de quelque condition :

- Il est nécessaire que le bobinage soit à l'extrémité de la ferrite.
- En augmente le diamètre des sondes pour améliorer la pénétration des cf et minimiser l'échauffement du solénoïde.
- Le champ magnétique doit être constant à l'intérieure de solénoïde par l'augmentation de leur longueur.
- L'effet capacitif doit être réduite afin d'avoir un capteur utilisable sur une grande gamme de fréquence et cela par la réalisation de solénoïde en spires jointives.

Afin de satisfaire ces conditions des essais seront fait pour confirmer ces résultats par :

- Les réponses de diagramme d'impédance d'un matériau conducteur.
- La réponse des variation des vrais et imaginaires partie de l'impédance en fonction de la fréquence, avec au sans la présence d'échantillon.
- Des cartographies des pièces étalon.

I-3- caractérisation des sondes :

La caractérisation des sondes par courants de Foucault est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance normalisé de celle-ci obtenu par un balayage de fréquences.

Les fréquences choisies pour le tracé du diagramme d'impédance varient des basses fréquences 50Hz à de hautes fréquences 100 KHz.

Le diagramme d'impédance nous permet alors de voir :

- La meilleure gamme de fréquences où l'interaction sonde matériau est optimale.
- La sensibilité du capteur.

Les réponses par les diagrammes d'impédances normalisées ont facilités le choix de la sonde appropriée.

I-4- mesure de l'impédance de la sonde :

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

$$Z = R + jL\omega \quad (\text{II.1})$$

- Le calcul de la partie réelle de la sonde R est donné par la loi d'ohm :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad \text{avec } \begin{array}{l} \rho \text{ Résistivité électrique} \\ L \text{ Longueur du fil} \\ S \text{ section du fil} \end{array} \quad (\text{II.2})$$

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

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \dots \dots \dots (\text{II.3}).$$

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l} \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

Avec μ : est la perméabilité magnétique du milieu, elle égal à $\mu\mu_r$, avec μ_r est la perméabilité relative.

N : nombre de spire

S : section de solénoïde (mm)

I : longueur de solénoïde (mm)

L : est la valeur de l'inductance en henry (H).

La tension à ses bornes : $v=Z \cdot I$. avec : I : le courants

Z : l'impédance.

D'où la valeur de l'impédance est $Z=\sqrt{(R^2 + (L\omega)^2)}$.

Et la phase de l'impédance : $\varphi= \arctg LW/R$

II- Présentation des résultats :

Nous avons choisi la construction de l'enroulement conique où le champ latérale à un point de contact en ce qui concerne une configuration droite est diminuer avec un facteur exponentiel.

Les résultats obtenus sont comme suivant :

A vide :

- la partie imaginaire se tient constante.
- La partie réelle augmente légèrement avec la fréquence (effet joule).

Et avec la présence de matériau :

- la variation d'inductance suite une loi exponentielle, l'augmentation de la résistance d'enroulement est plus significative en fonction de la fréquence due la génération des courants de Foucault dans le matériau.

Plusieurs types de sonde, de différents diamètres, de nombres de spires, de section de fil et de longueurs on a été réalisés, parmi eux sont représenté dans le tableau (II-1) suivant :

Sondes	Diamètre du fil en mm	Nombre de spires	Nombre de couche	Diamètre de la ferrite en mm	Induction en henry	Résistance en ohm
1	0.09	150	1	9	0.001	17.79
2	0.09	150	1	7	0.002	22.23
3	0.132	150	1	7	1.15	5.58
4	0.09	270	3	9	0.0032	10.98
5	0.09	200	2	9	0.0017	24.85
6	0.09	600	4	7	0.0125	52.211
7	0.132	250	1	9	0.0031	28.99
8	0.09	2000	5	7	0,12105	179,71

Tableau (II-1) : les différentes sondes réalisées.

Exemples :

La 1^{ère} sonde:

Diamètre du fil en mm	Nombre de spires	Diamètre de la ferrite en mm	Induction en henry	Résistance en ohm
0.09	150	0.9	0.001	17.7

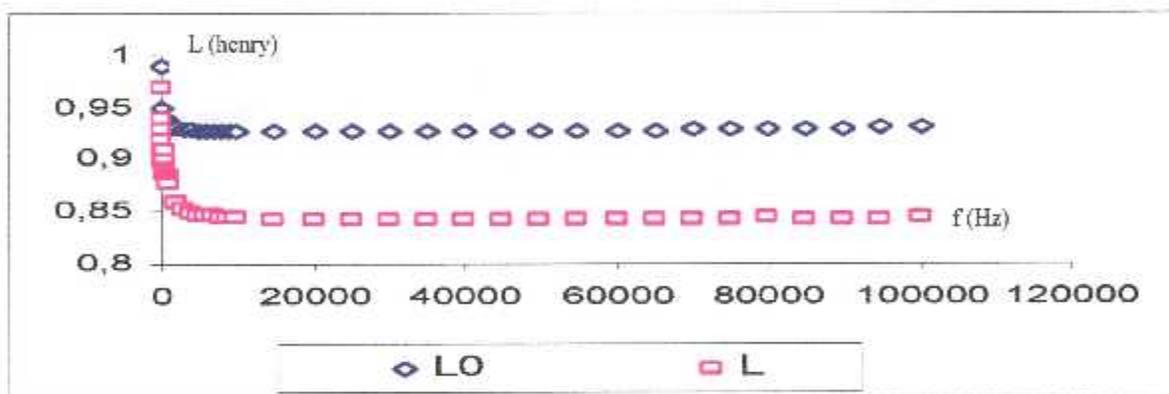


Figure II-2 Variation de l'induction en fonction de la fréquence

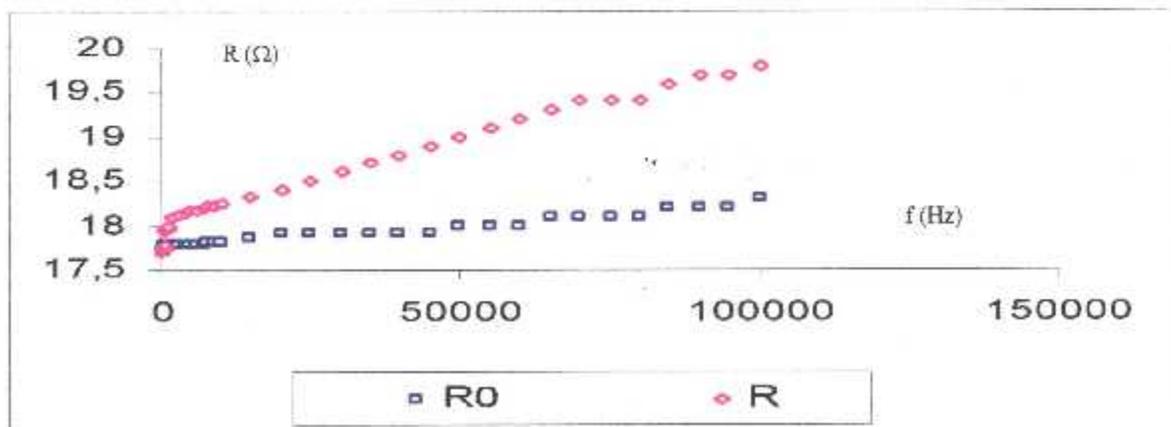


Figure II-3 Variation de la résistance en fonction de La fréquence

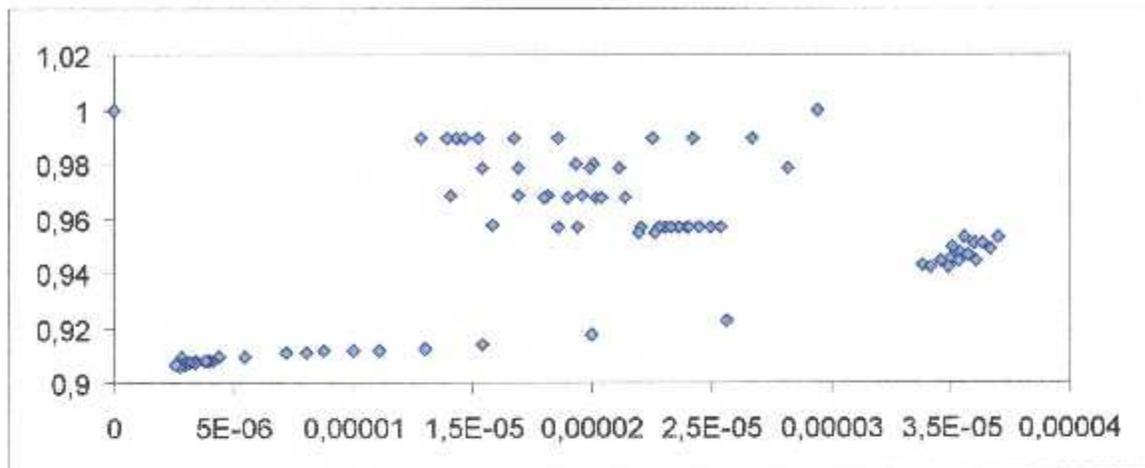


Figure II.4 Diagramme d'impédance normalisé.

Les résultats, que la sonde indiquée sont confirmés par le diagramme d'impédance, en effet ce diagramme présente beaucoup de fluctuations donc, la sonde est à refaire.

Pour cette sonde la gamme de fréquence pour la quelle les résultats sont interprétables ne dépasse pas 15 KHZ (effet de résonance).

La sonde n° 6:

Diamètre du fil En mm	Diamètre de la ferrite en mm	Nombre de spires	Inductance en henry	Résistance en ohm
0.09	9	600	0,0125	59,211

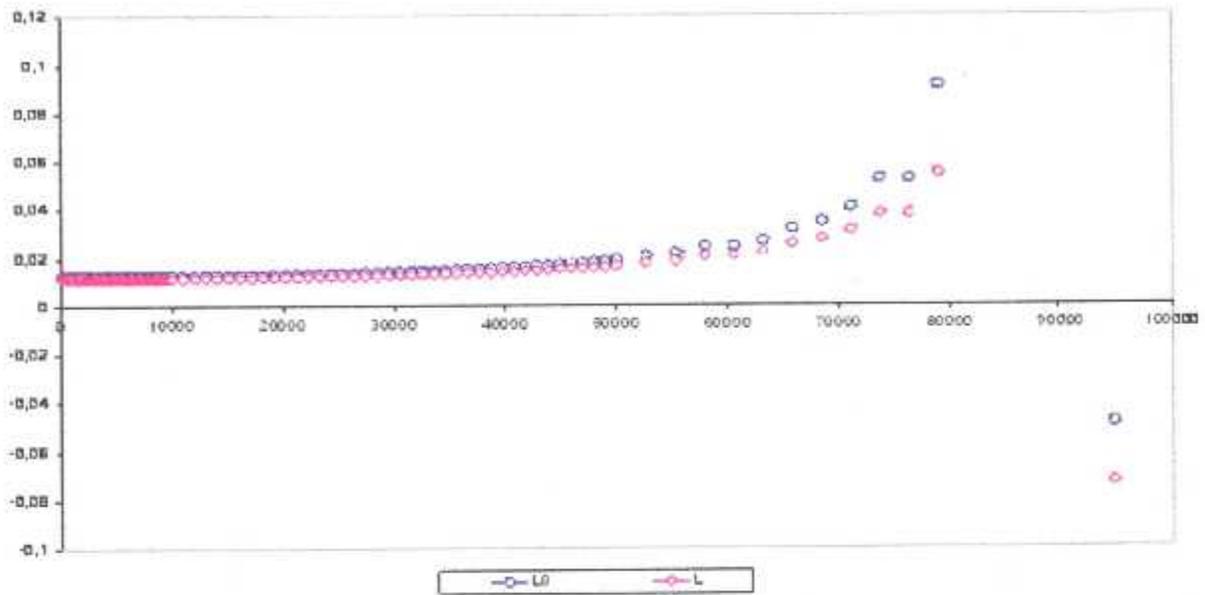


Figure II-5 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.

