

UNIVERSITE DE SAAD DAHLED DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Aéronautique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Aéronautique

UTILISATION D'OUTILS DE TRAITEMENT DU SIGNAL DANS LE DIMENSIONNEMENT DES DEFAUTS

Par

BOUCHEROU Nacer

Devant le jury composé de :

Mr S. BOUKRAA	Professeur, USDB	Président
Mr M. BOUABDALLAH	Professeur ENP	Examineur
Mr A. BRAHIMI	Chargé de cours USDB	Examineur
Mr M. ZERGOUG	Maître de Recherche CSC	Rapporteur

Blida, Juin 2009

Résumé

L'application des courants de Foucault pulsé (CFP) dans l'industrie est très demandée par rapport aux courants de Foucault conventionnelle, la technique est utilisée dans la détection des défauts en particulier la détection des corrosions.

Les informations contenues dans le signal peuvent nous déterminer plusieurs caractéristiques des matériaux.

Les résultats obtenus expliquent la relation entre les CFP et les caractéristiques électromagnétiques dans le contrôle.

Dans ce cadre, la recherche s'oriente vers la facilité de l'interprétation des résultats par l'opérateur et minimisé les erreurs.

Nous allons évaluer et déterminer les performances de cette technique dans la détection et la caractérisation des matériaux.

Nous avons étudié la sensibilité des CFP dans la détermination de plusieurs paramètres et la détection des défauts de surface, comme on a montré que la détection des défauts en multicouches (première ;deuxième et troisième couche) et possible.

L'originalité de ce travail réside dans la caractérisation des matériaux par les CFP dont le changement de structure et démontré.

ملخص

هناك طرق كثيرة لمراقبة و فحص العيوب التي يمكنها أن تسببا خطرا على مستوى الهياكل و القطع المعدنية و لدقة التشققات و صعوبة ملاحظها بالعين المجردة لقد قمنا بتطبيق إحدى طرق المراقبة غير مدمرة على بعض القطع، ففحصنا هذا كان عن طريق لتمعنط بواسطة بعض الكواشف حتى نتمكن من ملاحظة مدى فعالية هذه الطريقة التي تكشف عيوب القطع و الحد الأقصى لعمق التشقق.

إن مشروعنا هذا يندرج في إطار المراقبة الغير إتلافية و تفتيش عن العيوب الموجودة في المواد الناقلة بواسطة تيارات فوكالت و قد قمنا بتطبيق تقنية جديدة متمثلة في تقنية المراقبة غير التدميرية بطريقة فوكالت النابضة

ABSTRACT

The Pulsed eddy current (PEC) application in the industrial domain is very weak compared to conventional eddy current. Its use in detection of the defects, particularly in the determination of corrossions .The contained information in the received signal makes it possible to determine several parameters with an aim of analyzing material. The results obtained explain the behaviour of the Pulsed Eddy Currents and their influences in various electromagnetic parameters on the inspection. For this purpose, the research tasks evolve/move in the direction to facilitate interpretation with the operator and minimize the risk of error. We will evaluate the aptitudes and the performances of this technique in the determination of the characteristics materials in particular. Also we have studied the sensitivity of the defects and other parameters in the inspection by the pulsed method and we have showed the detection of the defects into the second and third layers. The originality of this work consists of the material evaluation. The applied NDT PEC methods can characterize microstructure types, micro structural changes, hardness changes. The objective of our work is to detect some metallurgic characteristics by non-destructive methods. The characterization of the structure modifications by PEC allows detecting mechanical and metallurgical parameters of materials.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	10
1. CONTROLE PAR COURANTS DE FOUCAULT	12
1.1 Principe des courants de Foucault classiques.....	12
1.2 Courants de Foucault pulsés	15
1.2.1 Modèle de John Bowler et Marcus Johnson	15
1.2.2 Modèle de B.HALBCH	20
1.2.3 Modèle de calcul d'impédance de la bobine	22
2. 2. TRAITEMENT DU SIGNAL.....	24
2.1 Transformée de fourrier Généralités.....	24
2.2 TRANSFORMATION DE FOURIER RAPIDE.....	25
2.3 Fonctions de corrélation	26
Propriétés de symétrie	26
Distributivité	26
3. 3. RAPPELS SUR LES MATERIAUX	28
3.1 Aluminium.....	28
3.1.1 La légèreté	28
3.1.2 La conductivité électrique.....	29
3.1.3 La tenue à la corrosion.....	29
3.1.4 L'aptitude aux traitements de surface	29
3.1.5 Propriétés de certains Alliages d'aluminium.....	29
3.2 ACIER 16NC6	33
3.2.1 La cémentation	33
4. 4. APPROCHE EXPERIMENTALE.....	37
4.1 Procédure de contrôle expérimentale.....	37
4.2 Système du contrôle par Courants de Foucault Pulsé.....	38
4.3 Résultats et interprétation.....	41
4.3.1 Application du traitement du signal dans contrôle par les CFP	42
4.3.2 Etude de la répétitivité des résultats	43
4.3.3 Etude de l'effet d'éloignement-(distance entre la sonde et la pièce (lift-off)).	44
4.3.4 Détection des défauts	45
4.3.5 Contrôle des rainures en multicouches	48

4.3.6 Caractérisation des matériaux.	56
5. CONCLUSION	66
6. APPENDICE A : LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	69
7. APPENDICE B : B. Organigramme de programmation.....	71
8. REFERENCES	75

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1-1: Principe général des Courants de Foucault	13
Figure 1-2: Modification des courants de Foucault par un défaut.....	13
Figure 1-3: Distribution des courants de Foucault et de l'induction en fonction de la profondeur de pénétration	15
Figure 1-4: Modèle de John Bowler et Marcus Johnson	16
Figure 1-5: Courant d'excitation et la tension induite	17
Figure 1-6: Analogie électrique d'un matériau à contrôlé simulant à une bobine ...	22
Figure 3-1: Les étapes de la cémentation	34
Figure 3-2: Filiation de microduretés	36
Figure 4-1: Echantillons pour l'étude de la variation de la conductivité électrique et la perméabilité magnétique	38
Figure 4-2: Défauts sous formes de rainures	38
Figure 4-3: Chaîne de contrôle par courant de Foucault pulsé	39
Figure 4-4: premier système de génération des CFP	40
Figure 4-5: Deuxième système de génération des CFP	41
Figure 4-6: logiciel de commande de l'oscilloscope et de la table de déplacement	41
Figure 4-7: Signal CFP	42
Figure 4-8: FFT des deux signaux CFP	43
Figure 4-9: Signal CFP obtenue pour des différents matériaux.....	43
Figure 4-10: CFP pour des différentes distances sonde-pièce	44
Figure 4-11: Variation de l'amplitude en fonction de la distance sonde-pièce.....	44
Figure 4-12: Variation de la FFT en fonction de la distance sonde-pièce.	45
Figure 4-13: Pièce présentant épaisseur d'arrachement de la matière	45

Figure 4-14:Signal CFP obtenue pour différents épaisseurs d'arrachement de la matière	46
Figure 4-15:Défauts sous forme de rainure de profondeurs différentes	46
Figure 4-16:CFP sur les défauts	47
Figure 4-17:Maximum des CFP sur défauts.....	47
Figure 4-18:Echantillon 1, défaut réalisé sur une tôle d'aluminium.	48
Figure 4-19: Signaux CFP obtenu sur l'échantillon1	48
Figure 4-20:Représentation de la rainure en 2D	49
Figure 4-21:Représentation de la rainure en 3D	49
Figure 4-22:Image du défaut avec un seuillage	49
Figure 4-23:Echantillon 2, ajout d'une tôle d'aluminium	50
Figure 4-24:CFP sur l'échantillon 2	50
Figure 4-25:Représentation en deux dimensions du défaut en deuxième couches	51
Figure 4-26:Echantillon 3, ajout de deux tôles d'aluminium.	51
Figure 4-27:Signal CFP obtenue sur l'échantillon 3.	52
Figure 4-28:Représentation en deux dimensions du défaut de l'échantillon 3	52
Figure 4-29:CFP dans le cas d'un ajout de tôles sans défauts	53
Figure 4-30: CFP dans le cas d'un ajout de tôles avec défaut	53
Figure 4-31:défauts en multicouches	54
Figure 4-32:Maximum des CFP en fonction de position des défauts	54
Figure 4-33:Un isolant sur une pièce d'aluminium	55
Figure 4-34:La réponse des CFP	55
Figure 4-35:Un isolant entre deux pièces d'aluminium.....	56
Figure 4-36:Réponse des CFP	56
Figure 4-37:Etude de la variation de la conductivité électrique	57
Figure 4-38:Etude de la variation de la conductivité électrique (Aluminium 7075, Cuivre, Aluminium 1200et NIAG)	58
Figure 4-39:Signal CFP trie des différentes nuances	58
Figure 4-40: Trie des différentes nuances.....	59
Figure 4-41:Signal CFP sur les différentes. Pièces cémentées	60
Figure 4-42:La FFT du signal CFP sur les différentes.....	60
Figure 4-43:La variations de la FFT en fonction de la dureté.....	60
Figure 4-44:La variations de la FFT en fonction de l'épaisseur de cémentation ...	61

Figure 4-45:La variation de CFP et de la microdureté des pièces refroidies à aire non corrodées	62
Figure 4-46:La variation de CFP et de la microdureté des pièces trempées non corrodées	63
Figure 4-47:La variation de CFP et de la microdureté des pièces refroidies à air corrodées	63
Figure 4-48:La variation de CFP et de la microdureté des pièces trempées corrodées	63
Figure 4-49:variation de la FFT de signal CFP et de la microdureté des pièces refroidies à aire non corrodées.....	64
Figure 4-50:variation de la FFT de signal CFP et de la microdureté des pièces trempées non corrodées	64
Figure 4-51:variation de la FFT de signal CFP et de la micro-dureté des pièces corrodées refroidies à aire.....	64
Figure 4-52:variation de la FFT de signal CFP et de la micro-dureté des pièces corrodées trempées	65

INTRODUCTION

Dans la plupart des domaines de la technologie moderne, les perfectionnements dans le rendement et la rentabilité des systèmes sont souvent limités par les propriétés des matériaux disponibles. Une connaissance de leurs propriétés macroscopiques permet dans une certaine mesure une utilisation plus rationnelle de ceux-ci. Toute fois, il faut nécessairement relier les propriétés macroscopiques à la structure élémentaire de la matière. Ceci est d'autant plus utile lorsque pour des raisons économiques, on désire pousser les matériaux à la limite de leurs possibilités d'utilisation, ce qui est de plus en plus fréquent à l'heure actuelle.

Le développement des matériaux reste freiné par la sensibilité des propriétés finales au bon déroulement du traitement thermique. Les exigences de qualité de l'industrie moderne requièrent donc le développement d'outils de caractérisation non destructive de l'état final du produit afin de garantir ses propriétés à l'utilisateur.

Les techniques de contrôle non destructif sont souvent utilisées pour inspecter les structures aérospatiales durant les périodes de révision d'entretien, et pour détecter les dommages occasionnés en service. De telles inspections peuvent être employées pour détecter des criques de fatigue et indiquer aussi l'ampleur des dommages de corrosion.

La méthode conventionnelle des courants de Foucault aboutit à des résultats importants. L'inconvénient majeur est que la détection ne dépasse pas les 2mm de profondeur. L'utilisation des courants de Foucault pulsés a été longtemps au stade expérimentale, elle a été appliquée dans des secteurs spécialisés (l'industrie d'énergie nucléaire, aéronautique...). Cependant,

l'amélioration significative dans cette direction a eu lieu tout récemment grâce aux progrès technologiques.

La technique des courants de Foucault pulsés est une méthode appropriée pour l'évaluation des structures en multicouche, elle permet de diagnostiquer différentes couches qu'elles soient collées mécaniquement ou empilées en plusieurs couches adhésives.

Le signal des courants de Foucault pulsé est affecté par les anomalies présentes dans le matériau à contrôler ou le changement de ces propriétés physiques. L'analyse et le traitement de ces signaux par des outils récents et des modèles spécifiques est nécessaire pour extraire les informations recherchées.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche ayant comme objectif le développer de cette technique à des fins de contrôle et d'évaluation non destructive des matériaux. Le travail est décrit dans notre manuscrit en 5 chapitres essentiels.

Le chapitre (I) présente les techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault classique et pulsé à savoir les chaînes de mesure, les paramètres et les conditions exigées par ces techniques. Il montre aussi l'influence et l'importance de la conductivité électrique dans la caractérisation des matériaux et la reconnaissance de défauts.

Le chapitre (II) décrit les outils de traitement du signal utilisé dans notre étude pour améliorer la qualité du signal et extraire les informations désirées.

Le chapitre (III), définit certaines propriétés des alliages d'aluminium en particulier la série 7000 et l'acier 16NC6 utilisé dans notre étude.

Dans le chapitre (IV) nous allons donner les différents résultats obtenus avec une comparaison avec les méthodes destructives et les perspectives de cette méthode pour une plus large utilisation dans le contrôle non destructif.

Finalement, nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

CONTROLE PAR COURANTS DE FOUCAULT

1.1 Principe des courants de Foucault classiques

Parmi les différentes méthodes de contrôle non destructif des matériaux conducteurs, les courants de Foucault (CF) [1] connaissent un développement important et ne nécessite pas de contact entre la pièce et le system de mesure.

Considérons une pièce conductrice placé dans l'induction magnétique crée par un bobinage parcouru par un courant sinusoïdal. Le flux induit dans le matériau est également une fonction sinusoïdale, qui génère des courants appelés Courants de Foucault Figure (1.1).

La répartition des courants de Foucault va dépendre de la nature du matériau (conductivité, perméabilité), de la forme et de la dimension des pièces, de la position relative de la pièce par rapport au capteur (bobinage) et des caractéristiques du courant inducteur (intensité, fréquence).

Toute discontinuité dans le matériau (changements dimensionnels, variations de perméabilité et/ou de conductivité, présence de défauts tels que fissures, piqûres, arrachements, etc ... qui se présente devant le capteur, modifie le parcours ou l'intensité des courants de Foucault (figure 1.2)

Cette modification s'observera soit par la mesure du flux résultant dans la bobine d'excitation, ce qui revient à mesurer sa variation d'impédance, soit par la mesure de la force électromotrice (f.e.m.) induite dans une seconde bobine de détection placée dans l'induction créée par la bobine excitatrice.

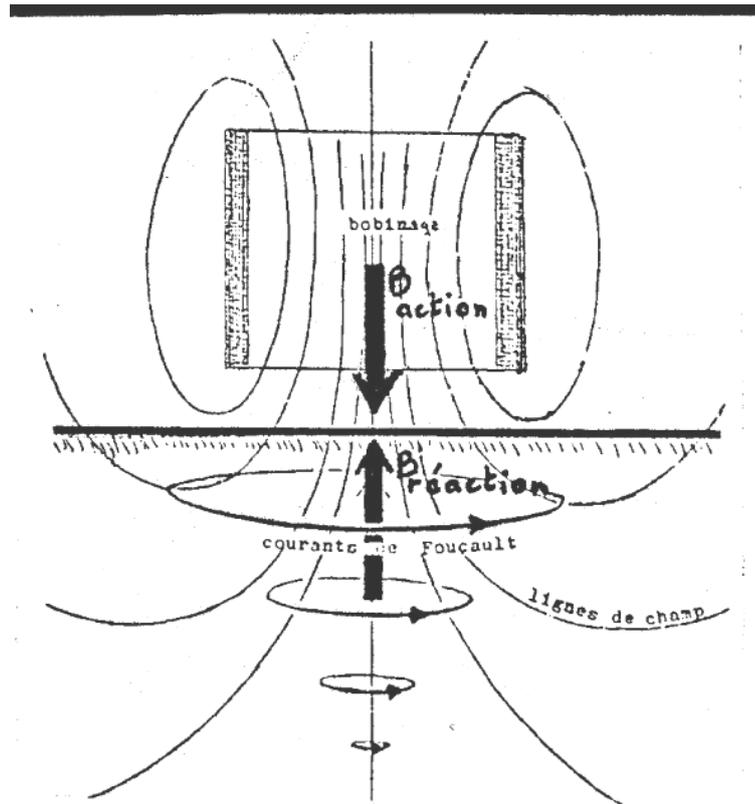


Figure 2-1: Principe général des Courants de Foucault

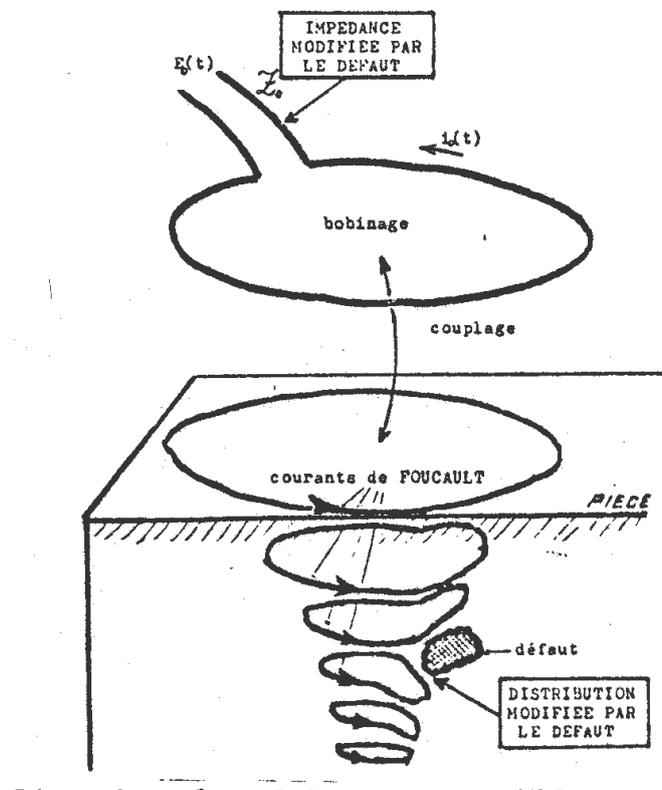


Figure 2-2: Modification des courants de Foucault par un défaut

La répartition des courants de Foucault est sous la forme [2] :

$$J = J_0 e^{-\frac{k}{\sqrt{2}}x} \cos(2\pi ft - \frac{k}{\sqrt{2}}x + \frac{\pi}{4}) \dots \dots \dots (1.1)$$

avec $k = \sqrt{2\pi f \mu \sigma}$

Ou:

J: Amplitude des courants a une profondeur x.

J₀: Amplitude des courants a la surface.

La profondeur de pénétration standard

L'intensité des courants de Foucault diminue en exponentiel avec la pénétration (figure 1.3). On appelle profondeur de pénétration standard la profondeur pour laquelle l'amplitude du courant diminue d'un rapport (1/e) et elle est donner par :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \dots \dots \dots (1.2)$$

En remplaçant $\mu = \mu_0 \mu_r$ avec $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{f \sigma \mu_r}} \dots \dots \dots (1.3)$$

Où:

δ : Profondeur standard (mètre m)

f : Fréquence de contrôle (Hz)

μ_r: Perméabilité relative (sans unité)

σ: Conductivité (siemens/mètre s/m)

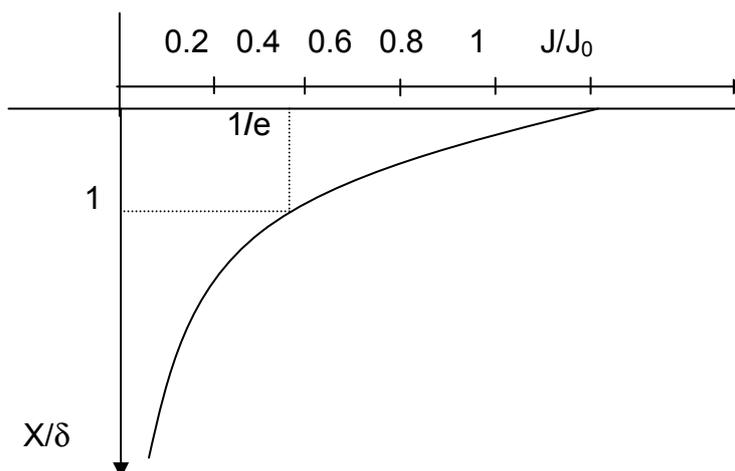


Figure 2-3: Distribution des courants de Foucault et de l'induction en fonction de la profondeur de pénétration

1.2 Courants de Foucault pulsés

La technique de contrôle par courants de Foucault pulsés (CFP) est une nouvelle méthode d'inspection et d'identification de la corrosion en multicouches utilisée dans le CND. Aussi bien que des mesures d'épaisseur et de conductivité des collages des tôles conducteurs. Cette méthode de contrôle par courants de Foucault basée sur le principe de l'induction électromagnétique utilise un équipement simple et relativement peu coûteux. Les défauts présentent alors des changements de courant d'induction. Les courants de Foucault pulsée peuvent pénétrer profondément dans la pièce, même si celle-ci est en plusieurs couches non mécaniquement collées. C'est l'avantage le plus important par rapport à la méthode de contrôle par Ultrason qui exige un contact mécanique entre les couches. La méthode de contrôle par les courants de Foucault pulsée permet de détecter la perte en métal dans une structure en multicouche.

1.2.1 Modèle de John Bowler et Marcus Johnson

John Bowler et Marcus Johnson [3] ont proposé un model représenté par la figure (1.4). L'excitation est réalisée par un train d'impulsion de 12 V d'amplitude et une fréquence qui varie entre 1KHz et 100 KHz.

La variation des courants dans la sonde d'excitation qui est perpendiculaire à une

surface plane est donnée par la formule : $I(t) = I_0(1 - e^{(-t/\tau_0)})u(t)$(1.4)

Avec τ_0 le coefficient de décroissance de l'impulsion $u(t)$.

Cette variation est due à un courant induit crée par le changement du champ d'excitation. Ce courant va atteindre une valeur maximale dans un premier temps puis il tend vers zéro (figure (1.4)), cette décroissance est due à la dissipation de son énergie et que le champ d'excitation tend vers son état d'équilibre.

En mesurons le signal au borne de notre sonde de réception on peut déduire plusieurs caractéristiques de notre matériaux.

Le circuit équivalent idéal de notre système (figure (1.4)) est applicable dans le cas ou la sonde est dans l'air.

Avec:

- V_s : la tension d'excitation déterminant l'amplitude du courant dans la sonde.
- τ_0 Le coefficient de décroissance est déterminé par le filtre du premier ordre RC.
- Un amplificateur qui assure une amplification du courant et une adaptation d'impédance.

Si la valeur de la résistance R est négligeable, le courant d'excitation et la tension induite varie comme il est indiqué dans la figure (1.5)

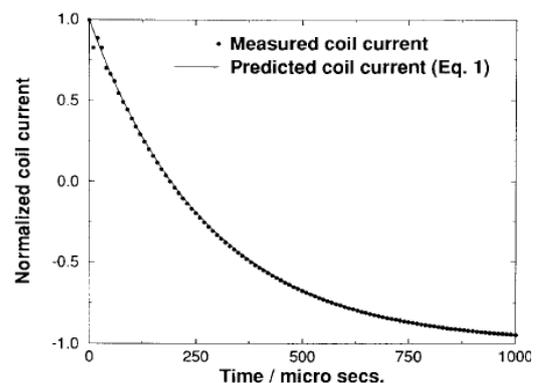
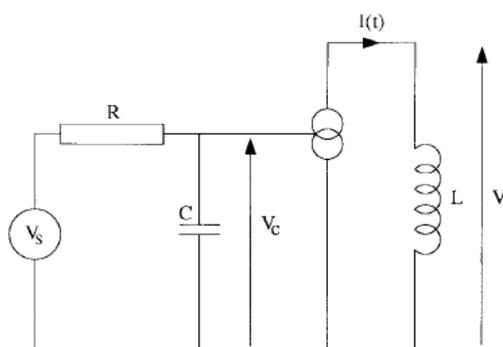


Figure 2-4:Modèle de John Bowler et Marcus Johnson [3]

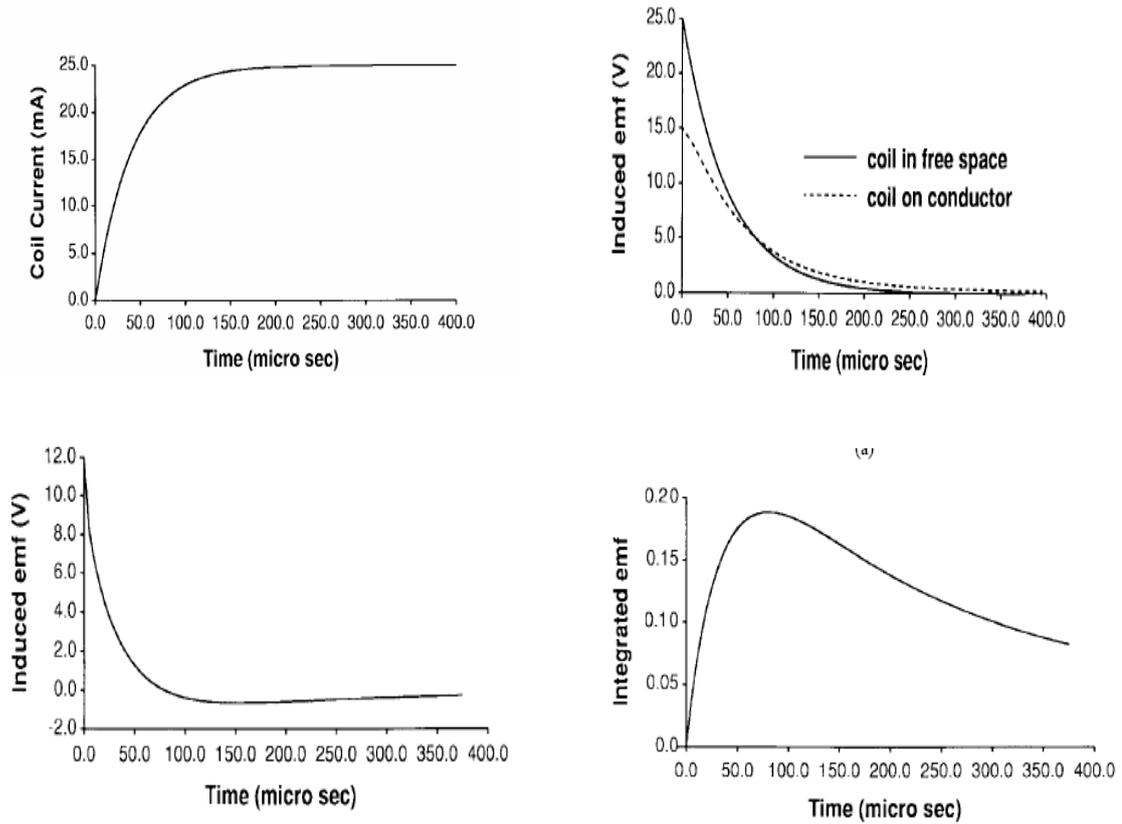


Figure 2-5: Courant d'excitation et la tension induite [3]

La bobine génère un courant $I(s)$, dont l'axe est perpendiculaire à la surface du conducteur et la densité étant $N(\rho, z)$ (Les courants de déplacement sont négligés).

L'équation de propagation devient :

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] E(s, \rho, z) = -\mu_0 s I(s) N(\rho, z) \quad z > 0 \quad \text{dans l'air} \quad (1.5)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - s \mu \sigma \right] E(s, \rho, z) = 0 \quad z < 0 \quad \text{en présence du conducteur} \quad (1.6)$$

La solution élémentaire requise est le champ électrique dû à un courant circulaire du rayon ρ' à une hauteur z' dans l'air au-dessus d'un conducteur.

Le champ résultant satisfait :

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \cdot \overset{0}{G}(s, \rho, z | \rho', z') = -\delta(\rho - \rho') \delta(z - z') / \rho \quad z > 0 \quad (1.7)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \cdot \overset{0}{G}(s, \rho, z | \rho', z') = 0 \quad z < 0 \quad \text{En présence du conducteur} \quad (1.8)$$

D'après Hammond [3] la solution avec les conditions aux limites ($\rho \rightarrow \infty$ et $|z| \rightarrow \infty$) est de la forme :

$$\overset{0}{G}(s, \rho, z / \rho', z') = \int_0^{\infty} \tilde{G}(k, s, z, z') J_1(k\rho') J_1(k\rho) k dk \quad (1.9)$$

ou :

J_1 est la fonction de Bessel[3] du premier ordre.

$$\tilde{G}(k, s, z, z') = \begin{cases} \frac{1}{2k} [e^{-k|z-z'|} + \Gamma(k, s) e^{-k(z+z')}] & z > 0 \\ \frac{1}{2k} T(k, s) e^{\gamma(z+z')} & z < 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

avec, $\gamma = \sqrt{k^2 + s\mu\sigma}$ prenant la racine avec une vraie partie positive.

Le champ dû à un filament a les propriétés d'une fonction de Green dont la première dérivée a une discontinuité (un saut) quand $z=z'$, et c'est pareille en ce qui concerne ρ quand $\rho=\rho'$. En conséquence, les dérivés du second degré sont symboliquement liés aux fonctions de delta.

Les coefficients électriques transversaux de réflexion et de transmission $\Gamma(k, s)$ et $T(k, s)$ sont donnés par :

$$\Gamma(k, s) = \frac{\mu_r k - \gamma}{\mu_r k + \gamma} \quad \text{et} \quad T(k, s) = \frac{2\mu_r k}{\mu_r k + \gamma} \quad (1.11)$$

Par la présence de ces coefficients, la surface agit en tant qu'un filtre. Dans les basses fréquences le coefficient de réflexion s'approche (-1) et dans les hautes fréquences il tend vers $(\mu_r - 1)/(\mu_r + 1)$. Le coefficient de transmission, d'autre part, augmente de zéro à $\mu_r/(\mu_r + 1)$ quand la fréquence augmente à partir de zéro.

Le champ dépend linéairement de sa source. Par conséquent, le principe de superposition peut être employé pour écrire la solution de (1.7) et de (1.8) pour le champ électrique en termes de solution de (1.9)

$$E(s, \rho, z) = \mu_0 s I(s) \int_0^{\infty} \int_0^0 \overset{0}{G}(s, \rho, z / \rho', z') \cdot N(\rho', z') \rho' d\rho' dz' \quad (1.12)$$

Le champ électrique au-dessus du conducteur

$E(s, \rho, z) = E_0(s, \rho, z) + \Delta E(s, \rho, z)$ peut être écrit comme :

$$(1.13)$$

Séparation de l'espace libre, et limites de réflexion. Combinant (1.10), (1.12), et (1.13) donne :

$$E_0(s, \rho, z) = \frac{1}{2\pi} \mu_0 s l(s) \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-k|z-z'|} N(\rho', z') J_1(k\rho') J_1(k\rho) dk \rho' dz' \quad (1.14)$$

et :

$$E_0(s, \rho, z) = \frac{1}{2\pi} \mu_0 s l(s) \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \Gamma(k, s) e^{-k(z+z')} N(\rho', z') J_1(k\rho) J_1(k\rho') dk \rho' dz' \quad (1.15)$$

Noter que l'intégrale plus d'en l'équation (1.14) peut être évaluée en termes d'intégrales elliptiques, en utilisant un format standard. En changeant l'ordre de l'intégration, l'équation (1.15) peut être écrite :

$$\Delta E(s, \rho, z) = \frac{1}{2\pi} \mu_0 s l(s) \int_0^\infty \Gamma(k, s) e^{-kz} j(k) J_1(k\rho) dk \quad (1.16)$$

Où $j(k)$ est défini en termes d'intégrales au-dessus de l'enroulement tourne comme de fonction de densité :

$$j(k) = \int_0^\infty \int_0^\infty N(\rho, z) e^{-kz} J_1(k\rho) \rho d\rho dz \quad (1.17)$$

Ce qui est une combinaison d'une transformé Hankel [3] dans les coordonnées radial du même pour la transformé de Laplace dans z

Pour un palpeur cylindrique de coupe rectangulaire et avec un nombre constant d'enroulement 'n', au dessus de la section de contact nous avons :

$$N(\rho, z) = \begin{cases} n & a_2 < \rho < a_1 \quad -b < z-h < b \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1.18)$$

Avec :

a_1 : Le rayon externe de la bobine.

a_2 : Le rayon interne de la bobine.

$2b$: Longueur de la bobine.

h : La distance entre le centre de la bobine et la surface du conducteur.

A partir des équations (1.17) et (1.18) on le trouve :

$$j(k) = \frac{2n}{k} e^{-kh} \sinh(bk) [a_1^2 \chi(a_1 k) - a_2^2 \chi(a_2 k)] \quad (1.19)$$

Où χ est défini par :

$$\chi(\alpha) = \int_0^1 J_1(\alpha\rho) \rho d\rho = \frac{2\pi}{\alpha} [J_1(\alpha) H_0(\alpha) - J_0(\alpha) H_1(\alpha)] \quad (1.20)$$

Ou :

H_0 et H_1 sont des fonctions de Struve[3].

A partir de l'équation (15), on détermine la dépendance de fréquence/temps et un palpeur arbitraire par le produit du courant et du coefficient de réflexion.

$$\phi(k,s) = I(s)\Gamma(k,s) \quad (1.21)$$

La variation correspondante de temps et sa dérivé sont donnés par le la transformé inverse de Laplace :

$$\phi(k,t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{Br} \phi(k,s)e^{st} ds \quad \text{qui implique que} \quad \phi'(k,t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{Br} s\phi(k,s)e^{st} ds \quad (1.22)$$

Pour un coefficient de réflexion et une variation exponentielle du courant par rapport au temps, les intégrales réduisent aux formats standards qui peuvent être évalués analytiquement en termes de fonctions erreur.

Le champ électrique réfléchi en fonction du temps est donné par la transformé inverse de Laplace de l'équation (1.16).

$$\Delta E(\rho, z, t) = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^\infty \phi'(k,s) e^{-kz} g(k) J_1(k\rho) dk \quad (1.23)$$

Le champ magnétique est trouvé a partir de la loi d'induction en prenant la transformé inverse de Laplace de $-\nabla \cdot [\hat{\phi} \Delta E(s, \rho, z)] / \mu_0 s$ qui donne :

$$\begin{bmatrix} \Delta H_\rho(\rho, z, t) \\ \Delta H_z(\rho, z, t) \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \int_0^\infty \phi'(k,s) e^{-kz} g(k) \begin{bmatrix} J_1(k\rho) \\ J_0(k\rho) \end{bmatrix} k dk \quad (1.24)$$

Pour le champ magnétique réfléchi au-dessus d'un conducteur ($Z>0$). L'équation (1.24) est évaluée en utilisant les techniques numériques standards.

1.2.2 Modèle de B.HALBCH [7]

On suppose que le champ magnétique et les courants de Foucault dépendent seulement des coordonnées x , l'axe de propagation d'onde électromagnétique, et du temps « t » de propagation.

Les équations de Maxwell sont :

$$\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.25)$$

$$\vec{\nabla} H = \vec{\sigma} E \quad (1.26)$$

En combinant ses deux équations on arrive à l'équation de propagation

$$\frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial x^2} = \mu\sigma \frac{\partial B(x,t)}{\partial t} \quad (1.27)$$

Ou on suppose que les conductivités électriques et les perméabilités magnétiques de deux tôles d'acier d'une épaisseur d séparées par l'air sont constants.

La solution de la transformer de Laplace (LT) de l'équation (1.27) est:

$$\frac{d^2 B(x,p)}{dx^2} = \mu \sigma p B(x,p) \quad (1.28)$$

$$B(x,p) = B_0(d_1,p) \frac{\cosh \zeta x/d_1}{\cosh \zeta} \quad (1.29)$$

ou p est le paramètre de la transformé de Laplace, $B(d_1,p)$ est le champ magnétique au bord du conducteur et $\zeta = \sqrt{p\tau}$ est avec la constante du temps $\tau = \mu\sigma d_1^2$. De l'équation (1.29), le champ magnétique moyen $B(p)$ à travers le conducteur peut être calculé de la manière suivante

$$B(p) = B_0(d_1,p) \frac{\sinh \zeta}{\zeta \cosh \zeta} \quad (1.30)$$

La transformé inverse de Laplace de l'équation (1.30) dépend du champ magnétique moyen.

On suppose que le champ magnétique dans l'air entre les deux couches est de la forme d'un demi-sinus de largeur t_0 ($w = \pi/t_0$),

$$B(x,+0) = 0 \quad (1.31)$$

Donc $B_0(d_1,p)$ peut être substitué avec l'équation (1.31),

$$B_0(d_1,p) = B_{00} \frac{w_0}{w^2 + p^2} (1 + e^{-p/w_0}) \quad (1.32)$$

L'équation (1.32) a des pole $p = \pm iw_0$ et $p = -\pi^2(m-1/2)^{2/\tau}$ ($m=1,2,3,\dots$).

la transformée inverse de Laplace du champ magnétique moyen est calculée comme suite :

$$\frac{B(t)}{B_{00}} = \frac{1}{(w_0\tau^{1/2})} \frac{(\cosh^2 2k - \cos^2 2k)^{1/2}}{\cosh 2k + \cos 2k} \sin(w_0 - \vartheta) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2(m-1/2)^2} \frac{e^{-smw_0t}}{s_m + 1/s_m}, (0 \leq t \leq t_0)$$

$$= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2 (m-1/2)^2} \frac{1+e^{sm\pi}}{s_m+1/s_m} e^{-sm\omega_0 t}, \quad (t \geq t_0) \quad (1.33)$$

Avec les paramètres $k = (\omega_0 \tau / 2)^{1/2}$, $sm = \pi^2 (m-1/2)^2 // \omega_0 \tau$ et

$$\tan \theta = \frac{\sinh 2k - \sin 2k}{\sinh 2k + \sin 2k}$$

1.2.3 Modèle de calcul d'impédance de la bobine

Nous supposons que le système sonde conducteur est équivalent à une inductance en série avec une résistance dont on peut calculer les valeurs [8], en s'appuyant sur le fonctionnement d'un circuit RLC, avec une valeur constante de la capacité de décharge.