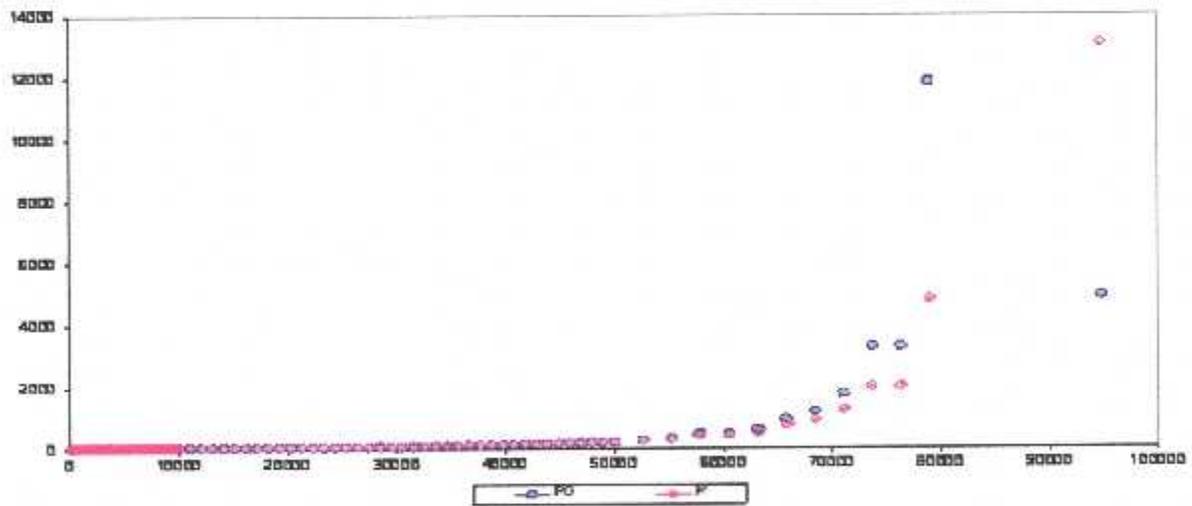


Figure II-6 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.

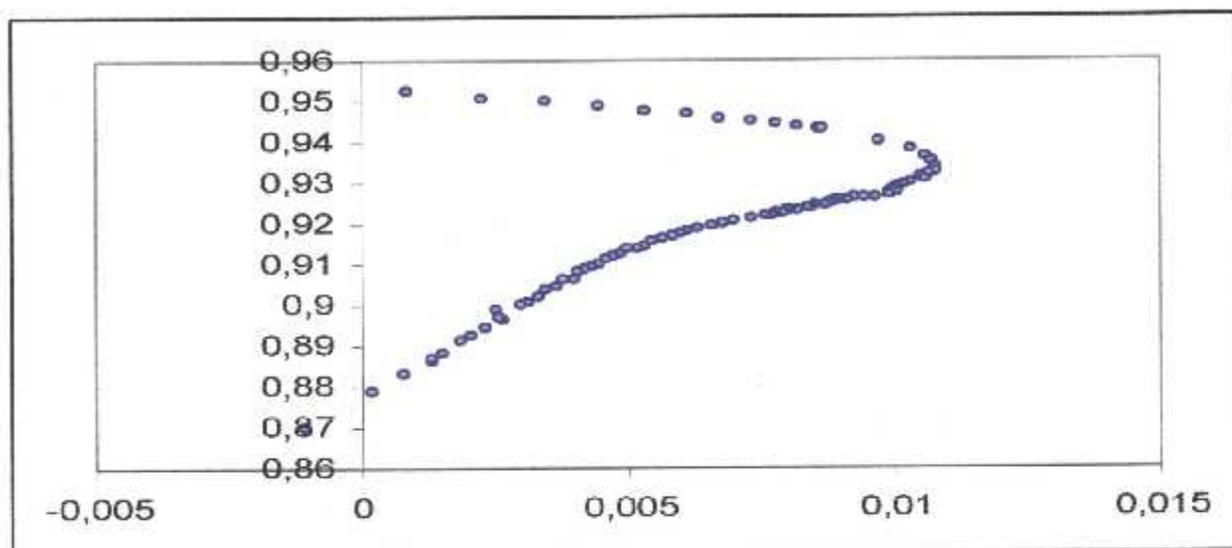


Figure II-7 Diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium de la 3^{ème} sonde

Pour cette sonde les résultats fréquentiels de l'inductance et la résistance en charge et à vide sont presque constants jusqu'à la fréquence 50 kHz ou on trouve que les valeurs tendent à zéro.

La gamme de fréquences pour laquelle cette sonde nous donne des résultats acceptables est de 600Hz à 50 KHZ. (Effet de résonance).

La sonde n° 5 :

Diamètre du fil En mm	Diamètre de la ferrite en mm	Nombre de spires	Inductance en henry	Résistance en ohm
0.09	9	200	0.0017	24.85

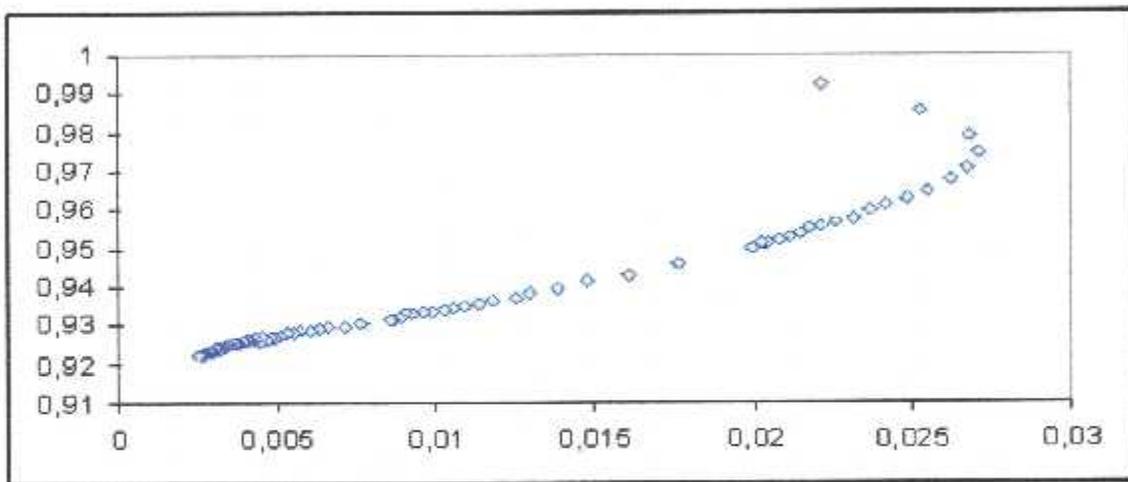


Figure II-8 diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium de la 1^{ère} sonde

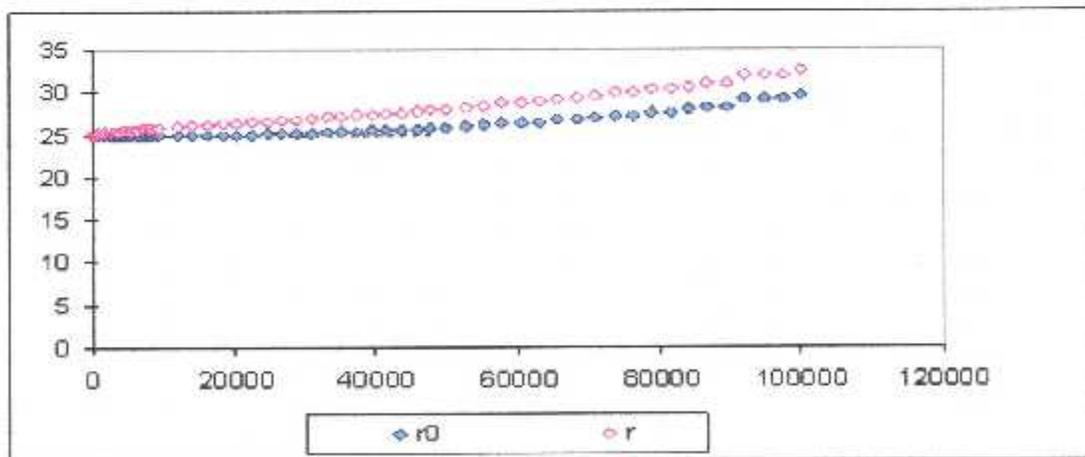


Figure II-9 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.

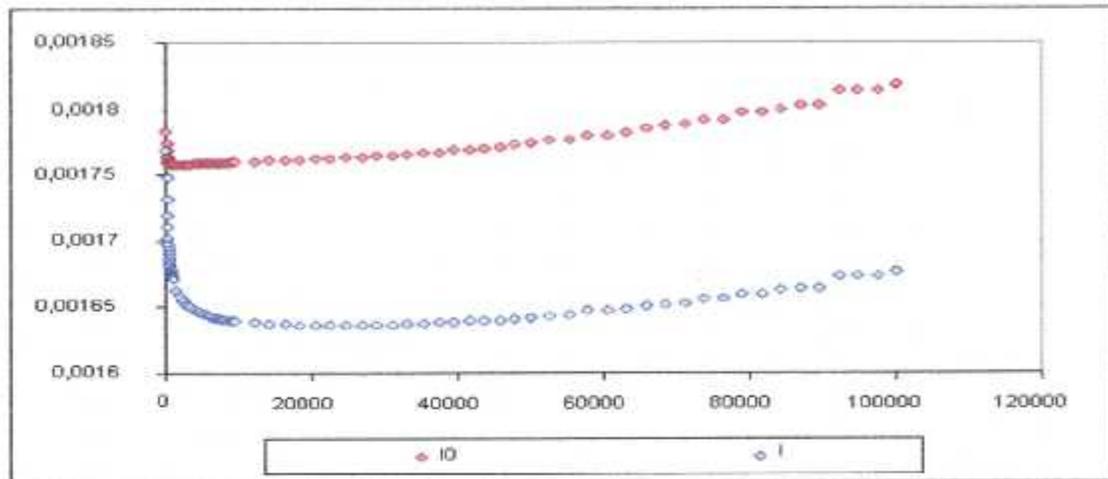


Figure II-10 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.

La sonde 9:

Diamètre du fil En mm	Diamètre de la ferrite en mm	Nombre de spires	Inductance en henry	Résistance en ohm
0.132	9	270	0,0017	23,935

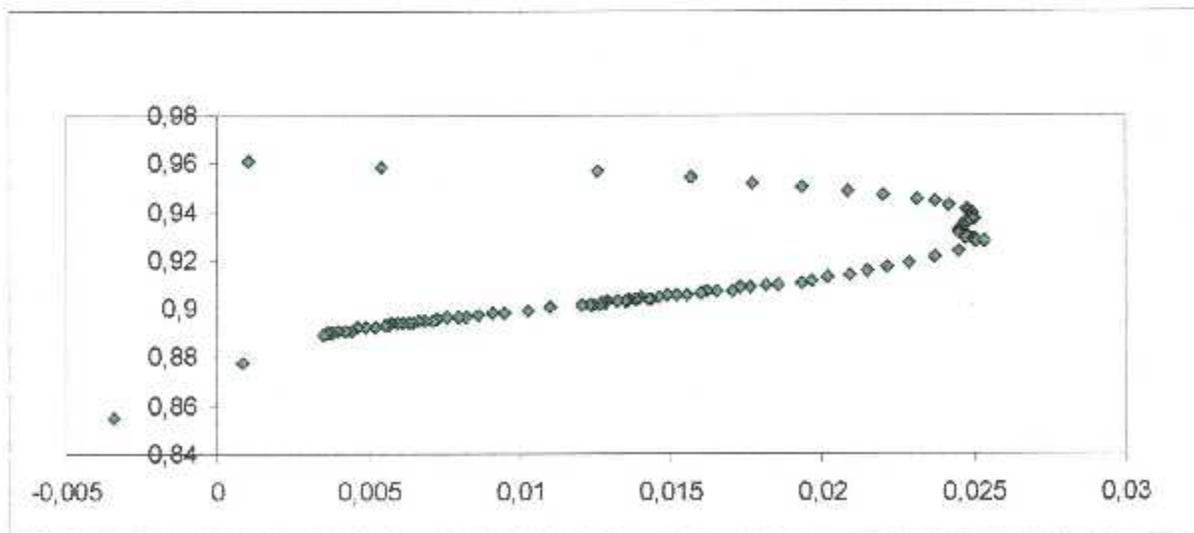


Figure II-11 Diagramme d'impédance d'une pièce en aluminium de la 2^{ème} sonde

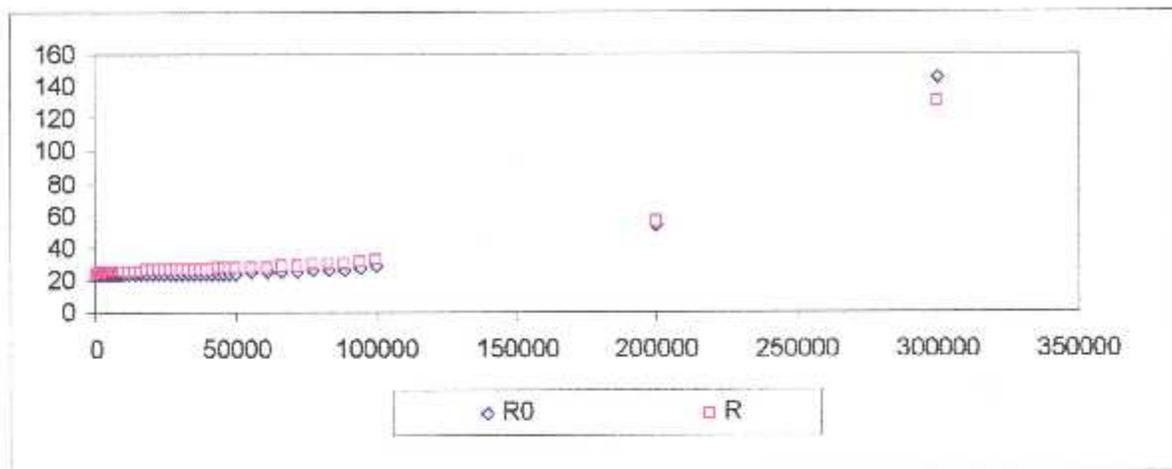


Figure II-12 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.

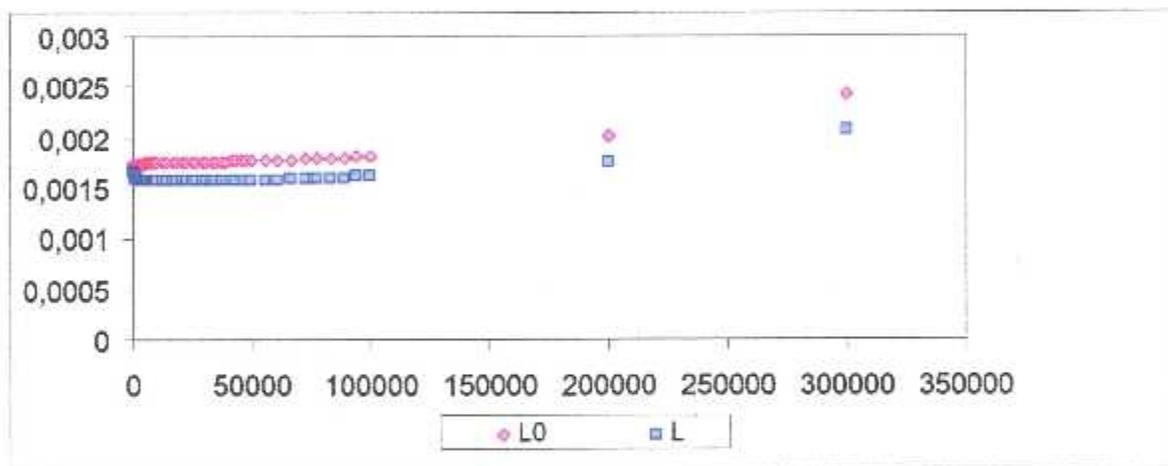


Figure II-13 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.

La sonde N° 8:

Diamètre du fil En mm	Diamètre de la ferrite en mm	Nombre de spires	Inductance en henry	Résistance en ohm
0,09	7	2000	0,12105	179,71

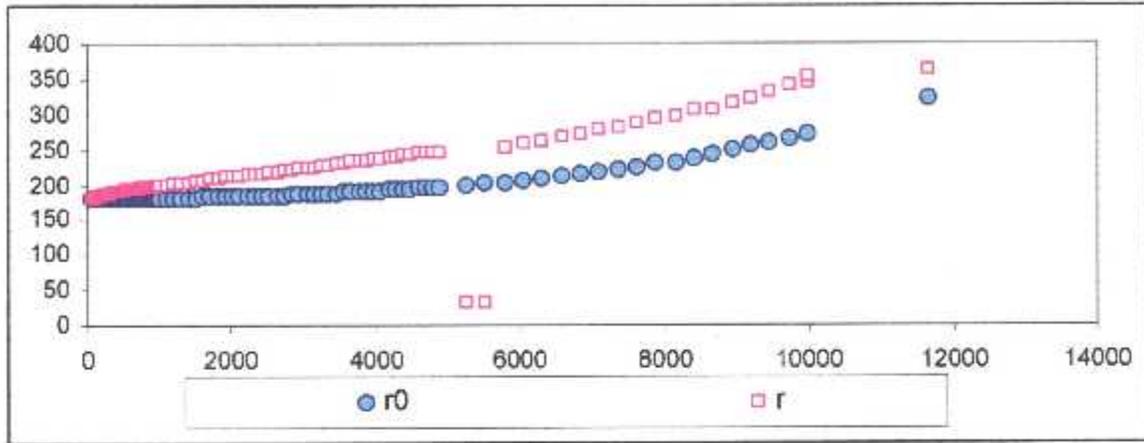


Figure II-14 variation de la résistance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'aluminium.

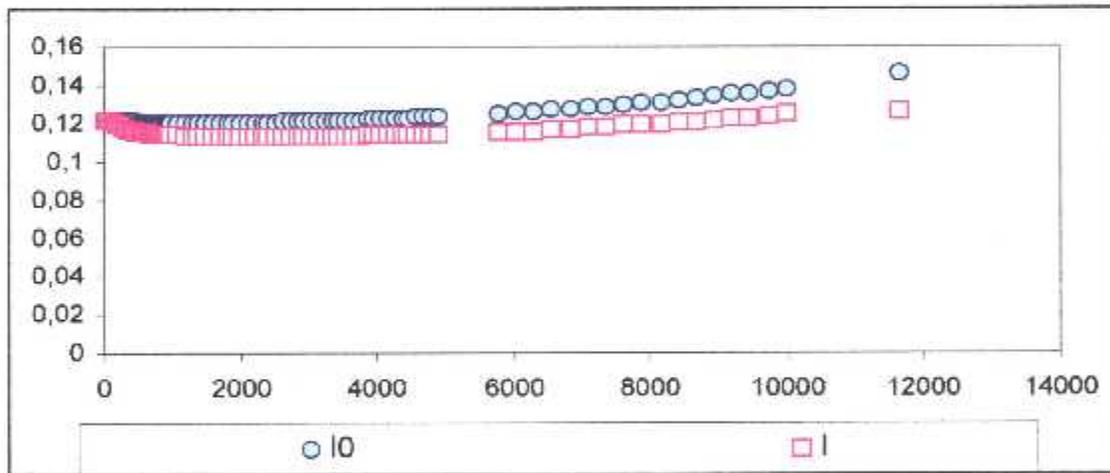


Figure II-15 variation de l'inductance en fonction de la fréquence en présence et en absence de la pièce d'alu minium.

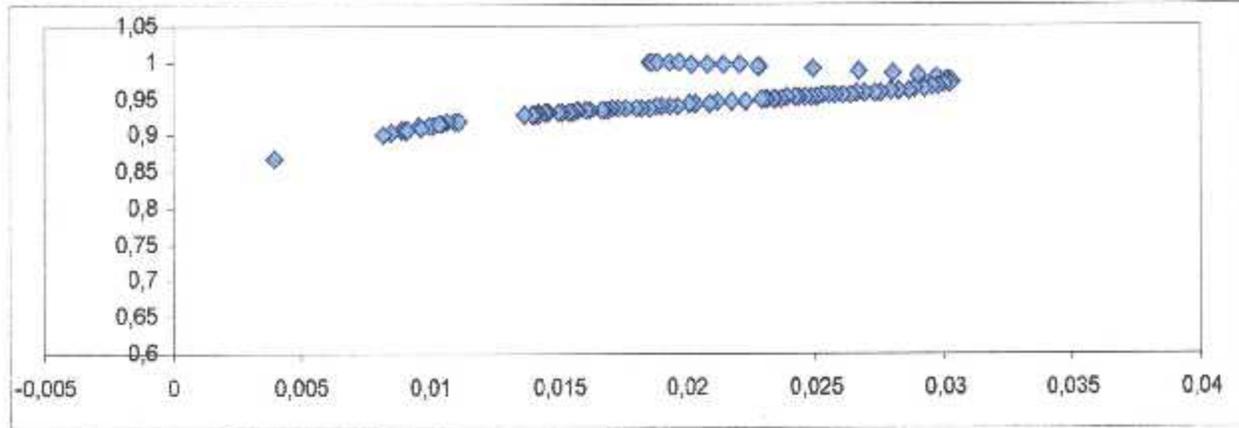


Figure II- 16 diagramme d'impédance normalisé pour l'aluminium.

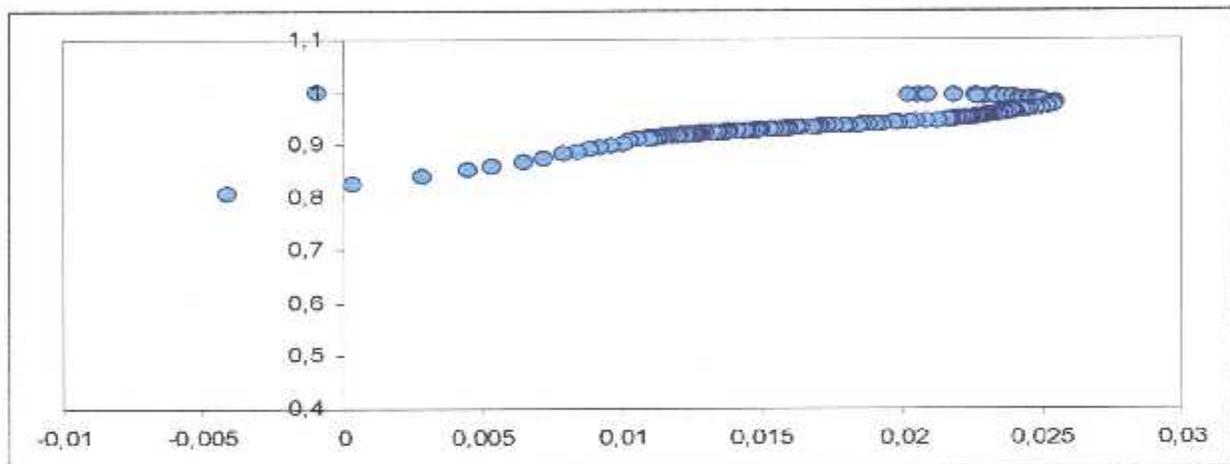


Figure II- 17 diagramme d'impédance normalisé pour le bronze.

Les résultats fréquentiels obtenus pour ces trois dernières sondes présentent une bonne stabilité (figures 9, 10, 12, 13, 14 et 15).

La confirmation par le diagramme d'impédance est obtenue. En effet les trajectoires décrites par les courbes des figures (II.8, II.11 et II.16) sur l'aluminium présente une cohérence avec la théorie. De ce la on peut dire que ces deux sondes sont stables et peuvent être utilisées dans le contrôle, de plus cela nous permettra de définir la fréquence optimale de contrôle.

Chapitre III :

Procédures expérimentales

Introduction :

La méthode de contrôle par courants de Foucault est basée sur la reproductibilité des résultats. De ce fait les pièces de référence ont un rôle important dans l'exploitation des résultats.

Pour faciliter l'analyse des résultats et la commande des équipements de mesures et de déplacement on a utilisé un programme qui a été réalisé au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (C.S.C) de Chéraga.

Les données et les conditions de contrôle sont fournies directement au logiciel, les résultats apparaissent, soit sous forme d'image graphique (noire et blanc ou couleur) soit par une représentation de la variation en trois dimensions de l'impédance ou de la phase.