Ce circuit composé d'un condensateur, d'une self-inductance et d'une résistance est représenté par la figure (1.6):

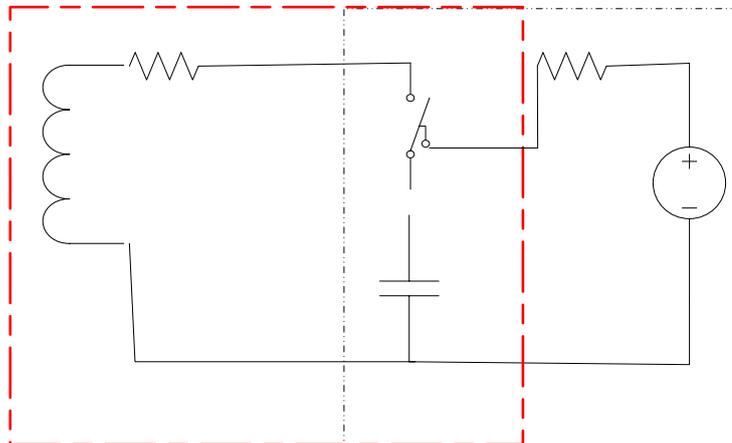


Figure 2-6: Analogie électrique d'un matériau à contrôlé simulé à une bobine

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:

$$I = -\frac{dQ}{dt} \quad (1.34)$$

$$Q = C V \quad (1.35)$$

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (1.36)$$

D'après les équations (1.35) et (1.36) nous obtenons $I = -\frac{Cdv}{dt}$ et en le combine avec l'équation (1.36) on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2V}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC} V = 0 \quad (1.37)$$

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

$$V = Ae^{-\alpha t} \cos \omega t \quad (1.38)$$

A, α sont des constantes.

En remplaçant l'expression de V dans l'équation (1.37), on obtient :

$$(\alpha^2 - \omega^2 - \alpha \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}) \cos(\omega t) + (2\alpha\omega - \frac{R}{L} \omega) \sin(\omega t) = 0 \quad (1.39)$$

Les conditions aux limites nous permettent de trouver les équations :

$$\begin{cases} (\alpha^2 - \omega^2 - \alpha \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}) = 0 \\ (2\alpha\omega - \frac{R}{L} \omega) = 0 \end{cases} \quad (1.40)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R}{2L} \\ \omega^2 = \frac{1}{LC} - \alpha^2 \end{cases} \quad (1.41)$$

de (1.40) et (1.41), on peut avoir :

$$\begin{cases} L = \frac{1}{(\omega^2 + \alpha^2) C} \\ R = \frac{2\alpha}{(\omega^2 + \alpha^2) C} \end{cases} \quad (1.42)$$

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

CHAPITRE 2

TRAITEMENT DU SIGNAL

2.1 Transformée de fourrier Généralités

La transformée de Fourier [9] d'un signal numérique $x(k)$ est définie par :

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) e^{-j2\pi f k} \quad (2.1)$$

La fonction $X(f)$ est généralement une fonction complexe de la variable réelle f , et périodique de période 1.

$$X(f) = |X(f)| e^{j \cdot \arg(X(f))} \quad (2-2)$$

$|X(f)|$: Spectre d'amplitude.

$\arg(X(f))$: Spectre de phase.

Le spectre de puissance du signal $x(k)$ est défini par :

$$G(f) = |x(f)|^2$$

Le $k^{\text{ème}}$ échantillon du signal est donnée par la relation inverse :

$$x(k) = \int_{-1/2}^{1/2} X(f) e^{(2\pi f k)} df \quad (2-3)$$

La Transformée de Fourier des signaux numériques, telle qu'elle a été définie précédemment, n'est pas sous une forme appropriée pour un traitement numérique. Ceci provient de deux difficultés associées aux relations (2-2) et (2-3).

La première difficulté est que (f) est une variable continue que l'on ne peut pas manipuler dans un système de traitement numérique.

La seconde difficulté est due au nombre infini d'échantillon du signal $x(k)$ qu'il est impossible de traiter pratiquement.

Vu l'importance considérable de cette transformation en traitement de signaux, il est nécessaire de la mettre sous une forme pratiquement utilisable, cette forme est appelée « Transformation de Fourier Discrète (TFD) ». Celle-là consiste à remplacer la variable continue (f) par une variable discrète n ($f = n\Delta f$ ou Δf est l'incrément utilisé sur l'axe des fréquences), et limiter la durée du signal $x(k)$.

On peut diviser une période du signal $X(f)$ en « N » incréments et on a :

$$f = n\Delta f = n/N \text{ Avec } \Delta f = 1/N$$

Compte rendu du changement de variable, et pour un signal $x(k)$ à durée limitée à

$$N, \text{ la relation (2-1) devient : } X(n) = \sum_{k=k_0}^{k_0+N-1} x(k) \exp(-j2\pi \frac{nk}{N}) \quad (2-4)$$

$$\text{Avec } n = -N/2 - (N/2) + 1, \dots, (N/2) - 1$$

La transformation inverse est donnée par :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=N/2}^{N/2-1} X(n) \exp(j2\pi \frac{nk}{N}) \text{ avec } k = k_0, \dots, k_0 + N - 1$$

(2-5)

$$e^{j2\pi/N} = w_N \text{ Est appelée coefficient de base de la TFD.}$$

2.2 TRANSFORMATION DE FOURIER RAPIDE

L'importance du rôle joué par la transformation de Fourier rapide [10] en traitement numérique des signaux est énormément renforcée par l'existence d'un algorithme de calcul rapide et efficace.

Cet algorithme est appelé « Transformation de Fourier Rapide (TFR) » (en anglais : Fast Fourier Transform (FFT)).

On admettra que l'ordre N de la TFD est une puissance de 2 ($N = 2^m$) ; N étant un nombre pair, donc on peut partager la suite $x(k)$ en deux suites de $N/2$ valeurs, la première étant formée par les valeurs d'indices pairs ($k = 2i$) et la seconde formée par les valeurs d'indice impairs ($k = 2i + 1$). La relation (2-4) devient alors :

$$X(n) = \sum_{i=0}^{N/2-1} x(2i)w_N^{2in} + \sum_{i=0}^{N/2-1} x(2i+1)w_N^{-(2i+1)n} \quad (2-6)$$

2.3 Fonctions de corrélation

Les fonctions de corrélation [11], ou d'inter corrélation, permettent de comparer des signaux distincts en fonction du retard entre les signaux. La transformée de FOURIER des fonctions de corrélation est le spectre (l'inter spectre) de d'énergie ou puissance du ou des signaux considérés. Les fonctions de corrélation sont donc utiles pour étudier la ressemblance de différents signaux (dans le domaine temporel), et la répartition de l'énergie ou de la puissance en fonction de la fréquence. Les principales applications des fonctions de corrélation prennent place dans le cadre des signaux aléatoires.

Pour des signaux d'énergie finie, on définit

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t-\tau)dt \quad (2.7)$$

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t-\tau)dt \quad (2.8)$$

Pour des signaux de puissance moyenne finie, on définit, de manière analogue,

$$R_{xy}(\tau) \cong \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{[T]} x(t)y^*(t-\tau)dt \quad (2.9)$$

$$R_{xx}(\tau) \cong \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{[T]} x(t)x^*(t-\tau)dt \quad (2.10)$$

Propriétés de symétrie

Par simple application des définitions, on pourra (exercice) vérifier les propriétés de symétrie suivantes

$$R_{xy}(-\tau) = R^*_{yx}(\tau) \quad (2.11)$$

$$R_{xx}(-\tau) = R^*_{xx}(\tau) \quad (2.12)$$

Pour des signaux réels, on aura alors :

$$R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau) \quad (2.13)$$

$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau) \quad (2.14)$$

Distributivité

La propriété de distributivité permet de simplifier notamment certains calculs :

Si :

$$x(t) = \sum_{i=0}^m \alpha_i x_i(t) \quad (2.15)$$

$$y(t) = \sum_{j=0}^n \beta_j y_j(t) \quad (2.16)$$

Alors

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \alpha_i x_i(t) \beta_j y_j(t) \quad (2.17)$$

Par linéarité de la transformée de Fourier on aura également

$$TF\{R_{xy}(\tau)\} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j TF\{R_{x_i y_j}(\tau)\} \quad (2.18)$$

CHAPITRE 3

RAPPELS SUR LES MATERIAUX

3.1 Aluminium

L'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux [12]. Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages et la croissance de consommation s'explique par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs dans le domaine du bâtiment, l'industrie électrique, l'emballage et le transport et en particulier le transport aérien. Parmi ces caractéristiques on cite :

3.1.1 La légèreté

L'aluminium et ses alliages sont appelés les alliages légers depuis longtemps et cela pour leur faible densité. L'aluminium est le métal le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2700Kg.m^{-3} , soit presque trois fois moindre que celle des aciers. La masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800Kg.m^{-3} .

La conductivité thermique

L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre, le plus performant des métaux usuels. La conductivité thermique des alliages d'aluminium dépend de leur composition chimique et de leur état métallurgique.

3.1.2 La conductivité électrique

La conductivité électrique est de l'ordre des deux tiers de celle du cuivre. Pour cela l'aluminium et ses alliages sont les plus utilisés dans les câbles électriques aériens et câbles téléphoniques, souterrains et sous-marin.

3.1.3 La tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont une très bonne résistance à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain et industriel. La durée de vie des produits en aluminium et ses alliages peut être très longue, on peut trouver en service des toitures (dont celle d'une église de Rome), des bardages, des équipements de port de plaisance, des bateaux..., qui ont plusieurs décennies de service. Ce qui facilite l'entretien de ce dernier car son entretien est très réduit même si le matériau n'est pas protégé (ni peint, ni anodisé) donc il est mieux conservé.

3.1.4 L'aptitude aux traitements de surface

Parmi les objectifs du traitement de surface on trouve :

- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion est jugée insuffisante, comme c'est souvent le cas pour les alliages au cuivre des familles 2000 et 7000.
- La pérennité du métal en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement.
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle.
- La décoration du métal.

3.1.5 Propriétés de certains Alliages d'aluminium

Caractéristiques de la microstructure des alliages 7000

La grande diversité des phases présentes dans les alliages Al-Zn-Mg-Cu rend ce système très complexe. Elles peuvent être stables ou métastables, elles sont susceptibles d'améliorer le comportement mécanique du matériau par

durcissement structural ou au contraire d'être à l'origine d'un endommagement catastrophique [13],[14].

Nature des phases présentes dans le système Al-Zn-Mg-Cu

Les différentes phases susceptibles d'apparaître dans les alliages de la série 7000 peuvent être réparties en trois catégories : les précipités durcissant, qui contrôlent les propriétés mécaniques plastiques du matériau (limite d'élasticité et taux d'érouissage), les dispersoïdes, qui permettent de maîtriser les phénomènes de recristallisation et les particules intermétalliques.

Précipitations activées pendant les traitements thermiques de trempe et de revenu

La précipitation dans les alliages Al-Zn-Mg-Cu est très complexe de par la diversité de taille des particules mais aussi la multiplicité des sites de germination activés. L'ensemble de la précipitation peut être divisé en trois grandes familles : la précipitation hétérogène inter granulaire, la précipitation hétérogène intra granulaire et la précipitation homogène.

Traitements thermiques des alliages d'aluminium

L'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu de caractéristiques mécaniques. Certaine gamme est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent soit :

- Une diminution de la résistance mécanique (les traitements d'adoucissement) ;
- Une augmentation de la résistance mécanique (les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que l'aptitude à la transformation à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, à la

fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique, la stabilité dimensionnelle, etc [16].

Dans la métallurgie, on a tendance de définir des traitements thermiques spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé.

Traitement de trempe structurale

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituants d'alliage. La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium. Le traitement thermique dit de durcissement structural comporte trois grands stades.

Après la mise en solution, l'alliage doit être refroidi assez énergiquement pour que la solution reste sursaturée à la température ambiante. Si l'alliage est refroidi assez lentement pour qu'à chaque température l'équilibre ait le temps de s'établir, il va y avoir séparation en deux phases dès que la température passera au-dessous de 300°C: c'est la précipitation tendant vers la phase $MgZn_2$. Comme la solubilité du zinc dans l'aluminium diminue avec la température, la quantité de précipités va augmenter lorsque la température va diminuer. Cependant, si au lieu de refroidir lentement la solution homogène, on l'amène brusquement à la température ambiante par trempe, la précipitation n'a pas en général le temps de se former durant le refroidissement. On peut ainsi obtenir, à la température ambiante, la solution solide homogène qui était stable au-dessus de 300°C, mais qui se trouve alors sursaturée.

Notions générales sur la corrosion

Les conditions d'utilisation ainsi que les propriétés physico-chimiques d'un matériau donné, jouent un rôle considérable dans sa tenue vis à vis de la corrosion. Cette notion devrait être examinée avec beaucoup de soins et doit impérativement constituer une partie non négligeable dans la sélection d'un matériau parmi d'autres dans une structure donnée.

Définitions

D'une manière générale et d'après la littérature [17],[18], la corrosion est définie comme étant :

- L'attaque des matériaux par des moyens non mécaniques.
- La dégradation des matériaux ou de leurs propriétés par interaction chimique avec leurs environnements.
- Le retour des métaux et alliages à leurs états naturels de minerais (processus inverse de la métallurgie extractive).

En tous cas, quelle que soit la définition adoptée, la corrosion est une dégradation qui conduit dans certains cas à des pertes considérables. La corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les milieux gazeux et elle est qualifiée d'humide lorsqu'elle ait lieu dans les électrolytes liquides.

Processus de la corrosion

La distinction entre processus chimique et électrochimique de la corrosion est très difficile. Certes, quelques exemples d'attaque comme ceux concernant les métaux immergés dans d'autres métaux liquides ou dans certaines solutions non aqueuses par exemple l'aluminium dans le tétrachlorure de carbone (CCl_4) peuvent être classés comme cas de corrosion chimique, mais la plupart des réactions de corrosion font appel à des mécanismes de nature électrochimique, en particulier les réactions de dissolution en milieu électrolytique ou d'oxydation à haute température [17],[19].

De même il est préférable de différencier entre la corrosion humide et la corrosion sèche. Dans le premier cas, il s'agit d'un milieu constitué par un liquide généralement électrolytique ou par des vapeurs humides ; la température est modérée. Dans l'autre cas, le milieu est constitué par des vapeurs et gaz au dessus de leur point de rosée ; la température est souvent élevée et les phénomènes de diffusion en phase solide deviennent importants.

Dans certaines situations précises, le phénomène de la corrosion se manifeste sous forme biochimique où interviennent des organismes vivants. Ce processus concerne essentiellement l'attaque bactérienne des canalisations ou réservoirs enterrés [20].

Facteurs de la corrosion

Les nombreux facteurs de la corrosion sont généralement liés soit, au matériau métallique, soit à son environnement. Il est à distinguer quatre grandes familles [11],[10] :

3.2 ACIER 16NC6

3.2.1 La cémentation

La cémentation est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en carbone d'un produit ferreux suivi par une trempe.

Le but de ce double traitement, est d'obtenir à la surface de l'acier une couche de 0.3 à 2 mm d'épaisseur à haute teneur en carbone. Teneur généralement comprise entre 0.6 et 0.9 %. La couche en question présente une structure essentiellement martensitique de grande dureté (pouvant atteindre 700 à 900 HV en surface) et des contraintes résiduelles de compression élevées, elle est capable de résister à des sollicitations mécaniques sévères, repose sur un cœur ayant une dureté nettement moins élevée (inférieure ou égale à 400 HV environ) et présente de bonnes caractéristiques de ténacité.

La surface des pièces est mise en contact avec un milieu susceptible de fournir du carbone libre par une réaction chimique à haute température. La température de cémentation est choisie supérieure à A_{c3} de l'acier, et généralement comprise entre 900 et 1000 °c, car la faible solubilité du carbone dans la ferrite implique que le traitement s'effectue dans le domaine austénitique. De plus, on peut ainsi, dans la plupart des cas, effectuer le traitement de durcissement par trempe martensitique directement à partir de la température de cémentation.

Les aciers pour cémentation

Ce sont des aciers faisant partie des aciers pour traitements thermiques ils présentent un grain fins et à basse teneur en carbone et ils se classent en six familles. (Tableau 3.1).

Tableau 6-1: Principales nuances d'aciers de cémentation

Type d'aciers	Nuances
Aciers au carbone	XC10 – XC12 – 2C22
Aciers au manganèse-chrome	16MnCr5 – 20MnCr5
Aciers au chrome molybdène	18CrMo4
Aciers au nickel-chrome	10NiCr6 – 16NiCr6 – 20NiCr6 – 14NiCr11
Aciers au nickel-chrome-molybdène	20NiCrMo2 – 18NiCrMo6
Aciers au bore	21B3 – 20MnB5 – 19NiCrMoB2

Techniques de cémentation

La cémentation s'est effectuée en trois étapes. La figure 3.1 schématise les cycles thermiques correspondant à ces étapes.