I- Présentation des pièces étalons :

Le tableau (3-1) donne les différents échantillons ferromagnétiques et non ferromagnétiques de rainures de différentes profondeurs :

Profondeur du défaut surfacique (mm)		1 ^{er} défaut	2 ^e défaut	3 ^e défaut
Les pièces ferromagnétiques	31A008	0.5	1	2
	29A028	0.2	0.5	1
Les pièces non ferromagnétiques	29A029	0.2	0.5	1
	29A047	0.2	0.5	1
	7075-T6	0.2	0.5	1

Tableau (3-1) : les différents échantillons.

II- Description du système de déplacement :

Au niveau du centre de recherche en soudage et contrôle non destructif, un système de déplacement du capteur est disponible.

Il est constitué de deux chariots, l'un longitudinal et l'autre transversal, dont les mouvements sont assurés par des moteurs pas à pas. Le support du capteur est fixé sur le chariot transversal, il est réglable verticalement, orientable dans toutes les directions.

La figure ci-dessus représente un système de balayage.

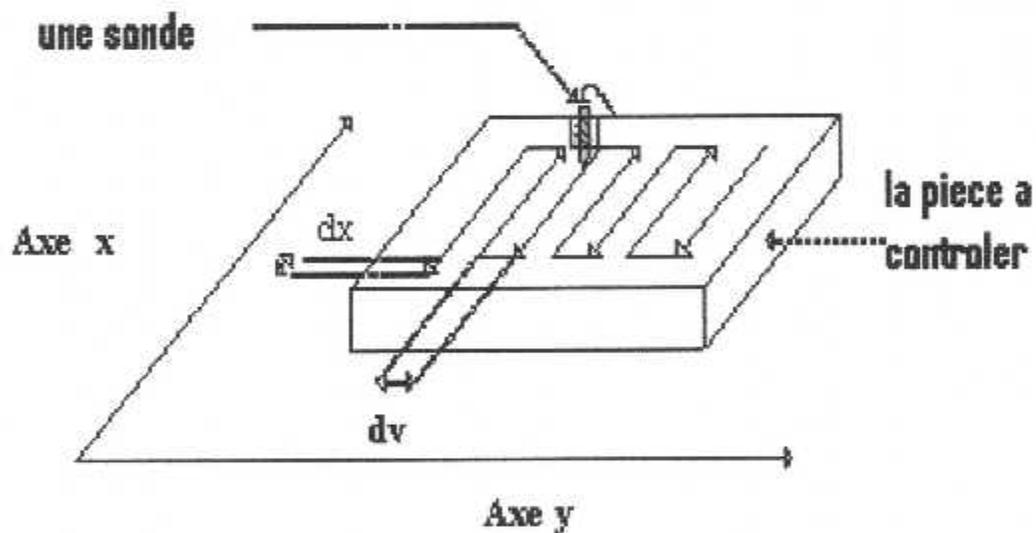


Figure III.1 le système de déplacement

III- la chaîne d'acquisition et de contrôle :

Un appareil de mesure pour la technique du contrôle non destructif par courant de Foucault est basé sur un système d'excitation qui délivre un signal oscillatoire (alternatif) qui alimente la bobine, un système de mesure qui génère le champ magnétique dont le capteur est l'élément essentiel situé en aval de l'oscillateur. Et un système d'exploitation qui permet le traitement de l'information lors d'un contrôle.

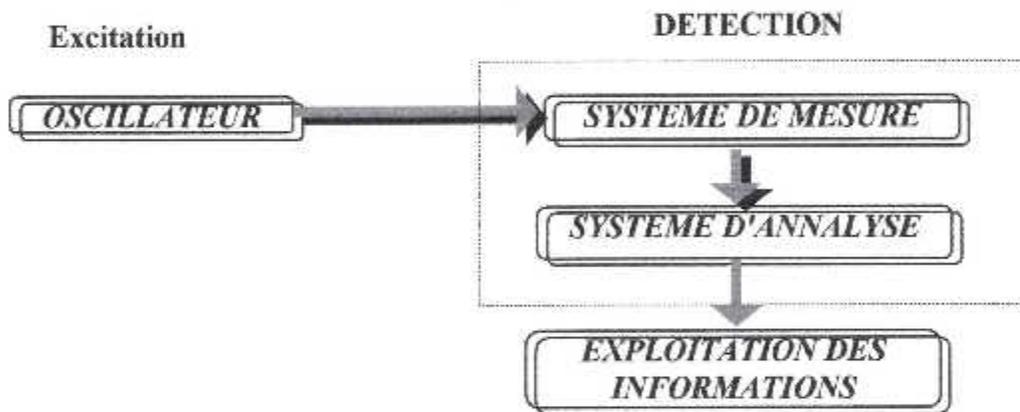


Figure III-2 la chaîne d'acquisition et de contrôle.

Dans notre cas, la chaîne d'acquisition et de contrôle, se compose de :

Un système de mesure assuré par un appareil de type AGILEN, c'est un mesureur d'impédance qui permet de mesurer l'impédance de la sonde (sa résistance, son inductance, et le déphasage avec une précision de l'ordre de 10^{-12} pour des fréquences allant de 20 HZ à un 1MHZ), pilotée par un micro-ordinateur par le biais de l'interface GPIB.

Un système de déplacement micrométrique de type OWIS, commandé par le micro-ordinateur par le biais de l'interface RS232.

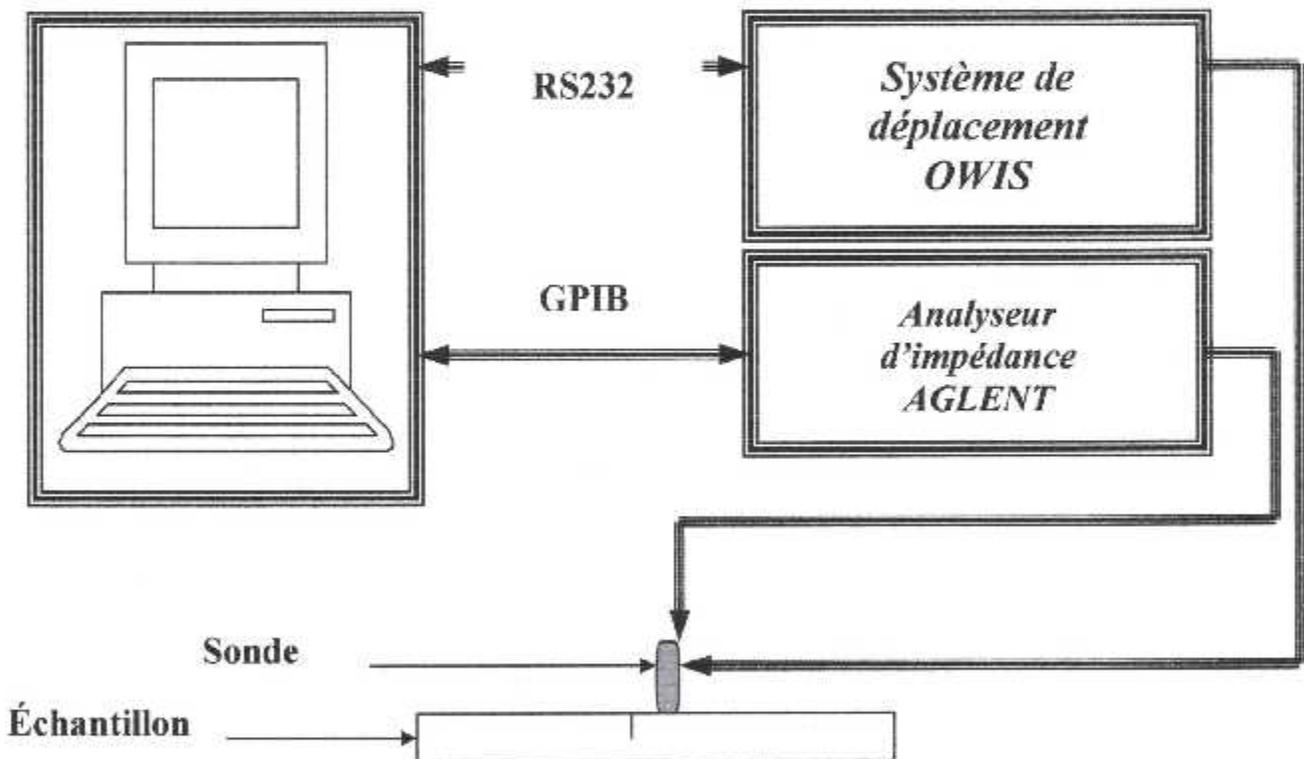


Figure III.4 : Synoptique de la chaîne d'acquisition et de contrôle par courants de Foucault

Introduction :

L'outil informatique, par le biais du logiciel développé au niveau du centre de recherche en soudage et contrôle (C.S.C), nous permettra l'acquisition et le traitement des mesures et nous faciliter l'interprétation.

L'ordinateur fera l'acquisition des mesures fournies par le mesureur d'impédance par le biais d'une interface IEEE488 et la commande du système mécanique de déplacement de la sonde par l'intermédiaire de l'interface RS232.

I- Organigramme du mesureur d'impédance :

Ce programme permet d'obtenir un fichier contenant les valeurs des mesures de la résistance, inductance, capacité, impédance, phase de la sonde pour différentes fréquences choisie par l'utilisateur, il est décrite dans l'organigramme (annexe II : A1).

Ce fichier obtenu pour les deux cas de la sonde (à vide et en charge), permettra de caractériser cette dernière par le tracé du diagramme d'impédance normalisé.

II- Organigramme du système de déplacement :

Le système de déplacement micrométrique 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 μ m de résolution.

Après avoir introduit la fréquence, les dimensions et le pas du balayage, le logiciel procédera :

- A gérer le déplacement de la sonde sur la surface de l'échantillon
- Acquérir pour chaque point, l'impédance Z et de la phase P de la sonde.
- Sauvegarder les résultats dans un fichier (annexe II : A2).

III- Reconstitution des données en images :

Une fois le balayage terminé, nous procéderons à une reconstitution en deux dimensions (2D) et en trois dimensions (3D). Elle est basée sur le principe du contrôle non destructif par courant de foucault. Les mesures de l'impédance ou de la phase sont comparées à une valeur référentielle. Le résultat de chaque comparaison est affecté par une couleur ou un niveau de gris.

La précision de l'appareil de mesure et sa stabilité joue un très grand rôle sur la fiabilité des mesures.

Nous avons choisi trois formes de palette de couleur pour l'image en 2D :

- l'une en niveaux de gris.
- l'autre en quinze couleurs chacune d'elle est réglable,
- la dernière passe du bleu au vert puis en rouge avec la possibilité de changer le nombre et le pas de variation (précision).

Nous avons aussi doté l'image en 3D pour améliorer la représentation des défauts et donner une meilleure vue, pour permettre une bonne interprétation des caractéristiques des échantillons contrôlés.

Chapitre IV

Résultats et Interprétations.

I- Introduction :

L'interprétation des résultats par la technique du contrôle non destructive par courants de Foucault est basée sur la connaissance exacte de l'évolution du diagramme d'impédance selon la variation des différents paramètres développée dans les chapitres précédents.

Dans notre travail, nous avons contrôlés des échantillons sur lesquels des défauts de différents tailles sont réalisées (voir chapitre 3).

En premier lieu, nous avons réalisés des sondes de différents diamètres et de différentes longueurs (différents nombre de spires) et on utilisant le logiciel (chapitre 3) nous avons caractériser les sondes et nous avons choisis la sonde la plus performante, c'est-à-dire, celle qui donne une large gamme de fréquence et une bonne stabilité.

La caractérisation des sondes est faite en deux étapes dans notre cas : une fois la sonde est caractérisée sur les matériaux non ferromagnétique, on la caractérise une deuxième fois sur les matériaux ferromagnétiques. Ainsi on obtient une sonde qui couvre les deux types de matériaux, donc une grande et large gamme de fréquences.

II- Résultats et interprétation :

Nous allons interpréter les résultats obtenus par le logiciel sur les pièces suivantes :

- Des pièces en aluminium présentant des rainures.
- Des pièces en acier présentant des rainures.
- Une pièce en bronze avec des rainures.

II- 1- pièces en aluminium :

- Aluminium 29A029 :

Fichier= 29A029 finale.txt
Variation de l'Impédance
Fréquence= 1000
NbPoinX= 4
NbPoinY= 160
mm/Pnt= 5
Ref= 28,583

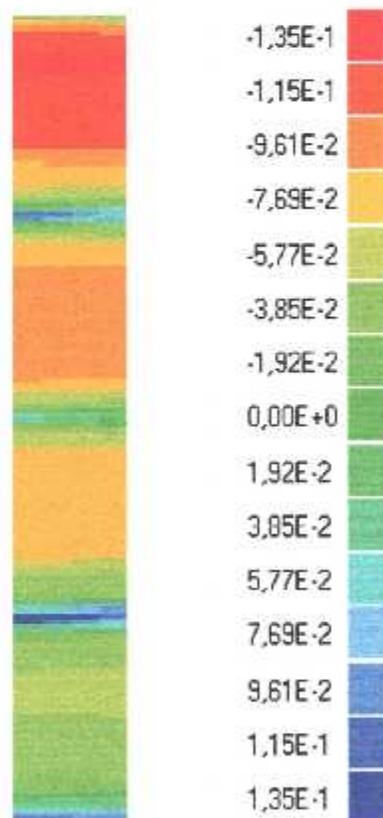


Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 29A029

Fichier= 29A029 finale.txt
 Variation de l'Impédance
 Fréquence= 1000
 NbPointX= 4
 NbPointY= 160
 mm/Pnt= 5
 Ref= 28,583

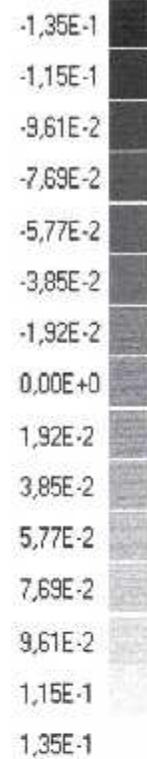


Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 290A29.

Fichier= 29A029 finale.txt
 Variation de l'Impédance
 Fréquence= 1000
 NbPointX= 4
 NbPointY= 160
 mm/Pnt= 5
 Ref= 28,583

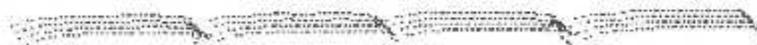


Image 3D de la pièce en aluminium 29A029.

Les trois défauts sont retracés et apparaissent bien sur l'image en couleur.

Le fond bleu qu'on voit dans l'axe des défauts est due à la forme de l'outil d'usinage de la rainure (forme conique).

Les profondeurs des défauts dans cet échantillon sont respectivement de 1, 0.5 et 0.2 mm.

Le choix de la fréquence de 1 KHz est judicieuse, car elle permet une pénétration plus importante et donc elle permet de déceler les trois défauts.

L'image en niveau de gris, confirme les résultats cités ci-dessous.

Sur l'image en trois dimensions (3D) confirme la forme des rainures, le plafond est conique.

• Aluminium 7075 :

Fichier= s5-al7075 c.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 5000
 NbPointX= 4
 NbPointY= 150
 mm/Pnt= 5
 Ref= 370,02

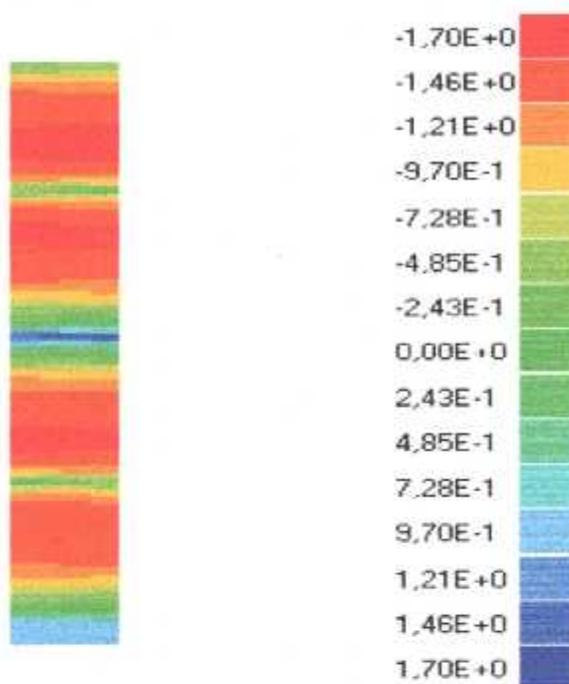


Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 7075

Fichier= s5-al7075 c.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 5000
 NbPointX= 4
 NbPointY= 150
 mm/Pnt= 5
 Ref= 370,02

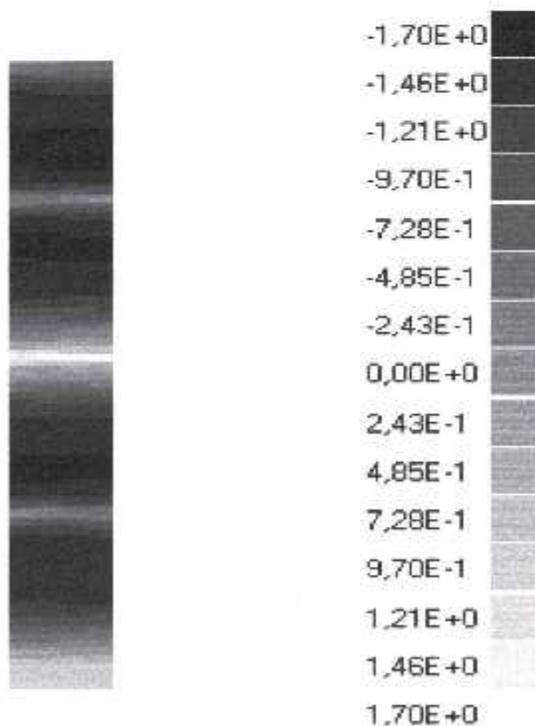


Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 7075.

Fichier= s5-al7075 c.txt
Variation de la Phase
Fréquence= 5000
NbPointX= 4
NbPointY= 150
mm/Pnt= 5
Ref= 370,02



Image 3D de la pièce en aluminium 7075.

Pour cet échantillon les trois défauts apparaissent sur l'image en couleur.

Le fond bleu qu'on voit sur l'axe de l'un des défauts est due à la forme conique de l'outil d'usinage.

Les profondeurs des défauts dans cet échantillon sont respectivement de 0.12, 0.2 et 0.4 mm.

Le choix de la fréquence de 5 KHz nous permet de voir les trois défauts, mais nous remarquons que le défaut de profondeur 0.2mm est bien décelé.

L'image en niveau de gris, confirme les résultats cités ci-dessous.

Sur l'image en trois dimensions (3D) les défauts sont bien reproduits.

• Aluminium 29A047 :

Fichier= n2000 5 29A047.dat
 Variation de la Phase
 Fréquence= 5000
 NbPointX= 5
 NbPointY= 65
 mm/Pnt= 10
 Ref= 66,44

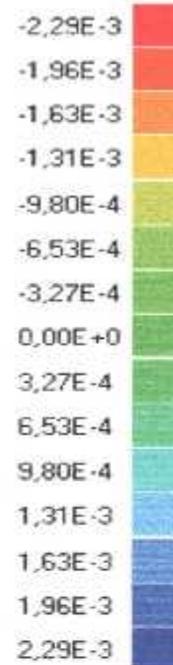
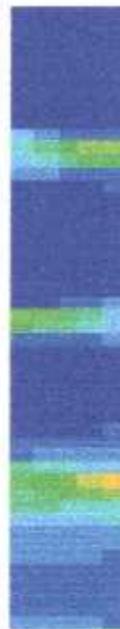


Image 2D couleur de la pièce d'aluminium 29A047.

Fichier= n2000 5 29A047.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 5000
 NbPointX= 5
 NbPointY= 65
 mm/Pnt= 10
 Ref= 66,44

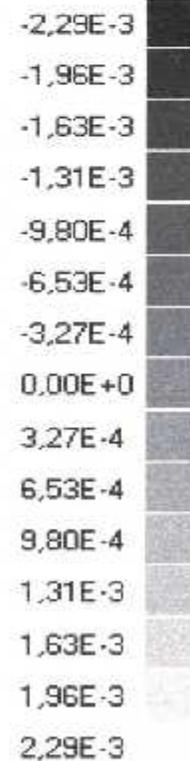


Image 2D en niveau de gris de la pièce en aluminium 29A047.

Fichier= n2000 5 29A047.txt
Variation de la Phase
Fréquence= 5000
NbPointX= 5
NbPointY= 65
mm/Pnt= 10
Ref= 66,441

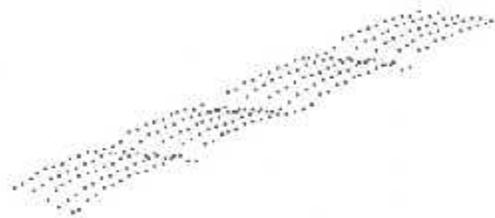


Image 3D de la pièce en aluminium 29A047.

Les défauts de cet échantillon apparaissent bien sur l'image en couleur.

Les profondeurs des défauts sont 0,2, 0,5 et 1 mm.

La fréquence de travail est de 5KHZ, elle nous permet de détecter les trois défauts, mais le dimensionnement est grossier.

L'image au niveau de gris, et l'image en trois dimensions confirment les résultats cités ci-dessous.

II- 3 –pièces en bronze :

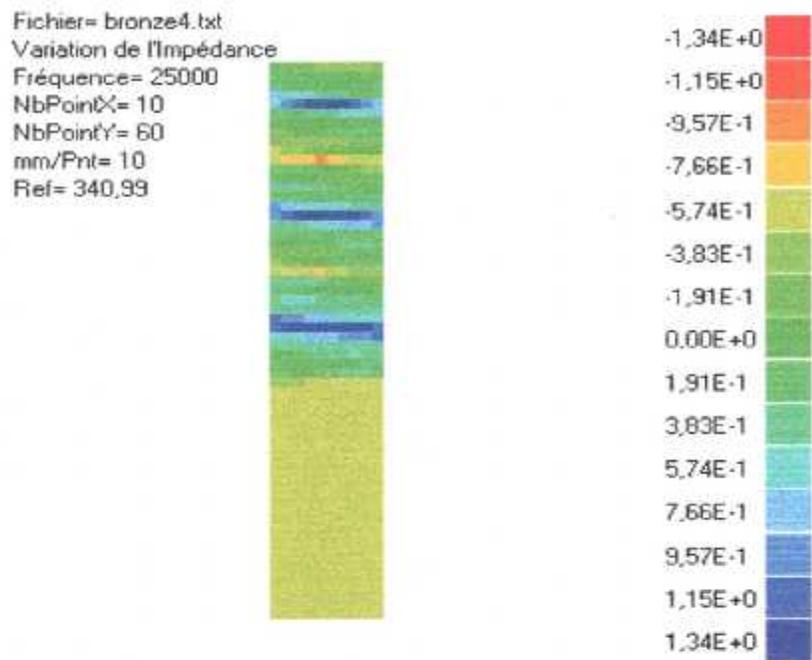


Image 2D couleur de la pièce en bronze.

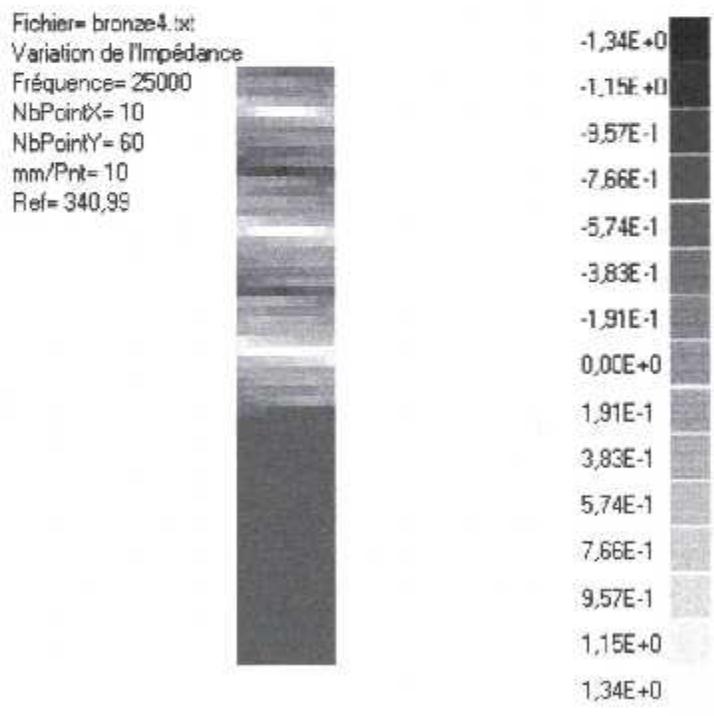


Image 2D en niveau de gris de la pièce en bronze.