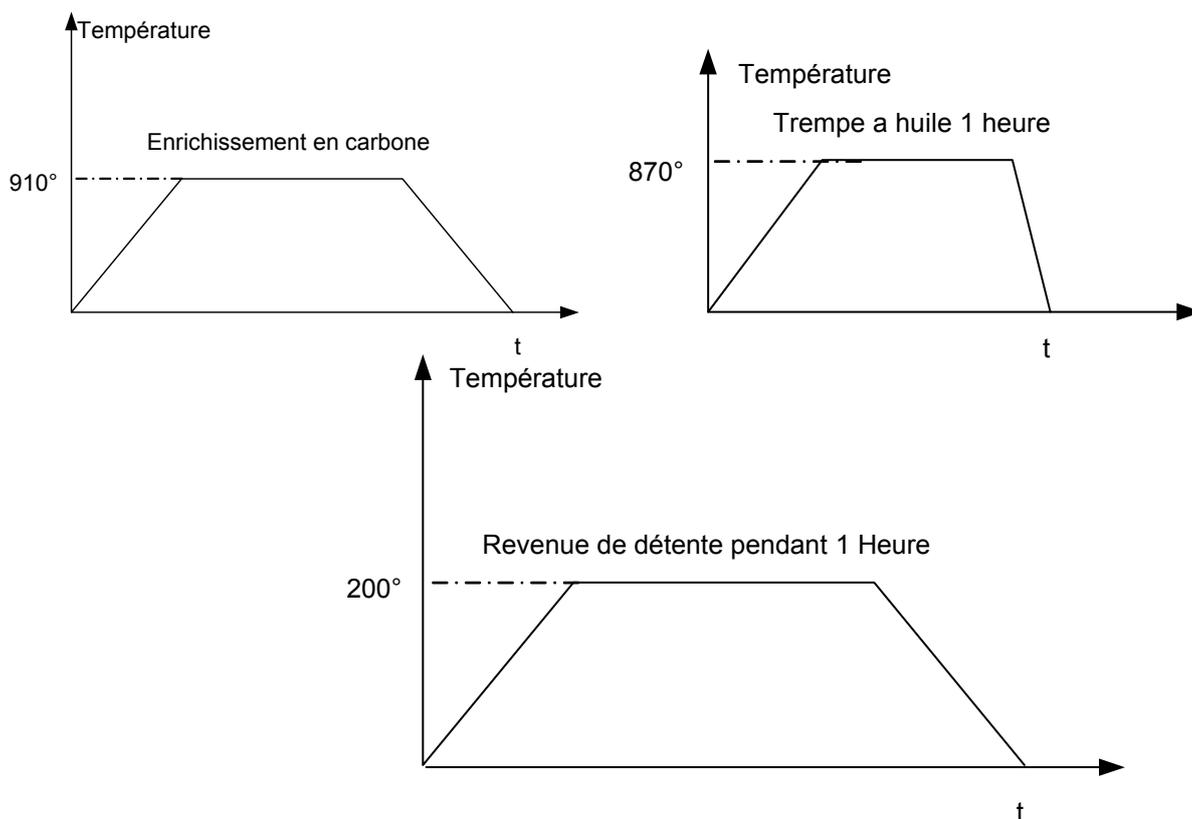


Figure 6-1: Les étapes de la cémentation

La première étape est l'étape de l'enrichissement en carbone, les échantillons sont maintenus dans un milieu carburant à une température de 910 °C. Cette

température est choisie supérieure à A_{c3} afin que l'enrichissement en carbone s'effectue dans le domaine austénitique, étant donnée la faible solubilité du carbone dans la ferrite.

L'enrichissement en carbone est suivi d'une trempe à l'huile, cette trempe confère à la couche cémentée une dureté élevée.

Après la trempe les pièces ont subi un revenu de détente vers $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 1 H conduisant à une augmentation de la ténacité de la couche cémentée par relaxation partielle des contraintes sans diminution appréciable de dureté.

Méthodes utilisées pour l'étude de la cémentation

Pour comparer les résultats nous nous sommes limités dans notre travail à des mesures de micro duretés. Nous citons les méthodes utilisées pour la détermination du profil de concentration en carbone et du profil de concentration de contraintes vu leur importance.

Dureté et micrographie

La méthode micrographique consiste à examiner les variations de structure introduites par le traitement, à partir de la périphérie vers le centre,

La méthode de mesure de la microdureté consiste à déterminer l'évolution de la microdureté Vickers de l'échantillon mesurée sous une charge de 9.807 N (1 Kgf), à partir de la périphérie vers le centre du produit.

Filiation de microduretés

Cet essai nous permet de déterminer l'évolution de la dureté en profondeur depuis la surface et déduire par la suite la profondeur conventionnelle de cémentation. La profondeur conventionnelle de cémentation est définie comme étant la distance entre la surface et la couche dont la dureté Vickers est 550 HV lorsqu'on la mesure sous une charge de 9.807 N .

Des mesures de microdureté sont prises à partir de la périphérie vers le centre avec un pas de $50\mu\text{m}$. la distance entre deux essai est de $100\mu\text{m}$ (Réalisé en considérant la norme (NF A 04-202))

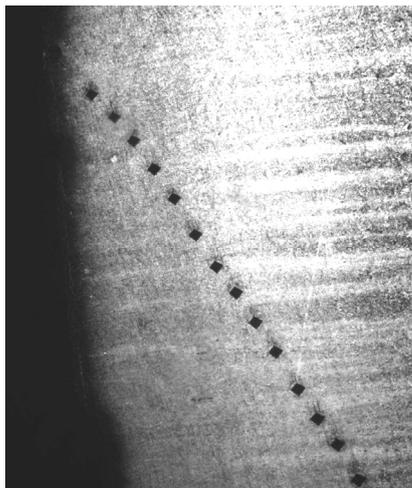


Figure 6-2:Filiation de microduretés

CHAPITRE 4

APPROCHE EXPERIMENTALE

4.1 Procédure de contrôle expérimentale.

Les courants de Foucault pulsés ne sont pas très utilisés dans le domaine de l'évaluation non destructive, par contre leur utilisation dans la détection des défauts en particulier dans la détermination des corrosions (manque d'épaisseur) est très répandue en particulier dans le domaine aéronautique.

Un des objectifs de cette étude est d'optimiser cette méthode en utilisant une analyse numérique du signal, et procéder à l'évaluation des matériaux.

Afin d'étudier, optimiser et évaluer les performances de ce type de contrôle, une procédure expérimentale a été appliquée permettant la mise en évidence des différents éléments du contrôle. Nous avons préféré procéder à plusieurs approches

- Etude de l'effet d'éloignement (distance entre la sonde et la pièce (lift-off)).
- Etude de la variation de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique en utilisant des échantillons indiqués dans le tableau 4.1.
- Disposition et caractérisation des défauts de différentes formes dans des plaques en aluminium. Ces plaques seront collées l'une à l'autre pour pouvoir simuler les défauts en multicouches. Les différents types de défauts étudiés sont :
 - Les fissures réalisées sur des tôles minces en aluminium .figure 4.2
 - des rainures de même largeur et de profondeurs différentes sur des pièces en aluminium, sur lesquels. Figure 4.2

Tableau 8-1: Echantillons pour l'étude de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique

Matériaux		MS/m
Non ferromagnétiques	NiAg	5
	BR024	14.6
	Al7075	20
	AL043	24.5
	Al1200	35
	Cu	48.5
	Cu100	58.4
Matériaux		
Ferromagnétiques	Acier série 300	
	Acier au Carbone	
	Acier séries 400	
	Ferrite	

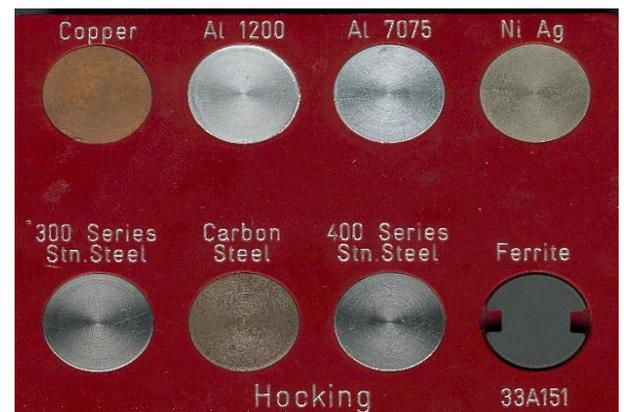
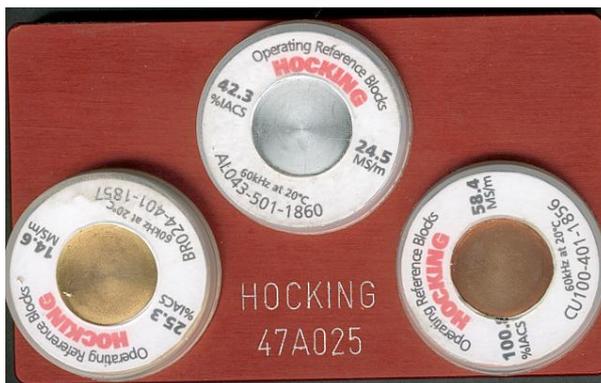


Figure 8-1: Echantillons pour l'étude de la variation de la conductivité électrique et la perméabilité magnétique

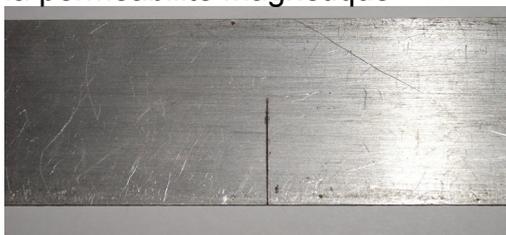


Figure 8-2: Défauts sous formes de rainures

4.2 Système du contrôle par Courants de Foucault Pulsé

Dans cette partie on va développer la chaîne de contrôle par courant de Foucault pulsé (figure 4.3) qui est constitué d'un system de génération d'impulsion,

Oscilloscope numérique, Table de déplacement micrométrique, Sondes et Echantillons a contrôlé.

Un programme a été élaboré qui permet de commander l'oscilloscope numérique pour l'acquisition du signal via la carte GPIB et la table de déplacement via le port série.

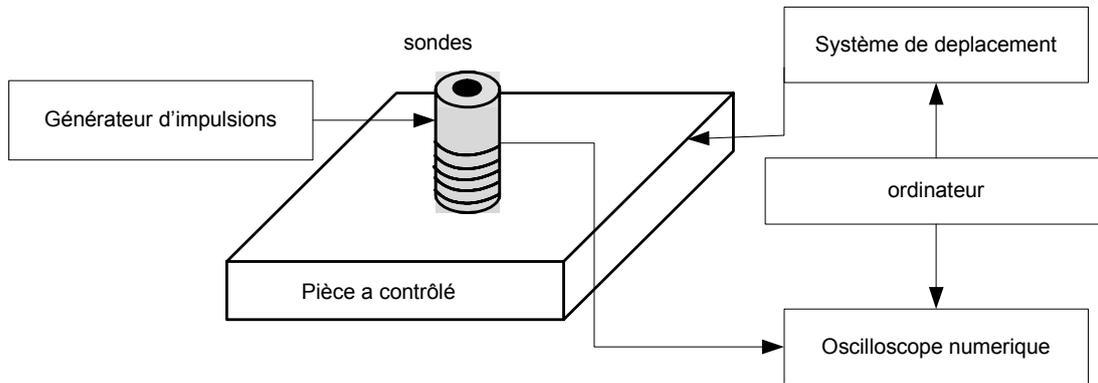


Figure 8-3:Chaîne de contrôle par courant de Foucault pulsé

System d'excitation par CFP:

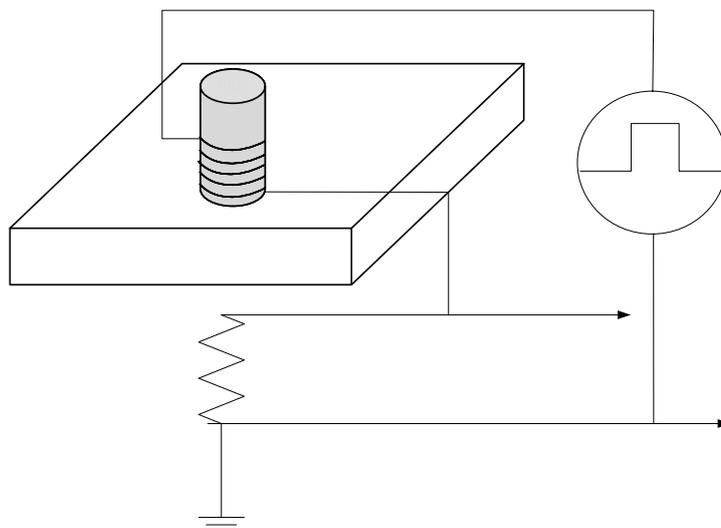
Première expérience

Il est constitué d'une bobine de 150 spire enroulé sur un bâton de ferrite cette bobine est reliée à une résistance de 120Ω au borne de celle-ci on mesure l'intensité du signal.

Le signal d'excitation est un signal carré de fréquence de 50 Hz comme indiqué sur la figure (3.2).

L'avantage de cette technique de mesure est la faible dimension du palpeur qui permet de réduire le phénomène de bord et donc permet des mesures de faible dimension, néanmoins elle est peut sensible pour les défauts de surface.

Ce qui nous a conduits à procéder à une deuxième technique de mesure



Sonde

Figure 8-4: premier système de génération des CFP

Deuxième expérience

Il est constitué de deux bobine axial, une excitatrice de 250 et une sonde réceptrice de 200 spire enrouler sur un bâton de ferrite.

Le signal d'excitation est un signal carré comme indiqué sur la figure (4.4) d'une fréquence de 50 Hz

R

L'avantage de cette technique de mesure est sensible et elle donne des satisfaisants, nous remarquons que e phénomène de bord est important

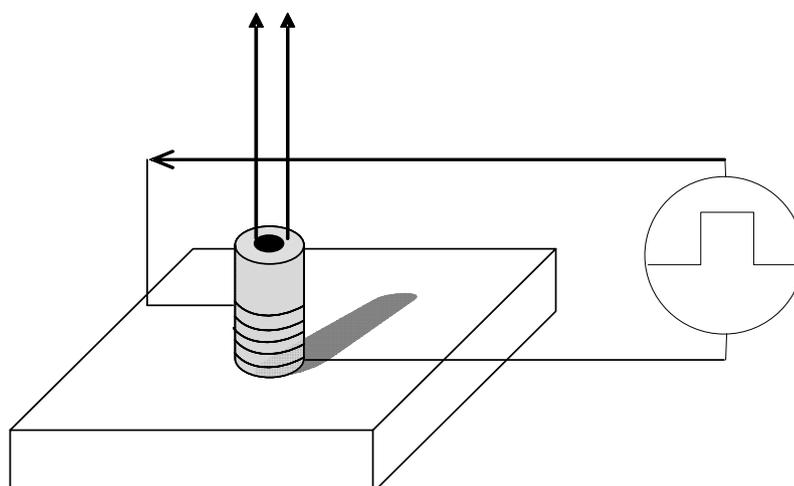


Figure 8-5: Deuxième système de génération des CFP
Automatisation de la chaîne de contrôle

Afin d'automatiser notre chaîne de mesure nous avons développé un programme qui permet de commander l'oscilloscope numérique pour l'acquisition du signal via la carte GPIB et la table de déplacement via le port série (voir APPENDICE B : Organigramme de programmation)

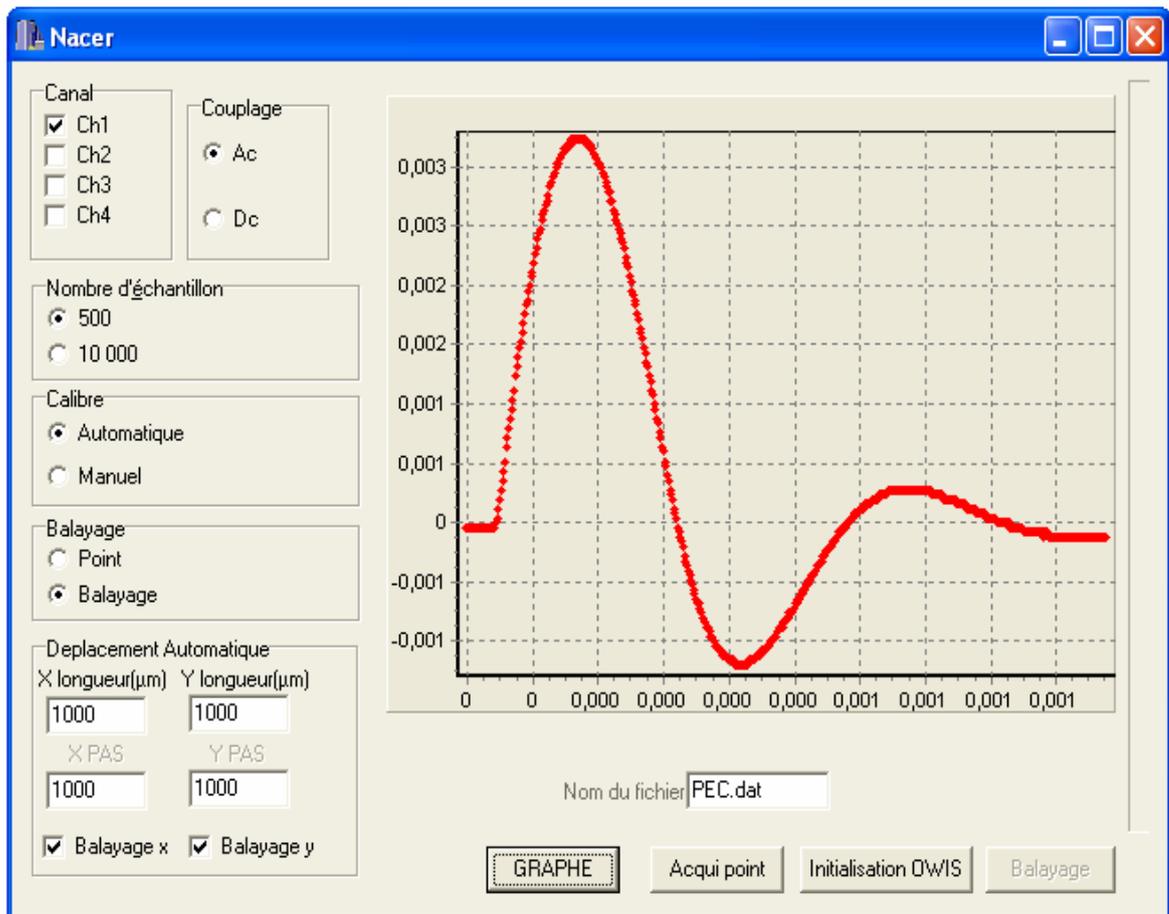


Figure 8-6: logiciel de commande de l'oscilloscope et de la table de déplacement

4.3 Résultats et interprétation

Le développement la technique des courants de Foucault pulsés (CFP récente a été réalisé grâce au progrès de l'électronique. L'information contenue dans le signal reçu, offre la possibilité de déterminer plusieurs paramètres dans le but d'analyser le matériau. Comme toutes techniques de CND, l'interprétation du signal est la plus délicate et difficile dans le sens où une expérience est exigée à l'opérateur.

A cet effet, les travaux de recherche évoluent dans le sens de faciliter l'interprétation à l'opérateur et de minimiser le risque d'erreur. Nous évaluerons les aptitudes et les performances de cette technique dans la détermination des caractéristiques de contrôle des matériaux, en particulier dans le cas des multicouches.

4.3.1 Application du traitement du signal dans contrôle par les CFP

Le signal obtenu lors du contrôle par CFP (figure 4.7) d'un matériau conducteur, nous renseigne sur la nature de ce dernier. L'analyse d'amplitude peut nous donner des informations sur un éventuel changement microstructural ou la présence d'une anomalie. Afin d'améliorer le contrôle par CFP on utilise l'outil de traitement du signal comme la transformée de Fourier (figure 4.8).