Fichier= bronze 4.txt
Variation de la Phase
Fréquence= 25000
NbPointX= 10
NbPointY= 60
mm/Pnt= 10
Ref= 86,434

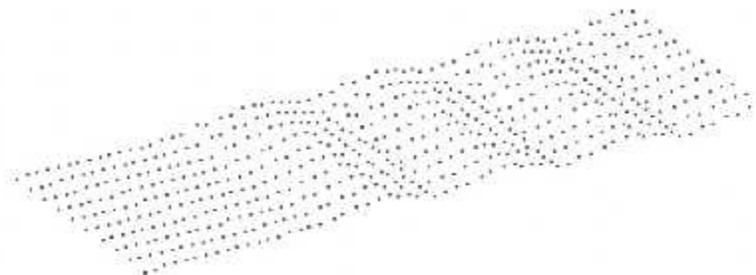


Image 3D de la pièce en bronze.

Afin de diversifier nos résultats, nous avons contrôlé un échantillon en bronze, dont les caractéristiques électriques et magnétiques sont proches de l'aluminium.

L'image en couleur représente les trois défauts avec le fond en bleu, due à la forme conique du défaut.

Le choix de la fréquence nous permet de bien dimensionner correctement les défauts, parce qu'une bonne fréquence permet la bonne pénétration des courants de Foucault.

Les résultats sont reproduits par l'image en niveau de gris.

L'image en trois dimensions présente la forme des rainures.

II- 2 –pièces en acier :

- **Acier 31A008 :**

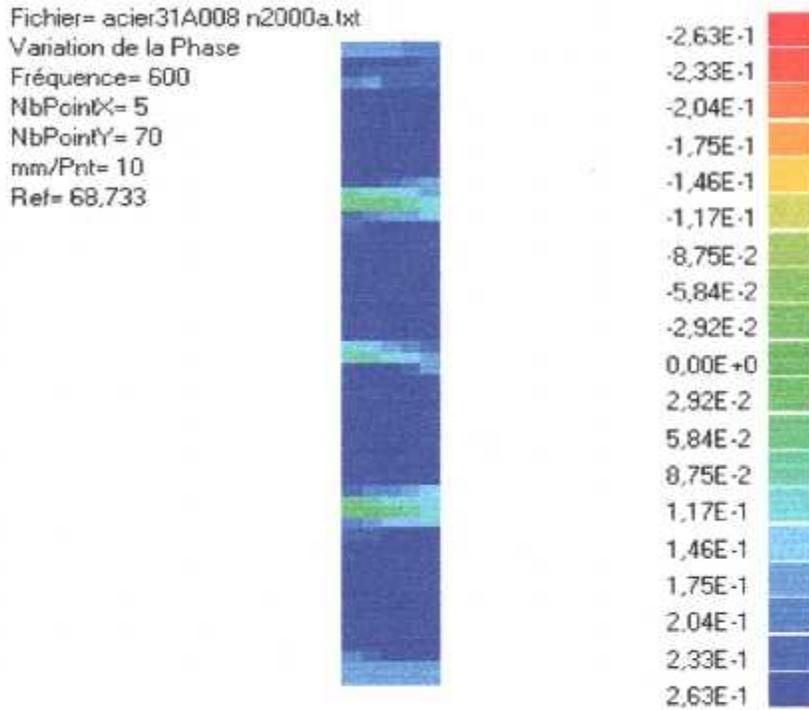


Image 2D couleur de la pièce en acier 31A008.

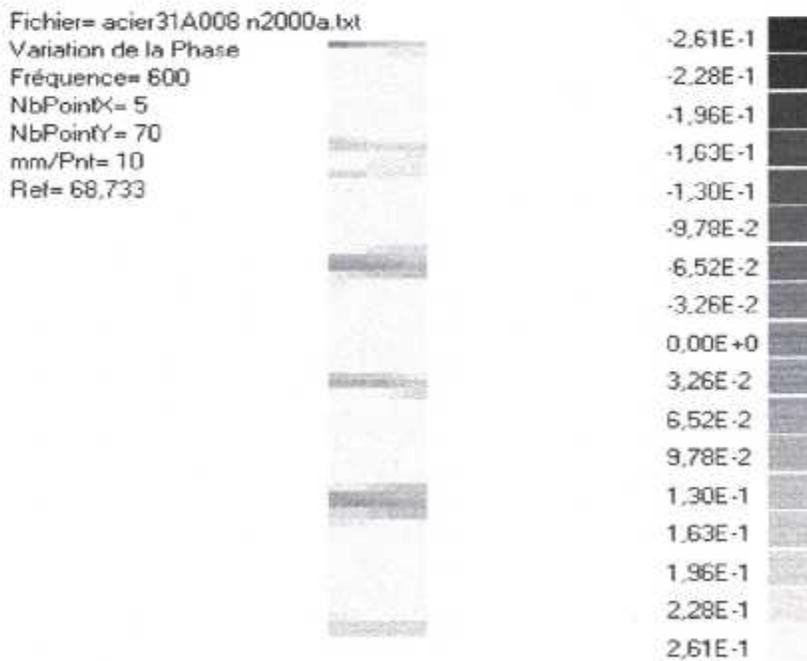


Image 2D en niveau de gris de la pièce en acier 31A008.

Fichier= acier31A008 n2000a.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 600
 NbPointX= 5
 NbPointY= 70
 mm/Pnt= 10
 Ref= 68,733

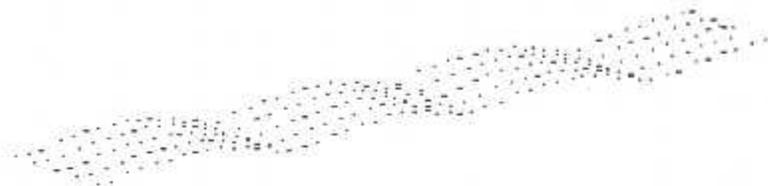


Image 3D de la pièce en acier 31A008.

- acier 29A028 :

Fichier= acier n20008.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 600
 NbPointX= 5
 NbPointY= 70
 mm/Pnt= 10
 Ref= 68,664

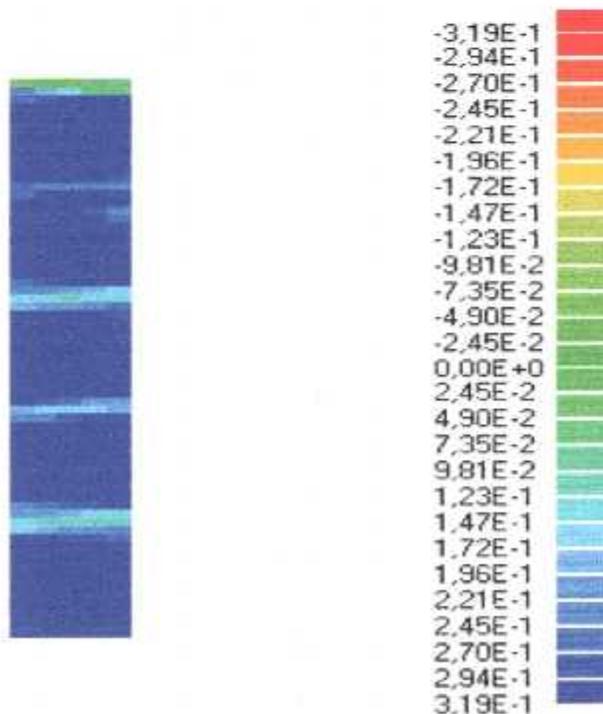


Image 2D couleur de la pièce en acier 29A028.

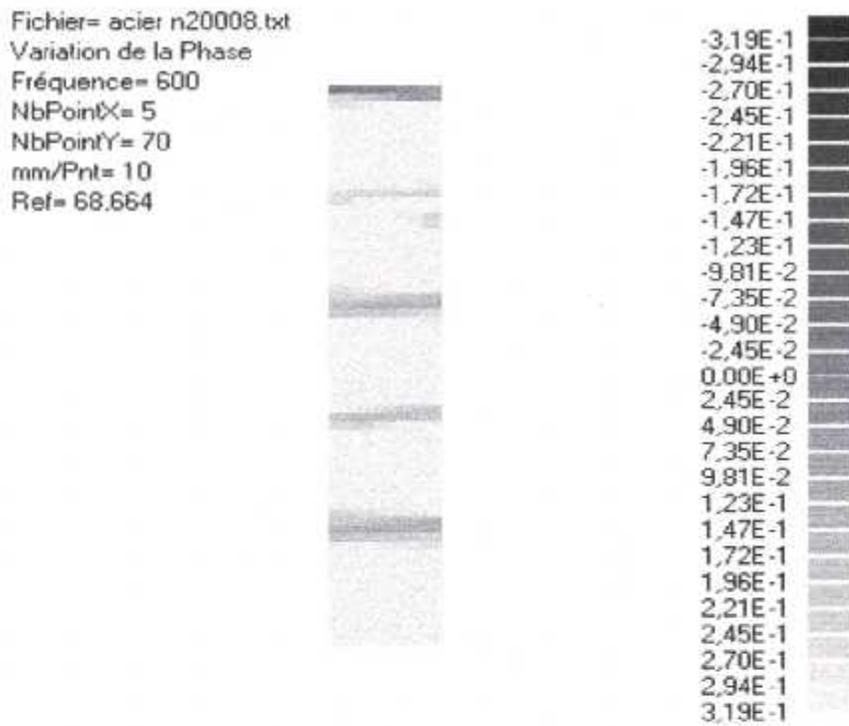


Image 2D en niveau de gris de la pièce en acier 29A028

Fichier= acier n20007.txt
 Variation de la Phase
 Fréquence= 600
 NbPointX= 5
 NbPointY= 70
 mm/Pnt= 10
 Ref= 69,085

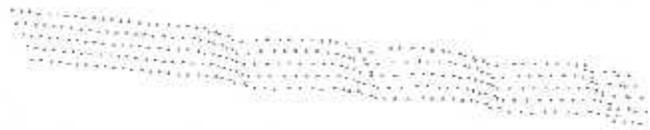


Image 3D de la pièce en acier 29A028

Pour l'acier, les trois défauts sont retracés et apparaissent bien sur l'image en couleur.

Les profondeurs des défauts dans ces échantillons sont respectivement de 1, 0.5 et 0.2 mm.

Le choix de la fréquence de 600 Hz est judicieux, car elle permet de détecter les défauts pour les deux échantillons.

L'image en niveau de gris, confirme les résultats cités ci-dessous.

Sur l'image en trois dimensions (3D) la forme des rainures est reproduite.

III- Conclusion générale:

Comme les courants de Foucault sont très sensibles, les pièces utilisées dans nos travaux présentent beaucoup de défauts de surface en particulier les sillons à cause de leurs utilisations excessives ce qui explique la variation des couleurs dans les différentes images.

L'analyse de l'image en trois dimensions permet l'évaluation dimensionnelle des défauts de façon bien déterminée. Le résultat est remarquable pour tous les échantillons.

L'image deux dimensions, permet de différencier entre les différentes structures.

Au fur et à mesure que les défauts sont plus profonds, on remarque dans les images en couleur, qu'on descend dans la palette des couleurs et qu'on atteint le maximum par rapport à la référence.

Si on compare entre les différents échantillons, nous remarquons que le contraste est plus clair dans les aciers.

La circulation des courants de Foucault dans les aciers est faible par rapport aux matériaux conducteurs non ferromagnétiques (dans notre cas : l'aluminium).

Conclusion générale.

Conclusion générale :

Dans ce travail nous avons étudié l'une des techniques du contrôle non destructif qui est le contrôle par courants de Foucault.

La circulation des courants de Foucault dépend de la nature du matériau (conductivité, perméabilité), de la forme et de la dimension des pièces et de la position du capteur par rapport à la pièce.

La synthèse de cette étude conduit aux conclusions générales suivantes :

La réalisation des sondes de contrôle par courants de Foucault a été satisfaisante à la vue des résultats de test et de contrôle d'échantillons.

La bonne définition des capteurs nous assure la bonne sensibilité aux défauts détectés.

Lors de la construction du palpeur, il faut qu'il ait un échange d'énergie optimale entre la sonde et le matériau à tester.

Pour la construction des sondes il faut tenir compte des paramètres suivants :

- Un palpeur magnétique doit être réalisé dans un matériau de forte perméabilité et de faible conductivité.

La forme conique de la sonde nous permet de conclure les résultats suivants :

- La sensibilité augmente.
- L'influence du champ latérale est minimisée de façon importante.

Le contrôle des échantillons étalons nous a permis de maîtriser la technique du contrôle non destructif par courant de Foucault surtout sur les matériaux résonnant dans l'industrie aéronautique.

L'utilisation d'un système semi automatique (système de déplacement et système de mesure) nous a permis de manipuler les paramètres Prépondérant dans cette technique.

Toute discontinuité dans le matériau (changements dimensionnels, variations de perméabilité et/ou de conductivité, présence de défauts, cette modification s'observera par la mesure de l'impédance de la bobine qu'est schématisée dans notre cas par une représentation cartographique des résultats en image deux dimensions, qui peut être en couleur ou en niveau de gris, cette représentation donne la nature du défaut, alors qu'une représentation en trois dimensions donne l'importance et les dimensions des défauts détectés.

Comme perspectives, il serait intéressant de continuer ce travail par :

- Amélioration des paramètres de sensibilité du capteur (blindage, lift of)
- Améliorer et automatiser la caractérisation des défauts, donc faciliter le diagnostic de l'opérateur.

Annexes .

Annexe I.

I. propriétés magnétiques des matériaux :

I.1 champ et induction magnétique :

Dans le vide, les grandeurs vectorielles champ d'induction magnétique et champ d'excitation magnétique sont liées par la perméabilité magnétique du vide μ_0 , dans une relation linéaire.

L'aimantation est aussi liée à l'induction par la susceptibilité magnétique du matériau dans une relation linéaire.

On observe une relation vectorielle linéaire entre l'induction et l'excitation : le coefficient de perméabilité absolue remplace la perméabilité du vide.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \dots \dots \dots 1$$

La perméabilité magnétique relative $\mu_r : \mu_r = 1 + \chi \dots \dots \dots 2$

La perméabilité magnétique absolue $\mu : \mu_0 \mu_r \dots \dots \dots 3$

La susceptibilité magnétique du matériau χ .

I.2. définition de la susceptibilité :

Toute substance placée dans un champ magnétique \vec{H} s'aimante, c'est-à-dire que chacun de ses éléments de volume acquiert un moment magnétique.

Donc il existe une relation approximativement linéaire entre l'aimantation M et le champ magnétique \vec{H} .

Si de plus le milieu considéré est isotrope, on aura la relation suivante : $M = \chi_m H$

Où χ_m est un constant scalaire sans dimension caractéristique du milieu appelée susceptibilité magnétique.

I-3-Définition de la conductivité électrique :

La conductivité est un paramètre qui caractérise la réponse d'un milieu matériel sous forme de courant électrique, à l'application d'un champ électrique macroscopique.

La loi d'ohm permet de définir cette conductivité σ d'un milieu part : $J = \sigma E$.

Le domaine de cette loi constitutive est vaste puisque la gamme des conductivités s'étend sur plus de vingt ordres de grandeur ($10^{-12} < \gamma < 10^8$ S/M).

Ce qui permet de classer les divers matériaux entre les très bons conducteurs (les métaux), semi-conducteurs, et les très mauvais conducteurs (les isolants).

I-4-Définition de la perméabilité magnétique :

Une relation entre l'aimantation \vec{M} et le champ magnétique \vec{H} implique également une relation linéaire entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} (non ferromagnétique), car chaque matière aimantée peut être décrite à l'aide de deux paramètres seulement qui sont l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} et c'est la perméabilité magnétique qui traduit cette liaison.

L'induction \vec{B} est donnée par la relation suivante :

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

Avec

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/M} : \text{Perméabilité du vide}$$

$$\vec{M} = X_m \vec{H}$$

D' OÙ

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

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + X_m)$$

On définit alors la perméabilité relative μ_r (dimension)

$$\mu_r = 1 + X_m$$

et la perméabilité absolue μ :

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

on aura alors :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

II. Classification des substances magnétiques :

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.

On distingue :

II-1-Paramagnétisme :

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité magnétique faible et positive, elle dépend de la température selon une loi de Curie :

$$\chi_m = C/T.$$

Donc la saturation ne peut être observée qu'à très basse température et à l'aide de champ magnétique intense.

On les trouve parmis de grands nombres de métaux tels que : platine, aluminium, magnésium, titane, tungstène, palladium,.....

II-2-Diamagnétisme :

Le diamagnétisme trouve son origine dans le phénomène d'induction, il est caractérisé par une susceptibilité magnétique négative très faible, il s'en distingue également par le fait qu'il est pratiquement indépendant de la température.

On les trouve dans tous les métalloïdes autres que l'oxygène et parmi de grands nombres de métaux telle que l'or, argent, bismuth, cuivre, mercure, plomb,

II-3-Ferromagnétisme :

Ce type de magnétisme se caractérise par des relations non linéaires entre \vec{H} et \vec{M} , ce qui implique qu'il a une susceptibilité positive et une amplitude importante.

Un matériau ferromagnétique peut faire apparaître une induction très importante.

Pour de faibles valeurs du champ d'excitation \vec{H} jusqu'à ce qu'il atteigne une limite appelée aimantation de saturation.

Parmi elles on trouve le fer, le nickel, le gadolinium,

D'après la figure suivante, on remarque que le diamagnétisme est un phénomène généralement masqué par le paramagnétisme et à fortiori par le ferromagnétisme.

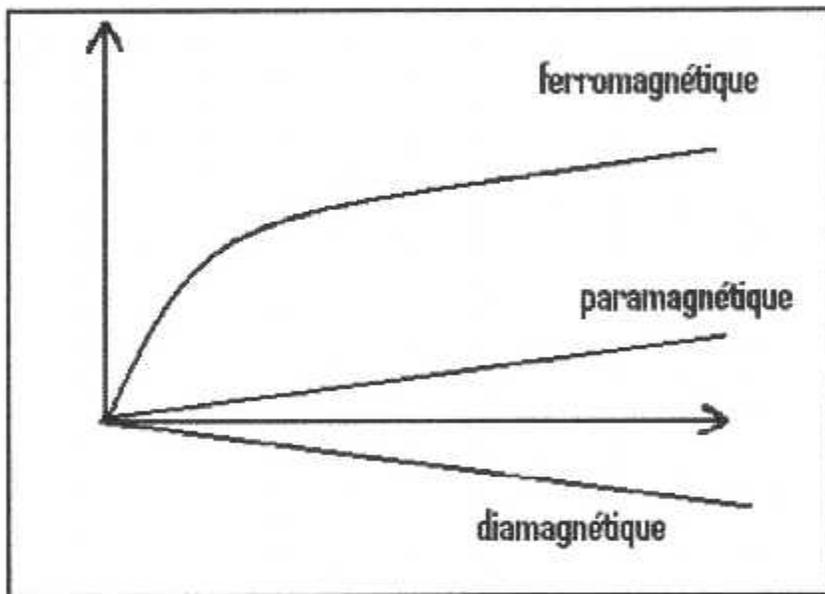


Figure A-1 : courbe d'aimantation

II-4 Courbe de première aimantation :

Le matériau est initialement démagnétisé. On se fait progressivement croître le champ d'excitation dans la quel est prolongé le matériau. La courbe de la figure (A-2) représente l'induction B . On distingue trois zones :

- la première : droite linéaire.
- La seconde : courbe de saturation.
- La dernière : zone de saturation.

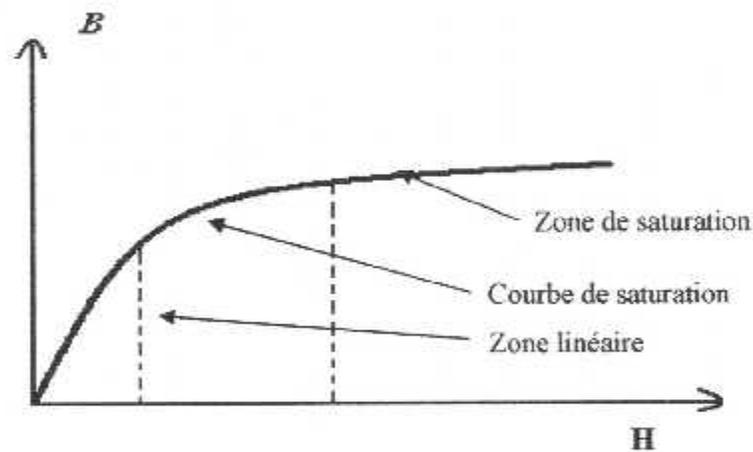


Figure A-2 : courbe de première aimantation.

III- le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif est utilisé dans divers domaines de l'industrie.

Il ne cesse de se développer pour toucher les domaines les plus avancés des techniques modernes. Son but est de déceler dans une pièce le plus souvent métallique et en respectant son intégrité, toute particularité de sa structure pouvant avoir une influence sur son comportement en service, et s'assurer qu'elle ne présente ni défauts de fabrication, ni de endommagement lors du fonctionnement.

III-1 les différents techniques de contrôle non destructif :

- **L'examen visuel**

C'est une ancienne méthode. Cette procédure très simple fait toutefois appel à une véritable expertise et à un sens aigu de l'observation des agents qui la pratiquent.

- **Le ressuage:**

Cette technique, consiste à pulvériser un liquide pénétrant à la surface préalablement nettoyée de la pièce à contrôler, et appliquer ensuite un révélateur sur la surface, afin de visualiser toutes discontinuités.

Cette technique ne permet de détecter que les défauts en surface et ne fournit pas leur degré de gravité.

- **Magnétoscopie :**

Le principe de cette technique repose sur le fait que dans une pièce ferromagnétique aimantée, toute anomalie de structure provoque une distorsion des lignes d'induction. Si le défaut est situé au voisinage de la surface, la perturbation engendrée peut être décelée à l'aide de fines particules magnétiques qui s'accumulent à l'aplomb du défaut.

Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques.

- **Ultrasons :**

Dans une pièce sans défaut, pouvant être assimilé à un milieu homogène, les ondes ultrasonores se propagent à une vitesse constante dépendant du milieu, mais se réfléchissent sur toute discontinuité rencontrée. Par analyse des échos reçus, l'anomalie est localisée dans l'espace.

Dans la pratique, l'onde ultrasonore est émise par un élément piézo-électrique, sous forme d'impulsions de quelques microsecondes.

Dans tous les cas, ce type de contrôle nécessite un couplage acoustique entre la sonde et la pièce du fait que l'onde ultrasonore se propage mal dans l'air et la pièce forme une seule couche de métal.

Et les courants de Foucault.

IV- Les équations de maxwell :

IV-1- étude théorique :

Pour déterminer la variation d'impédance d'une bobine magnétique par C-F, on doit connaître le champ magnétique, leur propagation et la répartition des courants de Foucault dans le matériau.

L'équation de MAXWELL permet la détermination des équations de propagation des ondes magnétiques et leurs variations en fonction des paramètres caractérisant la structure métallurgique du matériau.

IV-2-Equations de MAXWELL :

Des physiciens ont établi que le champ électrique et l'induction magnétique sont liés l'un à l'autre et que quatre équations permettent d'exprimer complètement les interactions électromagnétiques, ce sont les équations de MAXWELL :

$$\begin{array}{ll} \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} & B = \mu H \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 & \text{Avec} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{j} = \sigma \vec{E} \end{array}$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots\dots\dots(4-1)$$

⇒

$$\text{div } \vec{D} = \rho \dots\dots\dots(4-2)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (4-3)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (4-4)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots(4-5)$$

\vec{E} , \vec{D} : champ et induction électrique.

\vec{H} , \vec{B} : Champ et induction magnétique.

μ , ϵ : permittivité électrique, perméabilité magnétique.