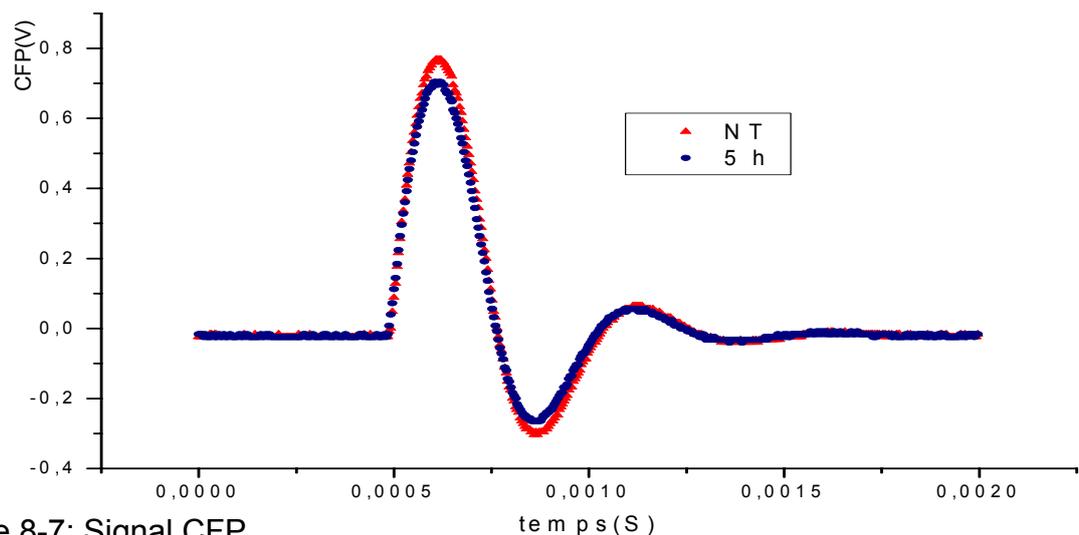


Figure 8-7: Signal CFP

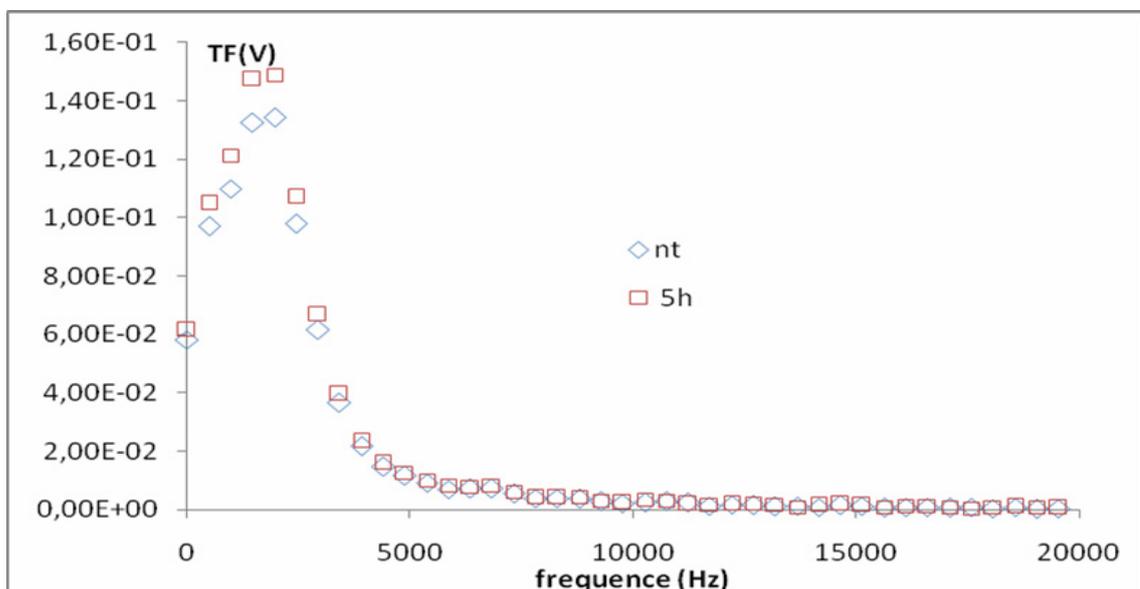


Figure 8-8:FFT des deux signaux CFP

Le signal obtenu par CFP présente trois paramètres importants, l'amplitude du premier pic. Le deuxième pic et le déphasage qui peut être obtenue lors du contrôle des structures en multicouches ou en présence de différentes anomalies.

4.3.2 Etude de la répétitivité des résultats

Pour étudier la répétitivité des résultats nous avons fait des acquisitions sur trois nuances de matériaux (cuivre, aluminium et du bronze) et le lendemain nous avons refait dans les mêmes conditions et paramètres (pièces, tension d'attaque fixe et distance sonde-pièce fixe).

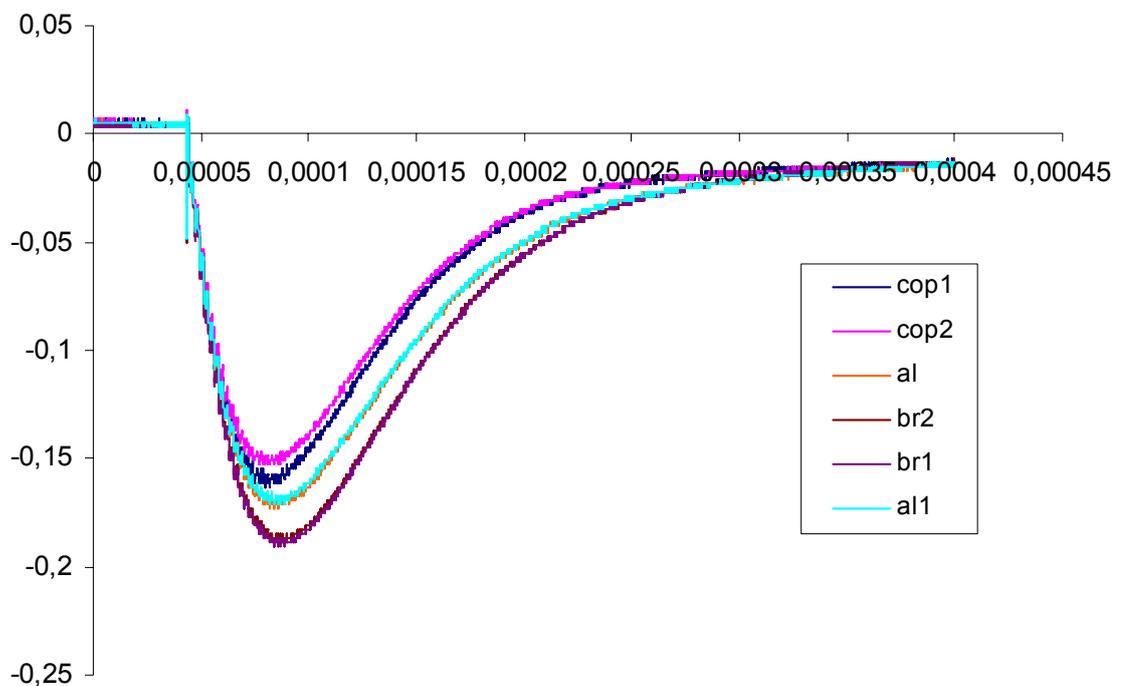


Figure 8-9:Signal CFP obtenue pour des différents matériaux

On peut remarquer de la figure 4.9 que les signaux des CFP sur l'aluminium et le Bronze sont superposés. Par contre le signale du cuivre est distingues.

4.3.3 Etude de l'effet d'éloignement-(distance entre la sonde et la pièce (lift-off)).

Le terme lift-off désigne universellement l'effet de décollement du capteur de la surface de la pièce à contrôler. Il peut fausser l'interprétation des résultats mais il peut être aussi un avantage pour détecter l'uniformité ou bien la mesure du revêtement isolant effectuée sur une pièce d'aluminium.

Nous avons procédé à l'étude de la variation de la distance pièce sonde.

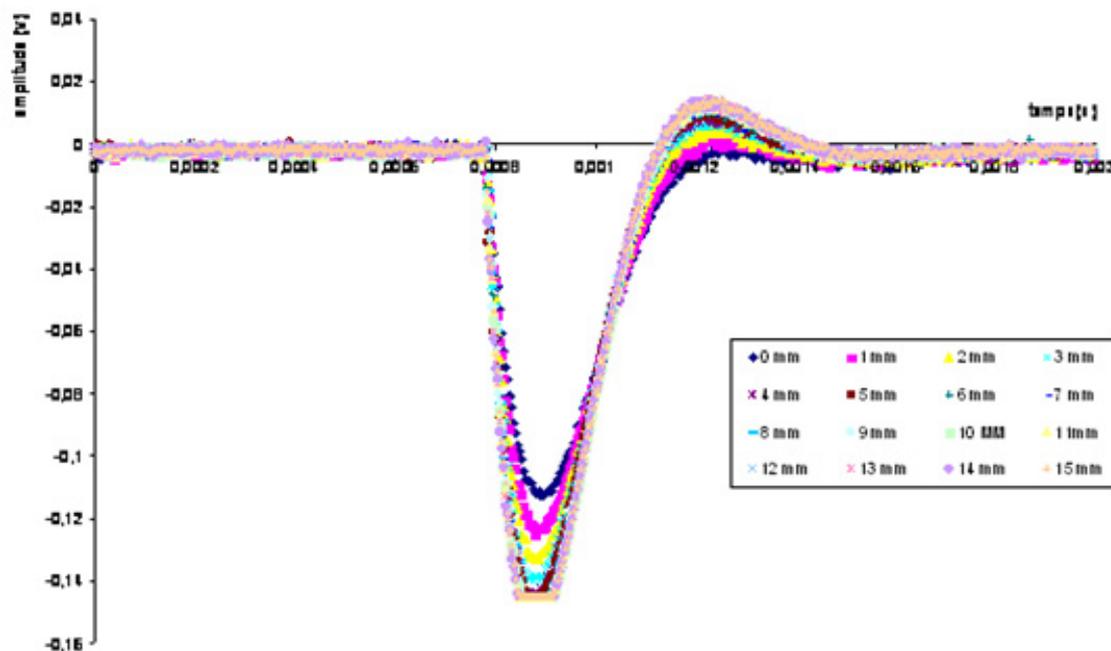


Figure 8-10:CFP pour des différentes distances sonde-pièce

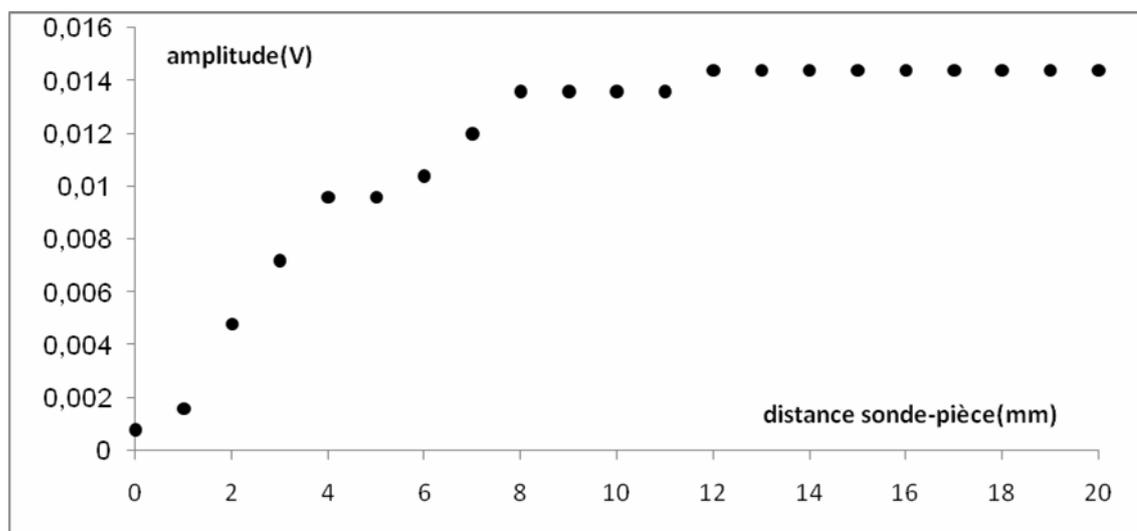


Figure 8-11:Variation de l'amplitude en fonction de la distance sonde-pièce

Les résultats obtenue (figures (4.10 et 4.11) montrent que l'amplitude du signal CFP est proportionnel à la distance sonde pièce. L'amplitude du signal augmente avec la distance sonde pièce pour mieux exprimer cette corrélation nous avons représenté la variation de l'amplitude et la variation de la TF du signal en fonction de la distance (figure 4.12).

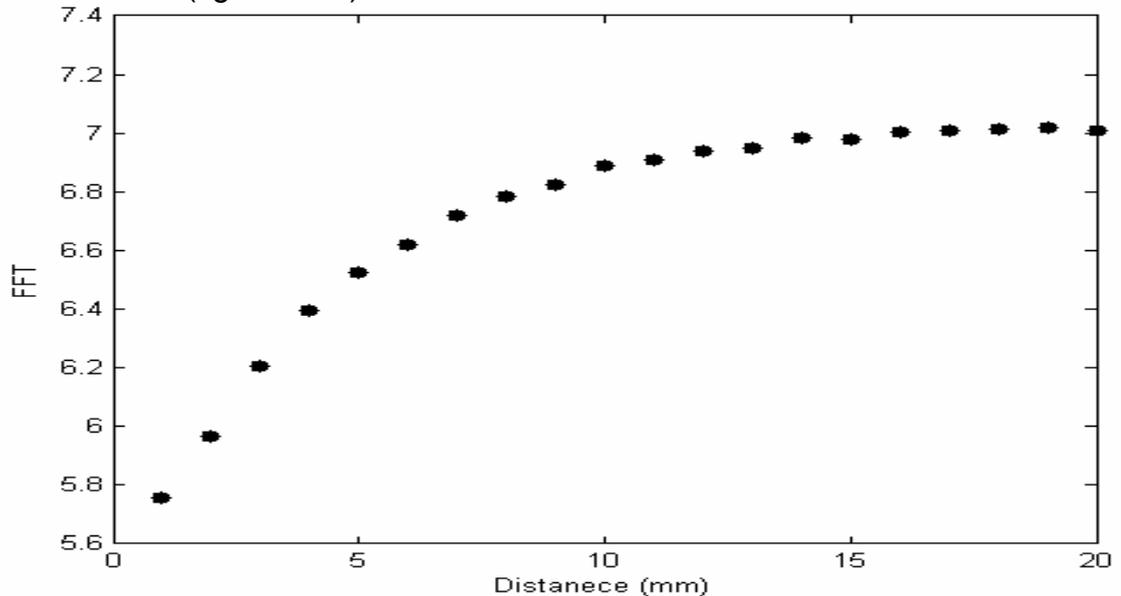


Figure 8-12: Variation de la FFT en fonction de la distance sonde-pièce.

Une analyse fréquentielle permet d'obtenir des résultats satisfaisants jusqu'à une distance à 20 mm (figure 4.12). Ce qui nous permet à l'avenir de mesurer des revêtements ou des corrosions pouvant atteindre 20 mm.

4.3.4 Détection des défauts

Arrachement de matière

Défauts circulaires.

Afin de simuler une corrosion qui correspond à un arrachement de matière nous avons choisi des défauts figure 4.13, avec : $d1= 1/10$ mm $d2=2/10$ mm, $d3=3/10$ mm et $d4= 4/10$ mm sur une tôle de 3 mm

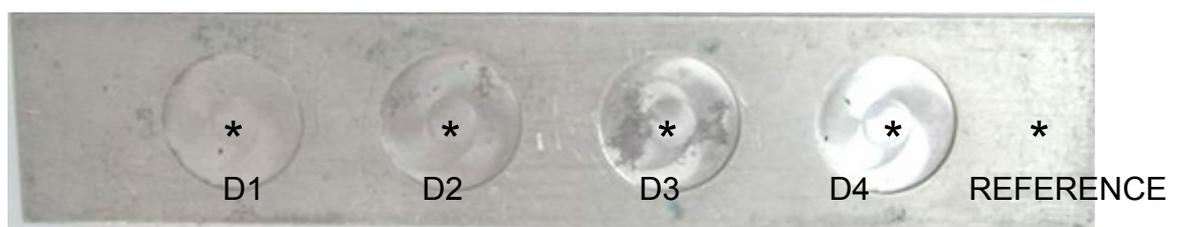


Figure 8-13: Pièce présentant épaisseur d'arrachement de la matière

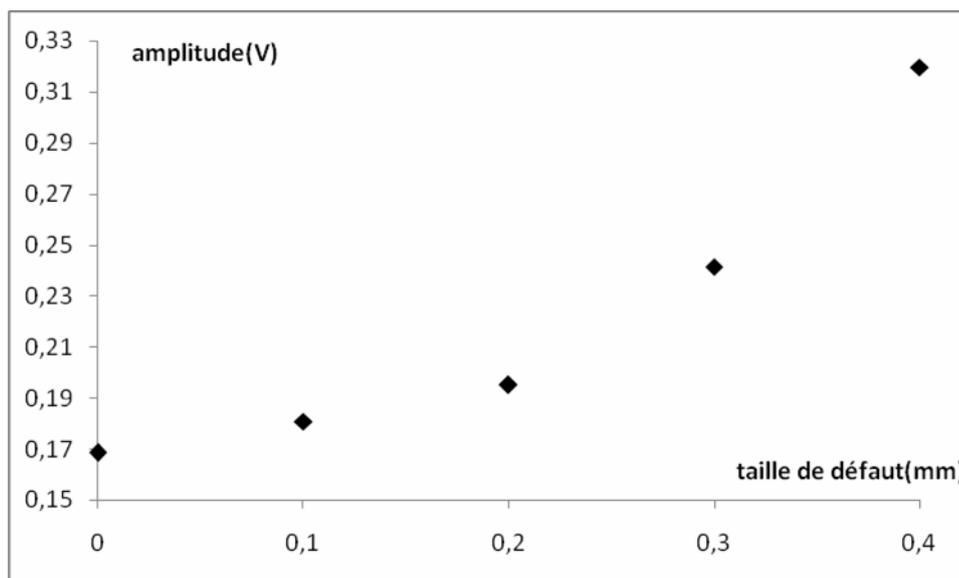


Figure 8-14: Signal CFP obtenue pour différents épaisseurs d'arrachement de la matière

Les acquisitions sont faites sur la face arrière de l'échantillon (figure 4.13). De la figure 4.14, on remarque que l'amplitude du signal CFP augment avec l'épaisseur de l'arrachement de la matière e

Défauts en rainure

Nous avons réalisé des défauts de différentes profondeurs sur une plaque d'aluminium 7075 d'un centimètre d'épaisseur. figure 4.15

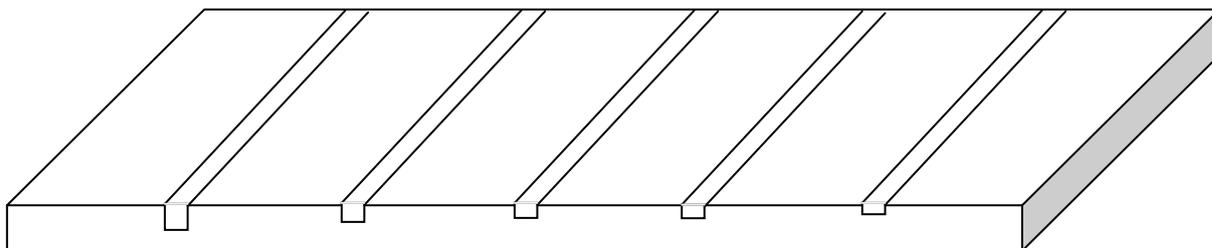


Figure 8-15: Défauts sous forme de rainure de profondeurs différentes

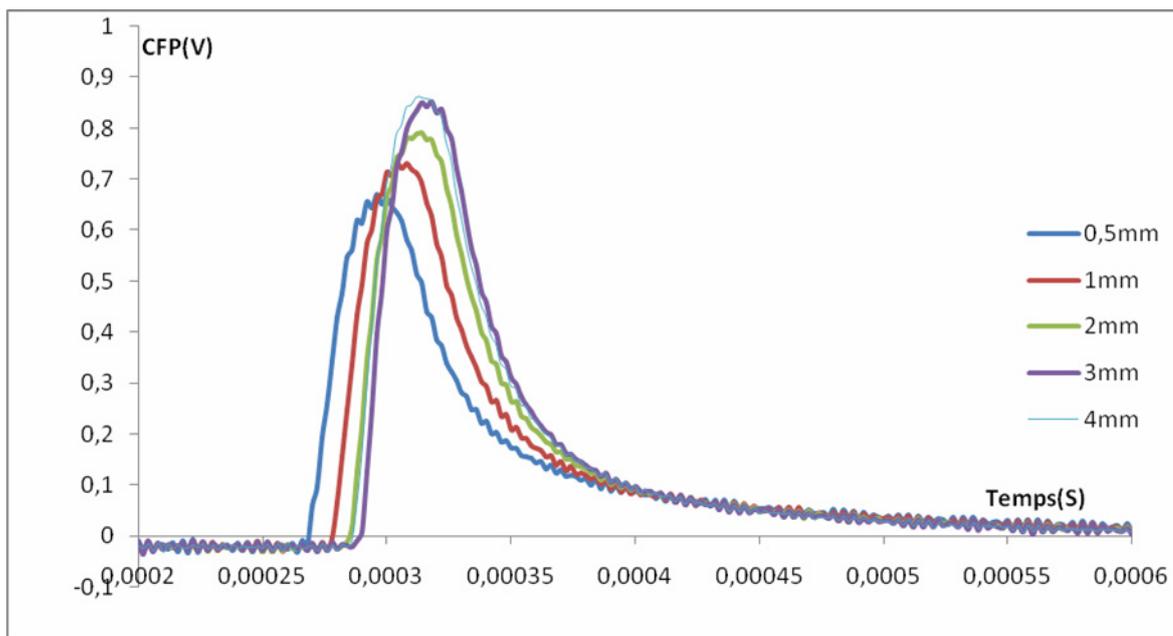


Figure 8-16:CFP sur les défauts

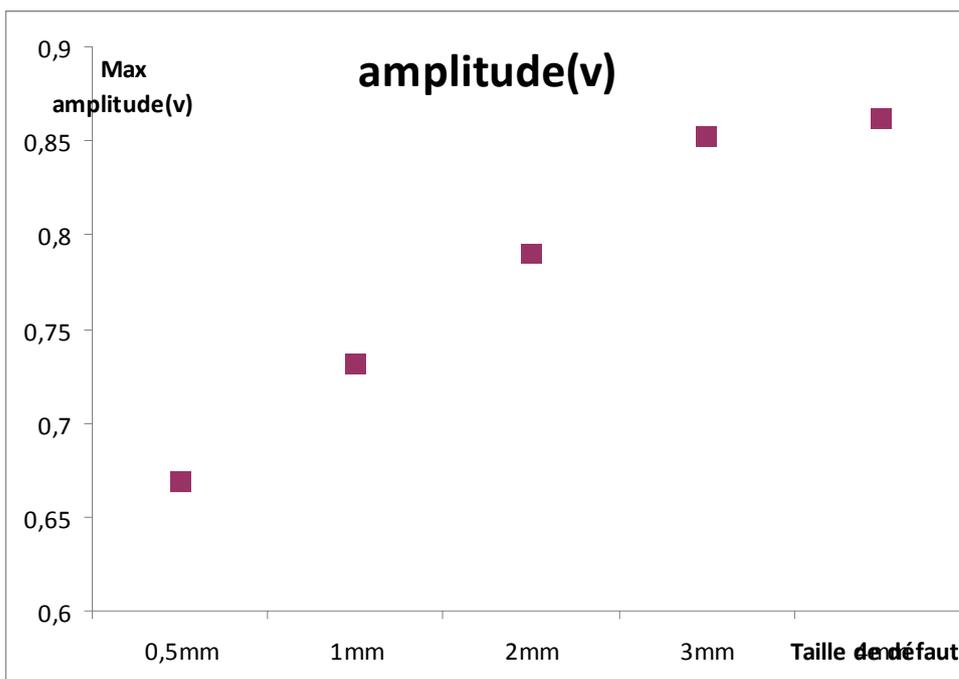


Figure 8-17:Maximum des CFP sur défauts

Le contrôle es réalisé sur le coté saint de la pièce (figure4.15) et comme on peut le constater l'amplitude du signal augmente avec la taille de défaut figures (4.16 & 4.17)

4.3.5 Contrôle des rainures en multicouches

Rainure en surface

A fin d'appliquer la technique des courant de Foucault pulse dans la détection des défauts en multicouches, on a réalisé une rainure de 1 /10 de mm de largeur, 1.5 mm de longueur et de 3mm de profondeur sur une tôle d'aluminium 7075 comme il est indiqué sur la figure 4.18 (échantillon1).

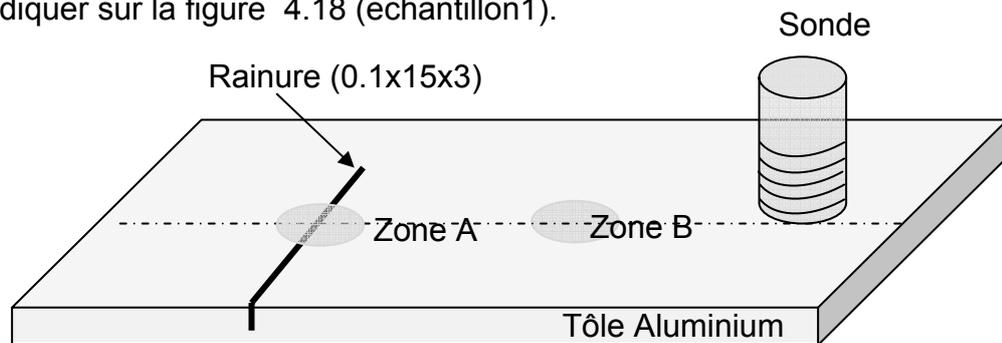


Figure 8-18: Echantillon 1, défaut réalisé sur une tôle d'aluminium.

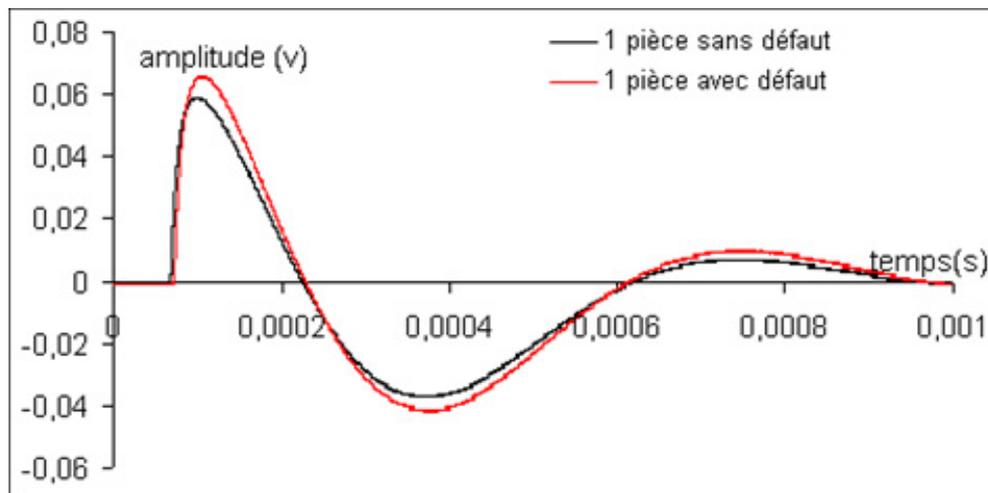


Figure 8-19: Signaux CFP obtenu sur l'échantillon1

De la figure 4.19 on peut constater que l'amplitude du signal CFP obtenue dans la zone A et plus important que celui acquis sur zone B.

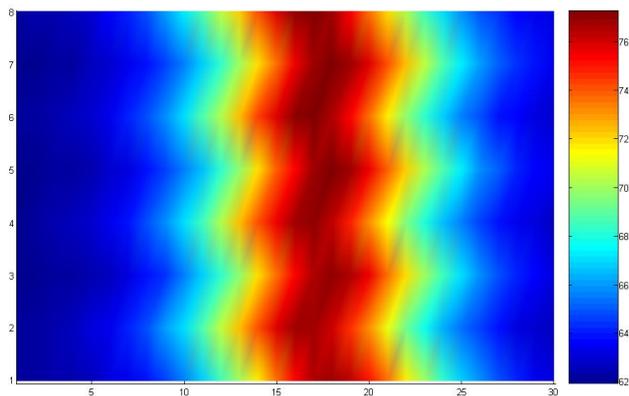


Figure 8-20:Représentation de la rainure en 2D

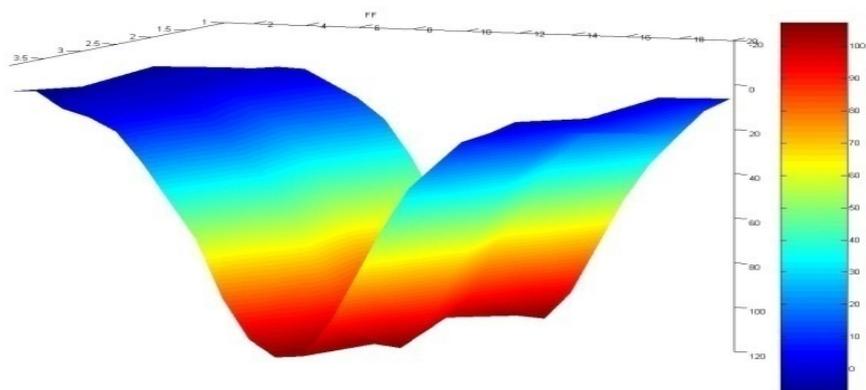


Figure 8-21:Représentation de la rainure en 3D

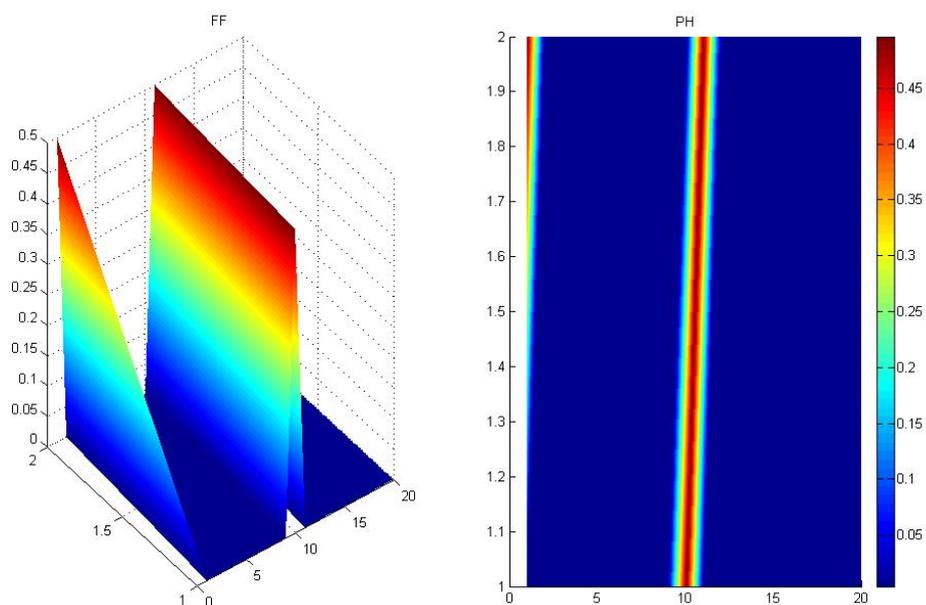
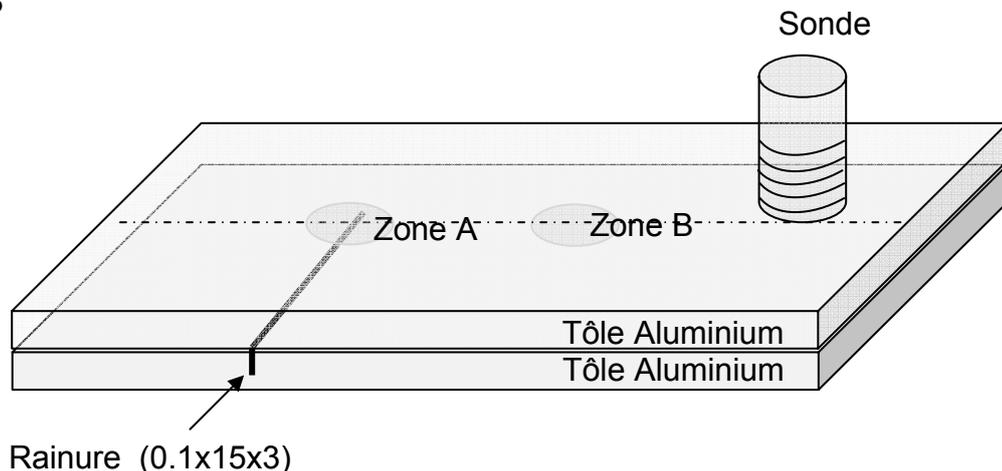


Figure 8-22:Image du défaut avec un seuillage

- A partir des figures 4.20 & 4.21 on constate que la largeur de la rainure en rouge est de 10 mm et la couleur devient de plus en plus sombre au centre,
 - avec un seuillage on peut déterminer la largeur de défaut qui est de 1 mm.et l'image est plus sombre au centre.
 - A partir de image en trois dimensions (figure 4.22) on peut constater que la rainure fait moins que 1 mm.
- Cette variation de largeur entre les figures(4.21 et 4.22) est due a l'effet de bord.

Détection de défaut en deuxième couche

De même que l'expérience précédente, nous avons ajouté une pièce d'aluminium 7075 de 3 mm d'épaisseur sur l'échantillon 1 comme il est indiqué sur la figure 4.23



Rainure (0.1x15x3)

Figure 8-23:Echantillon 2, ajout d'une tôle d'aluminium

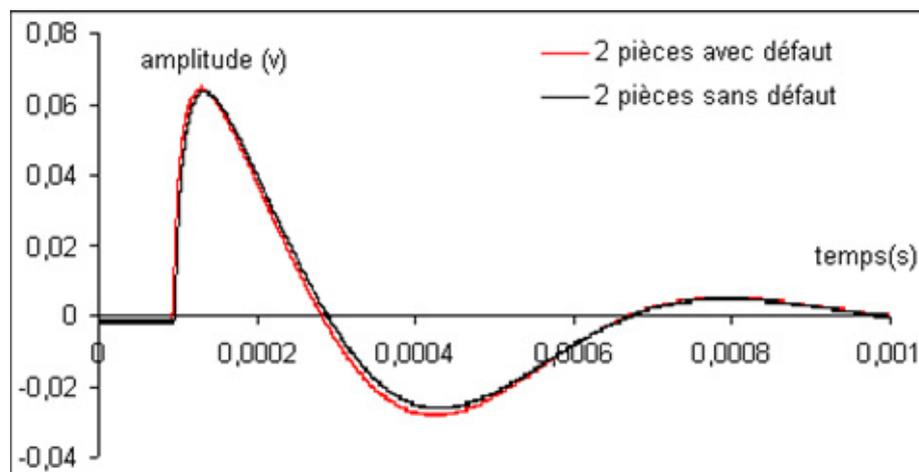


Figure 8-24:CFP sur l'échantillon 2

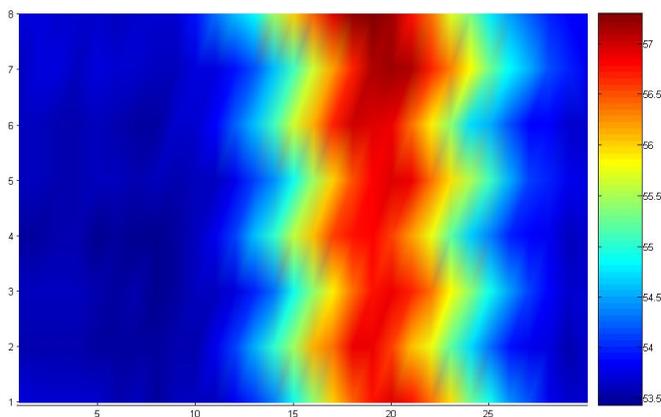


Figure 8-25: Représentation en deux dimensions du défaut en deuxième couche

De la figure 4.24, on remarque que l'amplitude du signal CFP obtenue dans la zone A et plus important que celui acquis sur zone B en deuxième couche.

Comme on peut le constater, le défaut est très net même en deuxième couche figure 4.25

Détection de défaut en troisième couche

De même que l'expérience précédente, nous avons ajouté une pièce d'aluminium 7075 de 3mm d'épaisseur sur l'échantillon 2 comme il est indiqué sur la figure 4.26

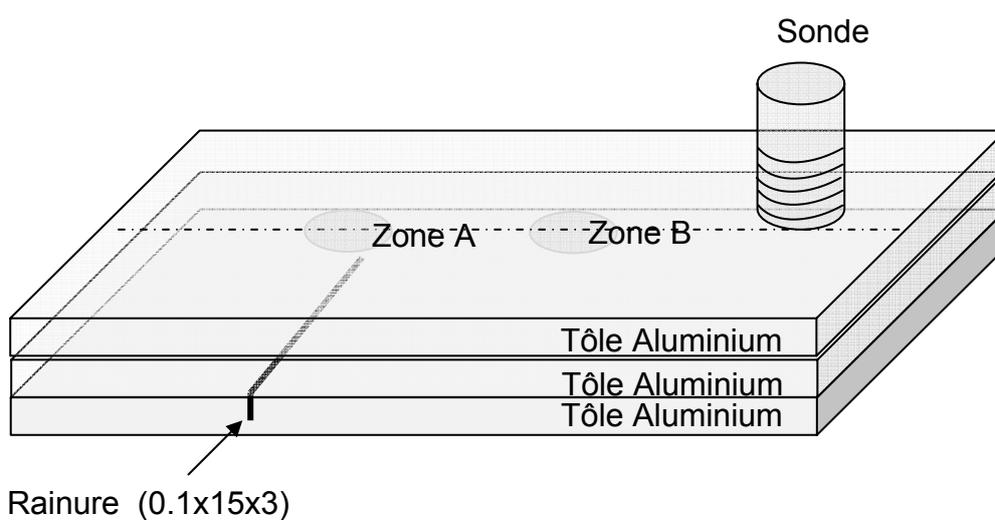


Figure 8-26: Echantillon 3, ajout de deux tôles d'aluminium.