σ : conductivité électrique.

ρ , \vec{j} : charge volumique, courant volumique.

Le matériau étant parfait, alors μ , ϵ , σ sont des constantes, le milieu étant conducteur, la charge volumique est nulle et le courant de déplacement est très petit devant le courant de conduction.

• (5-1): cette loi exprime que le flux d'induction électrique à travers une surface fermée est proportionnelle à la charge contenue à l'intérieur de la surface.

• (5-2) : cette loi exprime que le flux d'induction magnétique à travers une surface fermée est toujours nulle. La raison en est qu'expérimentalement, on n'a jamais découvert de charge magnétique isolée.

Il n'existe pas de 'monopole' mais seulement de paires de pôles inséparables, les lignes de forces se renferment toujours sur elles-mêmes.

- (5-3) : c'est la loi de l'induction, elle exprime que la différence de potentiel aux bornes d'un circuit vaut les opposés de la variation de l'induction magnétique qui traverse le circuit et elle lie la circulation du champ électrique le long d'un circuit fermé à la variation de flux magnétique qui traverse ce circuit.

- (5-4) : cette loi dépend de M_3 , elle lie la circulation du champ magnétique le long d'un circuit fermé à la variation de flux du courant de déplacement et au courant de conduction.

$$\rho = 0 \text{ et } \frac{\partial D}{\partial t} \ll J \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

Donc $\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{H} = \overrightarrow{j} \quad \dots\dots\dots(4-7)$

$$\overrightarrow{B} = \mu \cdot \overrightarrow{H} \Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{B} = \mu \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{H} \quad \dots\dots\dots(4-8)$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{B} = \mu \overrightarrow{j} \quad \dots\dots\dots(4-9)$$

Or $\overrightarrow{j} = \sigma \overrightarrow{E}$

Donc $\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{B} = \mu \sigma \overrightarrow{E} \quad \dots\dots\dots(4-10)$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{B} = -\mu \sigma \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(4-11)$$

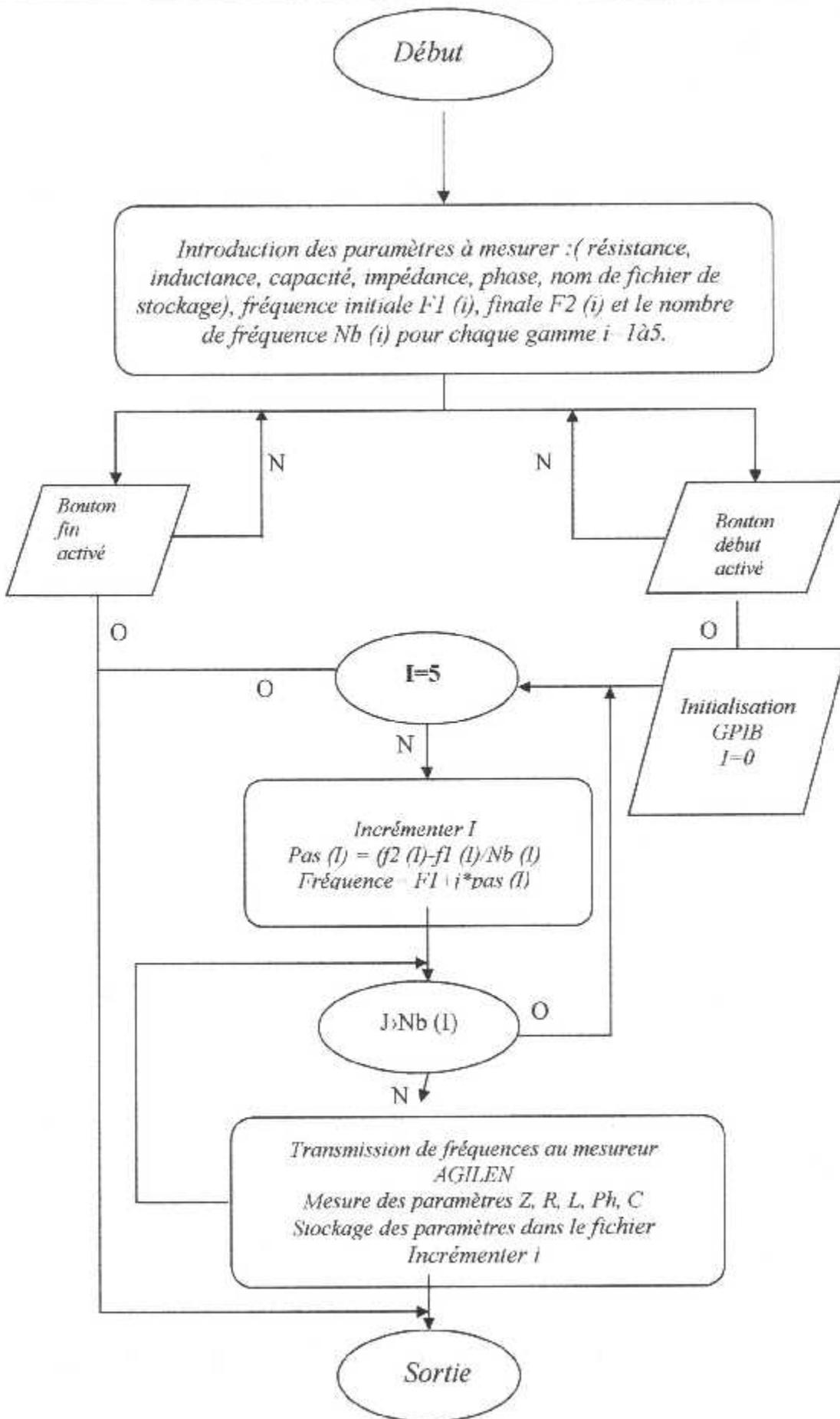
Sachant que : $\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{B} = \overrightarrow{\text{grad}} \text{div} \overrightarrow{B} - \Delta \overrightarrow{B}$ avec $\text{div} \overrightarrow{B} = 0$

$$\Delta \overrightarrow{B} = \mu \sigma \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(4-12)$$

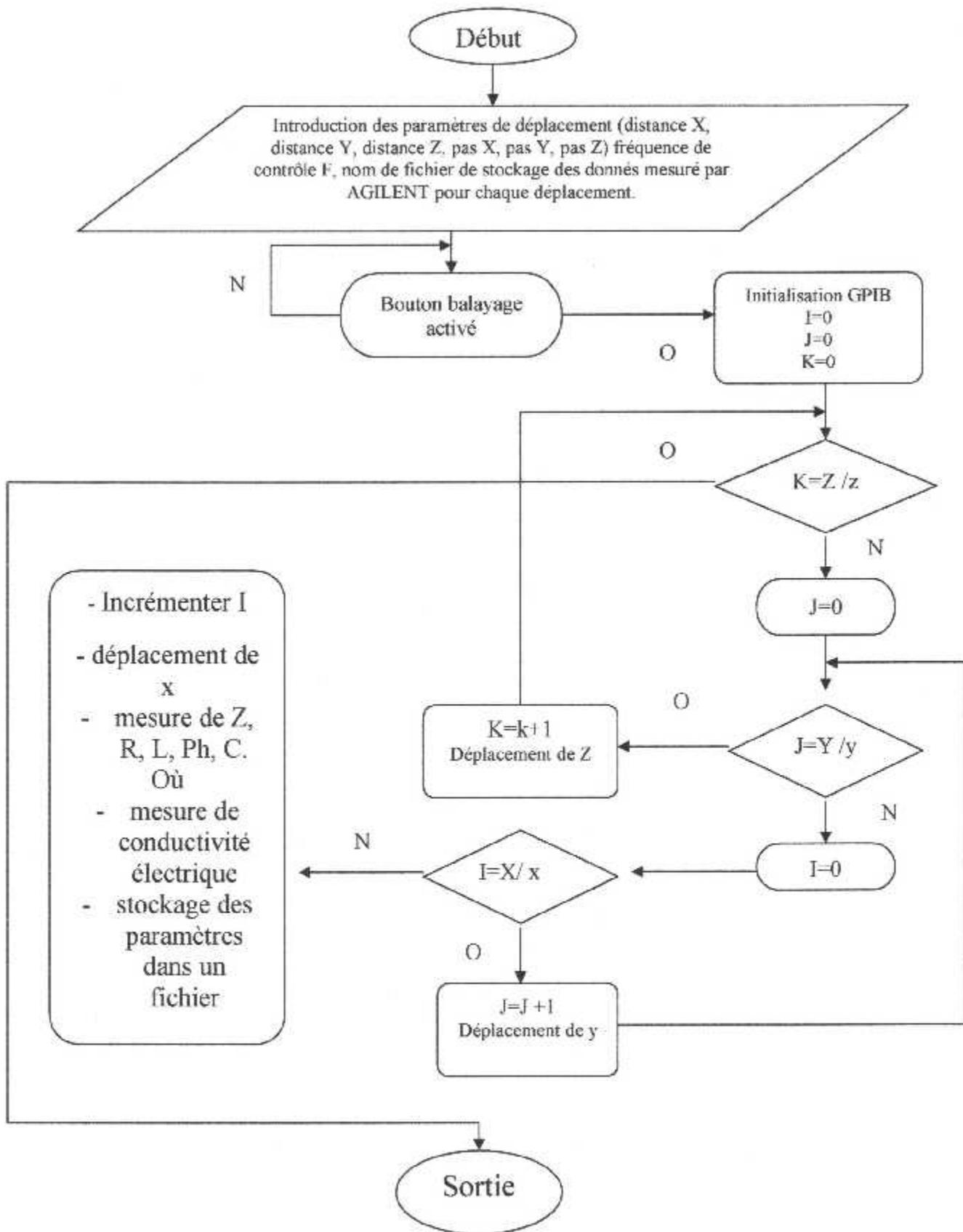
On peut avoir maintenant la densité de courant J :

$$\overrightarrow{j} = \overrightarrow{\text{rot}} \frac{\overrightarrow{B}}{\mu} \quad \dots\dots\dots(4-13)$$

Annexe II.



Organigramme A-1 : système de mesureur d'impédance de la sonde.



Organigramme A-2 : système de déplacement

Bibliographie

Bibliographie.

- [1] **CHEMIN, GUILLAUD, JAY, PALETTO, PERDRIX ROSIER, TOITO**, « contrôle non destructif », niveau II et niveau III, ingénieurs Ed. Cast.
- [2] **M.ZERGOUG**, « caractérisation non destructive par courants de Foucault de couches de rechargement et de revêtement dans les matériaux conducteurs », communication au first arabe mechanics congrès, CAM 97, June 1997, DAMAS, Syric.
- [3] **M.ZERGOUG, A.HAMMOUDA, and all**, “conductivity simulation for material characterisation by eddy current”, 3rd International conference on NDE to structural integrity for nuclear and pressurised components, 14-16 November 2001 – sevite - espagne.
- [4] **ELIE BORIDY**, Electromagnétique, théorie et applications.
Ed, BORNAND
- [5] **M.ZERGOUG, and all**, réalisation des sondes et caractérisation non destructive par courants de Foucault de couches de rechargement et de revêtement dans les matériaux conducteurs.
Conférence maghrébine sur le contrôle non destructif (COM CND 97), Juin 1997, Alger, Algérie, PP 386 – 393.
- [6] **Non destructive testing handbook Electromagnetic testing Eddy current, Flux Leakage and microwave Non-destructive testing Volume 4, Second edition**
Published by the American society for non destructive testing.

- [7] **HUGU L. HUGO, ROBERT E.** Introduction to electromagnetic non destructive test methods. Krieger Publishing company Huntington, -New York, 1977.
- [8] **FAGET, J.** “ Electromagnétisme- relativité restreinte”, Cours de physique, Vuibert, 1971.
- [9] **M.ZERGOUG,** le contrôle par courants de Foucault (cours).
- [10] **S.MEBREK,** Etude et réalisation d'un logiciel de caractérisation et de reconstitution d'images pour le contrôle non destructif par courants de Foucault.
- [11] **A. HADDAD,** conception et analyse d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault pulsés.
- [12] **H. BOUDJELLAL,** Evaluation des structures aéronautique par courants de Foucault
- [13] **A. HAMMOUDA,** approche physique dans la détermination de caractéristiques des matériaux en contrôle non destructif par courants de foucault.