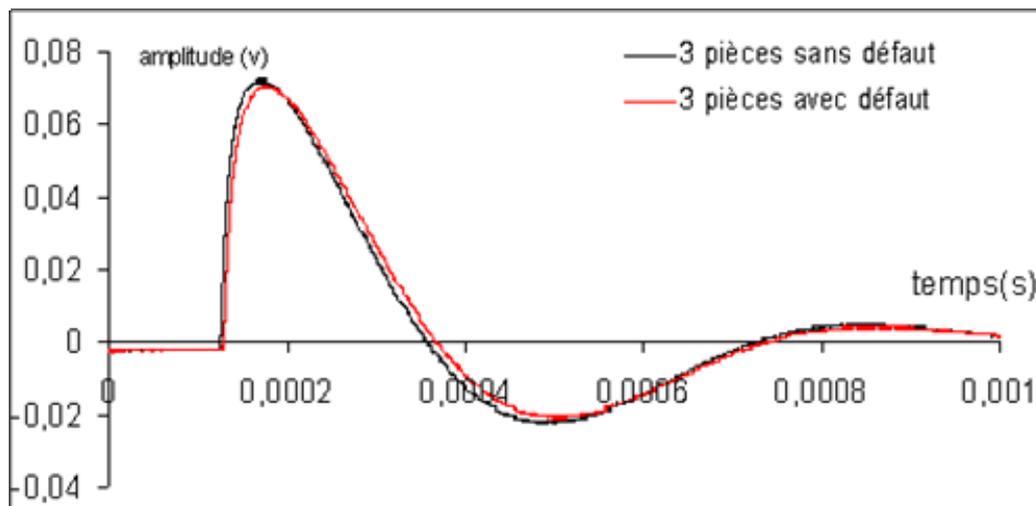


Figure 8-27: Signal CFP obtenu sur l'échantillon 3.

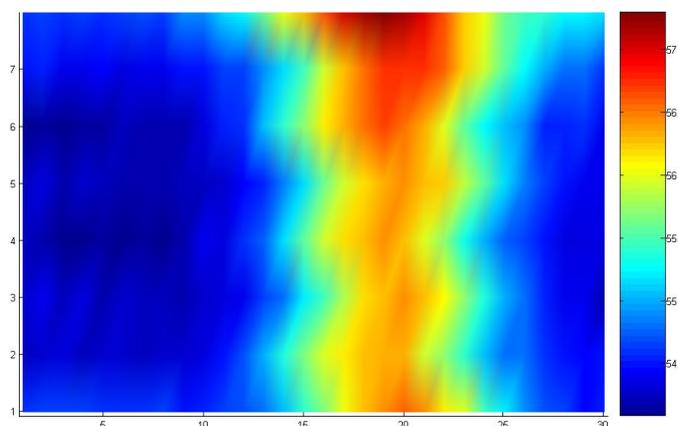


Figure 8-28: Représentation en deux dimensions du défaut de l'échantillon 3

On peut remarquer dans la figure 4.27 que la différence entre l'amplitude du signal CFP acquis sur la pièce avec défaut et celui acquis sur la pièce sans défaut est moins importante que dans le cas où le défaut est en surface.

Comme on peut le constater, la résolution des courants de Foucault pulsés diminue avec l'épaisseur de la pièce (figure 4.28).

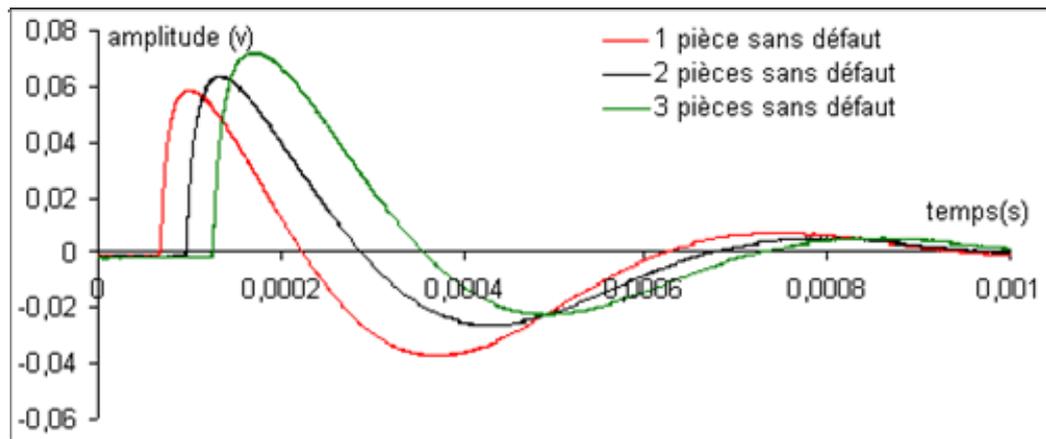


Figure 8-29:CFP dans le cas d'un ajout de tôles sans défauts

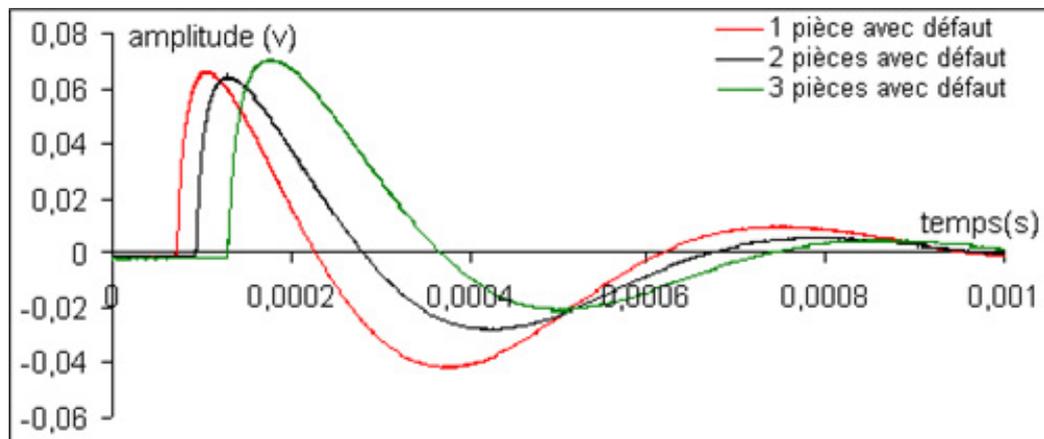


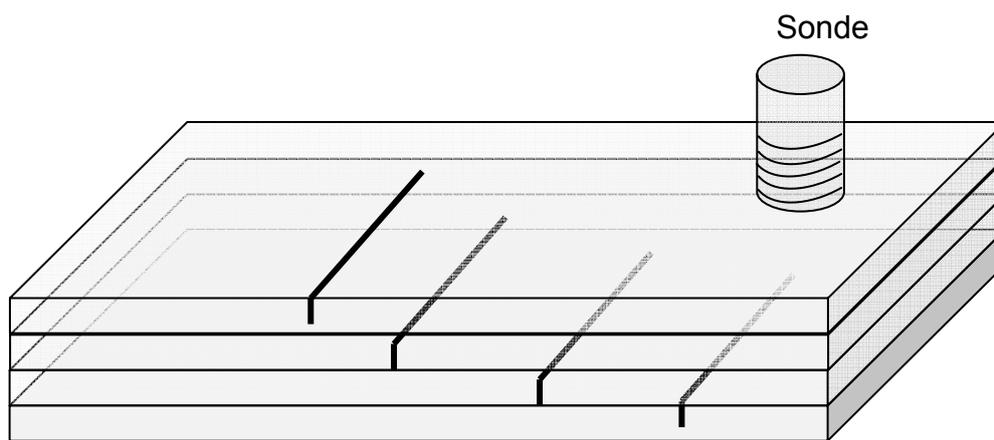
Figure 8-30: CFP dans le cas d'un ajout de tôles avec défaut

Les résultats obtenus figures (4.29 & 4.30) montrent que les signaux sont différents selon les épaisseurs et selon la présence du défaut.

La remarque la plus importante dans ces résultats c'est le déphasage entre les signaux.

En effet nous remarquons des graphes obtenus que l'influence des épaisseurs sur l'amplitude du signal est importante, pour cela on a réalisé l'expérience suivante.

Nous avons superposé les différentes plaques comme indiqué sur la figure 4.31



Rainures sur des tôles d'aluminium 7075 (0.1x15x3) mm

Figure 8-31:défauts en multicouches

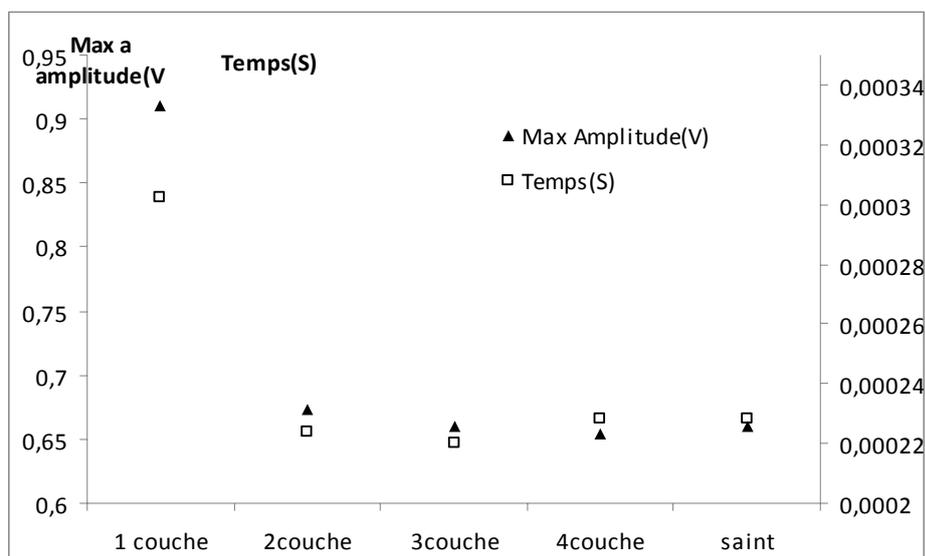


Figure 8-32:Maximum des CFP en fonction de position des défauts

Comme on peut le remarquer chaque fois on descend d'une couche l'amplitude du signal diminue et pour le défaut de surface le signal est décalé par rapport à ceux d'autre défauts.(figure 4.32)

Ajout d'un isolant électrique sur une tôle

Pour le contrôle des défauts qui peuvent exister sous un revêtement, On a pris la même pièce échantillon 1 que l'expérience précédente et on a ajouté une feuille de plastique comme revêtement, figure 4.33.

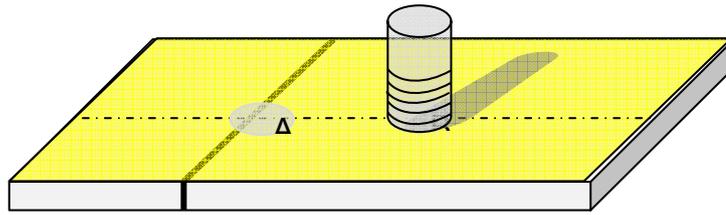


Figure 8-33: Un isolant sur une pièce d'aluminium

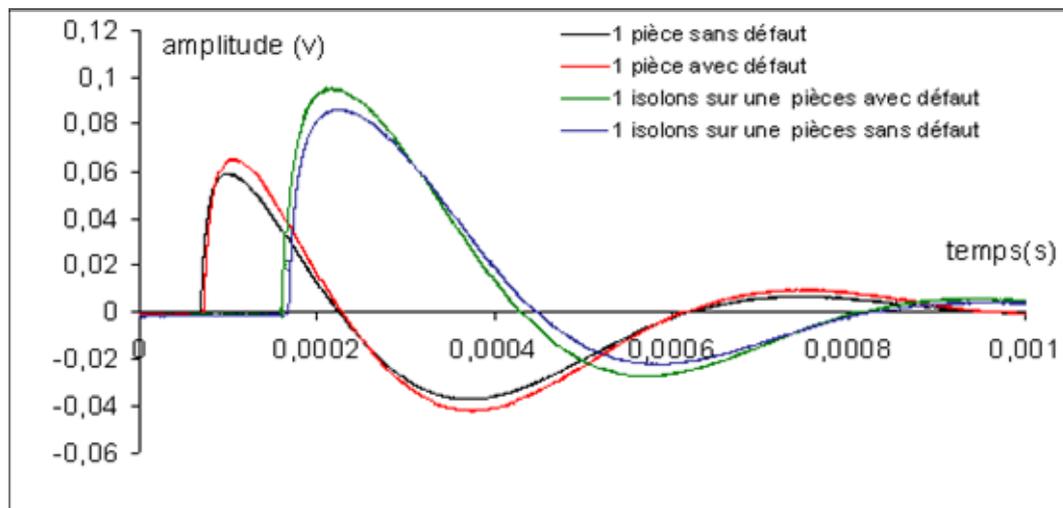


Figure 8-34: La réponse des CFP

De la figure 4.34 on constate que quelque soit avec un revêtement ou sans revêtement on peut facilement détecter notre rainure et l'amplitude de signal sur l'isolant et plus important par rapport a celui sans isolant qui est du a la distance entre sonde pièce, comme on peut constater que le déphasage est important.

Ajout d'un isolant entre deux pièces

On a pris les mêmes pièces échantillon 2 que l'expérience précédente et on a ajouté une feuille de plastique comme revêtement entre les deux pièces comme indique dans la figure 4.35.

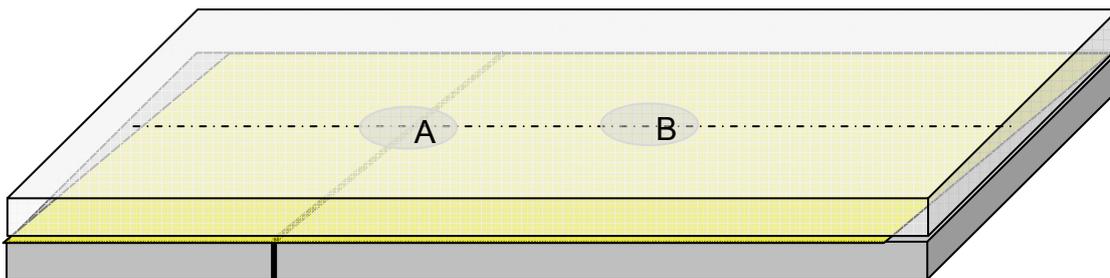


Figure 8-35:Un isolant entre deux pièces d'aluminium

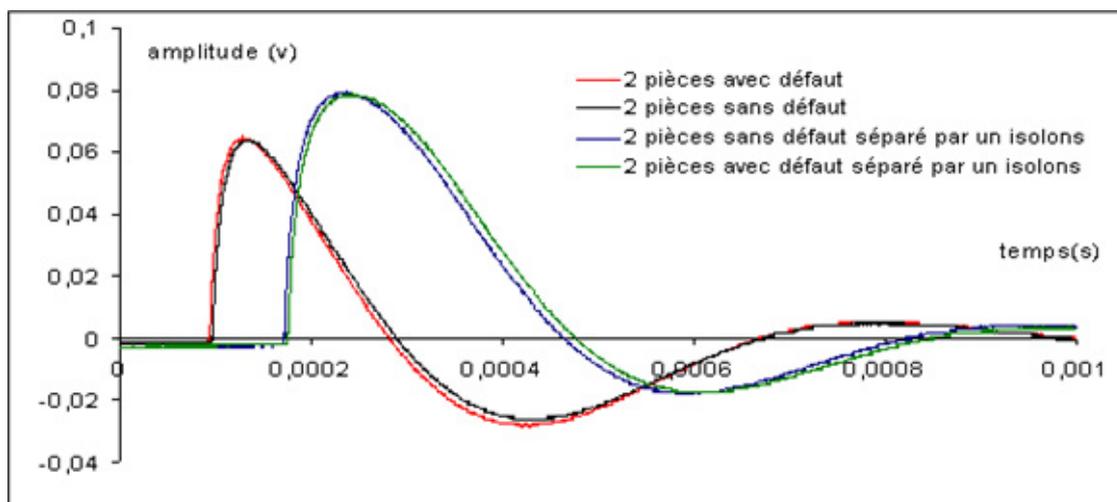


Figure 8-36:Réponse des CFP

De la figure 4.36 on peut détecter notre rainure et l'amplitude de signal sur l'isolant et plus important par rapport a celui sans isolant. Comme on peut constater que le déphasage est important.

4.3.6 Caractérisation des matériaux.

Une variation de structure dans le contrôle par courants de Foucault pulsés n'est qu'une variation de conductivité électrique ou de perméabilité magnétique ou des deux au même temps.

Pour cela et afin de déterminer la fusibilité de la technique des CFP dans l'évaluation des matériaux, nous avons étudié l'influence de la variation de conductivité électrique et de la perméabilité magnétique. On a utilisé pour cette étude plusieurs nuances de matériaux conducteurs ferromagnétique et non ferromagnétique.

Les résultats obtenus ont permis de faire un tri des matériaux conducteurs en deux catégories ferromagnétique et non ferromagnétiques. Comme on peut classer ces matériaux suivant leurs conductivités électriques.

L'utilisation des outils de traitement du signal nous a permis de préciser la taille de défaut en longueur et en largeur en réduisant l'effet de bord.

Etude de la variation de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique

Pour l'étude de la variation de la conductivité électrique et la perméabilité magnétique, nous avons choisi une série de matériaux conducteurs ferromagnétiques et non ferromagnétiques comme indiqué dans le tableau 4.1 page

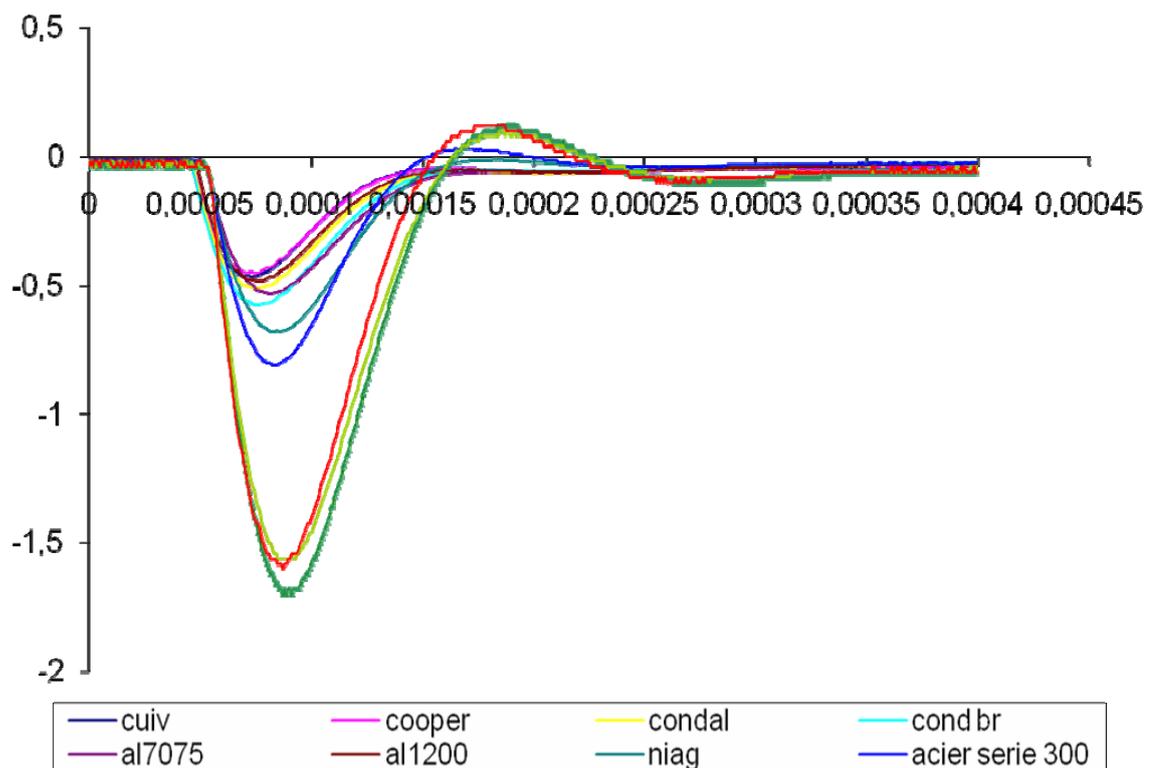


Figure 8-37: Etude de la variation de la conductivité électrique

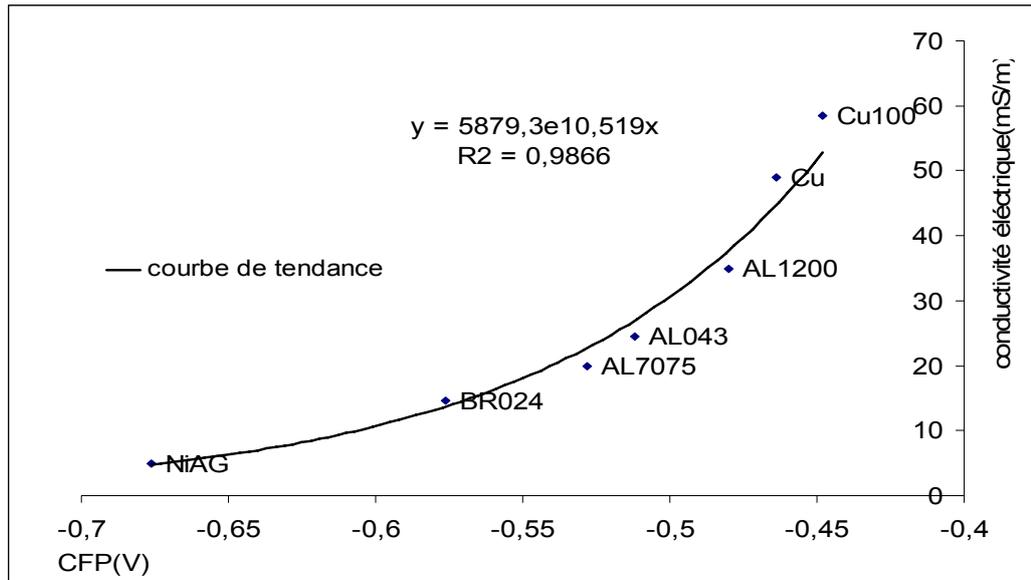


Figure 8-38: Etude de la variation de la conductivité électrique (Aluminium 7075, Cuivre, Aluminium 1200 et NIAG)

De la figure 4.38, on peut remarquer que l'amplitude des CFP varie en inverse avec la conductivité électrique. Comme on peut le constater ; la relation entre les CFP et la conductivité électrique est de forme exponentielle

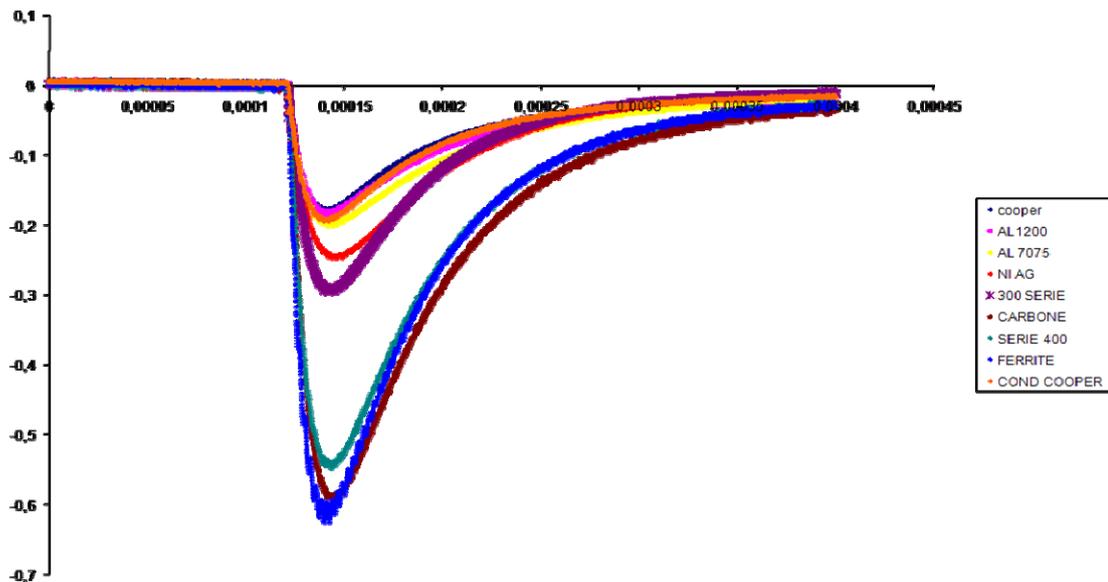


Figure 8-39: Signal CFP trie des différentes nuances

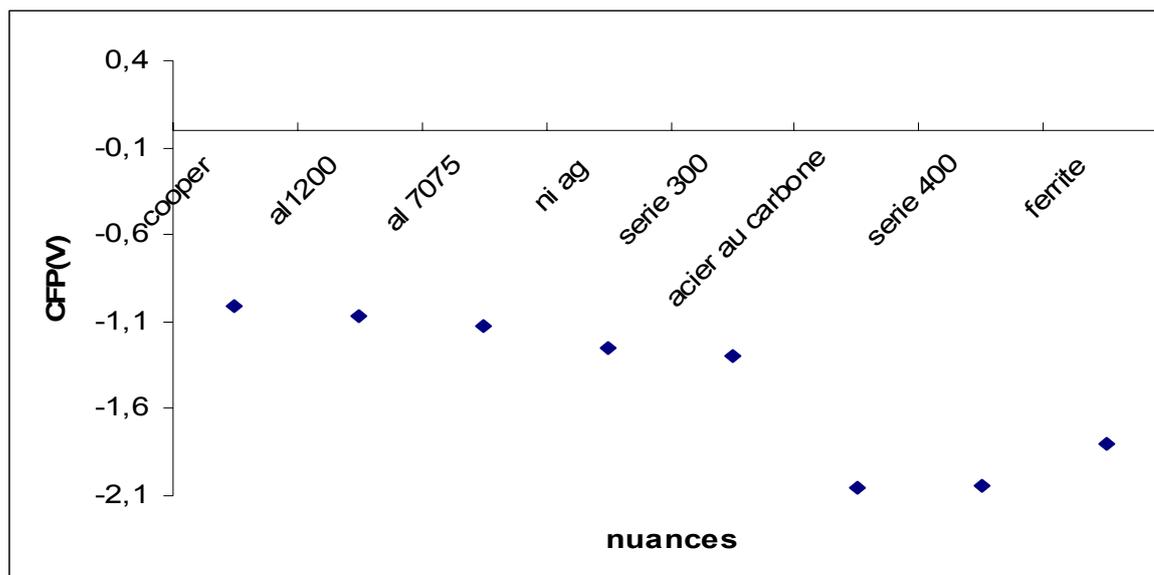


Figure 8-40: Trie des différentes nuances

Comme on peut remarquer dans les figures (4.39 & 4.40); on distingue familles, les matériaux non ferromagnétiques et des ferromagnétiques. Ces derniers jouent le rôle d'un amplificateur de champs magnétique, donc l'amplitude du signal augmente avec augmentation de la perméabilité magnétique

Caractérisation par les courants de Foucault pulsé de l'acier 16NC6 cémenté à différentes épaisseurs.

Nous nous intéressons dans notre cas à l'acier au nickel-chrome 16NiCr6, présent un grain fins et à basse teneur en carbone. Sa composition chimique est présentée dans le tableau 4.3 .On a réalisé une cémentation pour avoir un profile de différente épaisseur.

Tableau 8-2:Composition chimique de l'acier 16NiCr6

	C%	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	P %	S %
16NiCr6	0,12-0,17	0,6-0,9	0,1-0,4	0,9-1,4	1,2-1,5	0,35	0,35

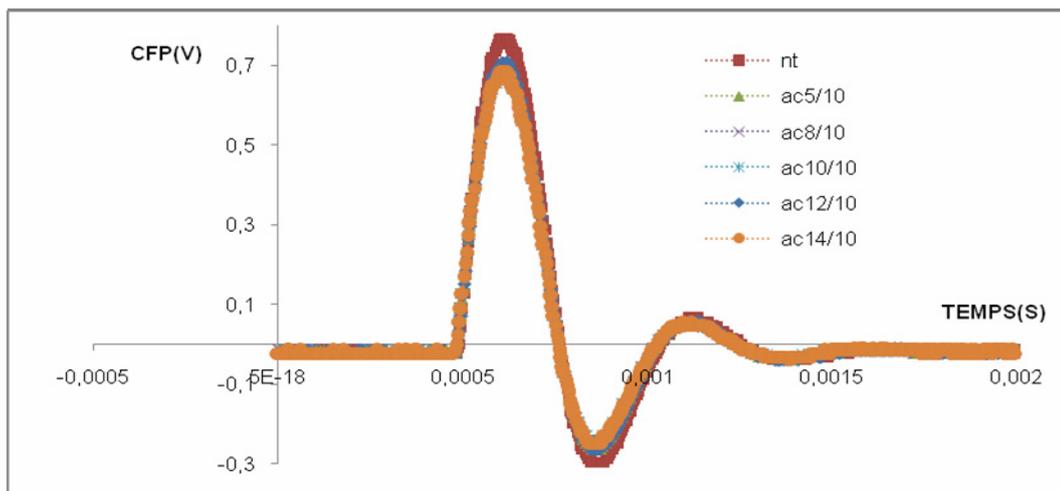


Figure 8-41:Signal CFP sur les différentes. Pièces cémentées

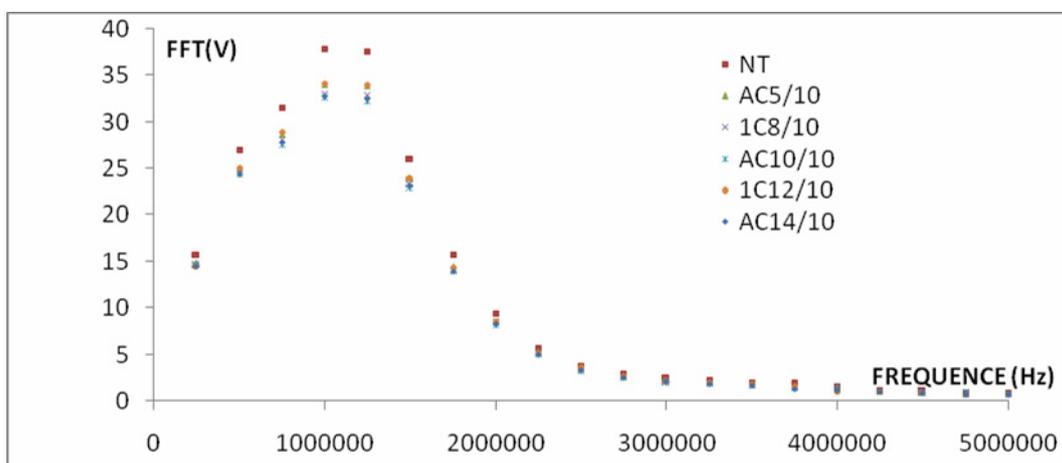


Figure 8-42:La FFT du signal CFP sur les différentes

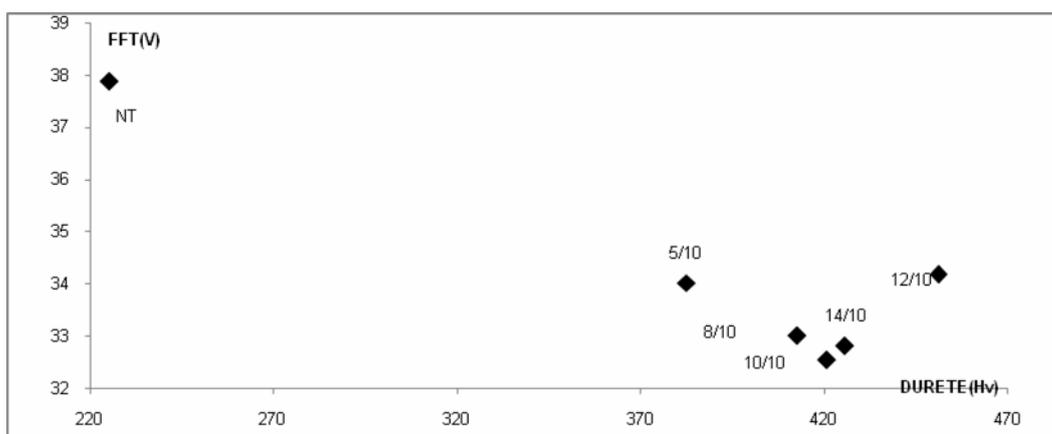


Figure 8-43:La variations de la FFT en fonction de la dureté

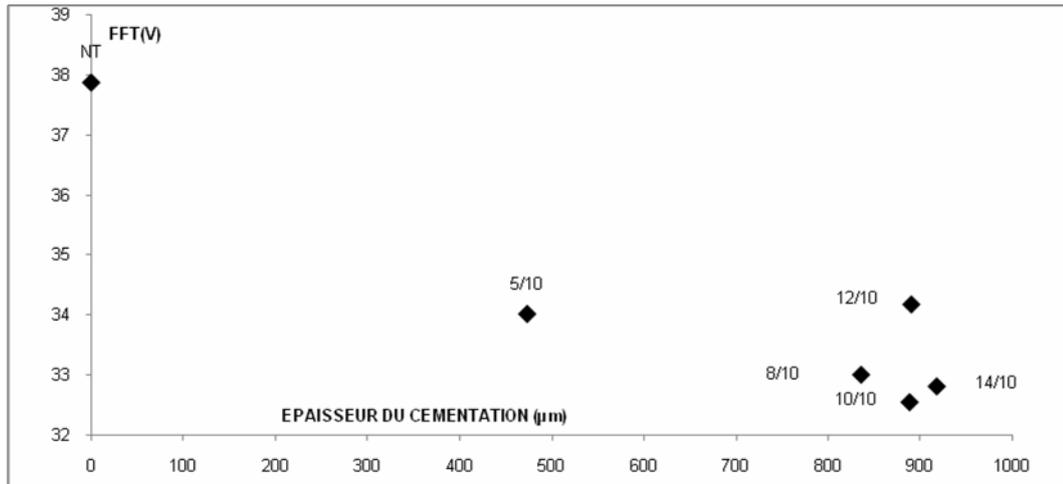


Figure 8-44: La variations de la FFT en fonction de l'épaisseur de cémentation

Les résultats obtenus (figures 4.41 & 4.42) montre que les informations régis par le contrôle des pièces cémentées par le CND par PEC sont en relation avec les variations qu'a subit le 16NC6.

A partir des figures 4.43 & 4.44, Nous remarquons que les amplitudes varient suivant les épaisseurs de cémentation, l'évolution des courbes en fonction des épaisseurs de cémentation ou de dureté sont différentes, suit une trajectoire bien déterminé.

Analyse par CFP des pièces en aluminium 7075

Une micro dureté a aussi été réalisée sur chaque échantillon traité pour une comparaison ultérieure aux tests non destructif.

Pour cela nous avons opté pour approche expérimentale qui est la suivante :

Nous avons choisi pour notre étude l'Aluminium comme matériau non ferromagnétique. Les des échantillons utilisés sont de dimension 50x50x3 mm, de nuance 7075 très utilisés dans le domaine aéronautique. Ils ont été prélevés sur la même tôle de façon à obtenir la même structure. Les pièces réalisées ont été soumises à une procédure expérimentale définie de façon à obtenir différente microstructure et différente modification de caractère métallurgique dans le matériau. Ces échantillons ont été chauffés et maintenus à une température de 350 degré Celsius, pendant des temps variables. Une partie de ces échantillons a été refroidie à l'air et une autre partie a été refroidie à l'eau (trempé).

Une partie des échantillons refroidis à l'air et une partie des échantillons trempés ont subi une attaque électrochimique dans le but d'accélérer le processus de corrosion et de vérifier l'influence de l'aspect traitement thermique sur la corrosion. Les méthodes de contrôle non destructif sont des méthodes comparatives, nous avons laissé deux échantillons à l'état de réception c'est-à-dire sans traitement thermique. Un de ces échantillons a subi une attaque corrosive. L'échantillon n'ayant subi aucun traitement sera pris comme référence (Tableau 4.2).

Tableau 8-3: Echantillon d'aluminium 7075

Temps de maintien (min)	Non traité	15	30	45	60	75	90	120
Refroidi à air Non corrodé	X			x	x	x	x	x
Refroidi à eau Non corrodé	X			x	x	x	x	x
Refroidi à air corrodé	X	x		x	x	x		
Refroidi à eau corrodé	X	x	x	x	x	x	x	x

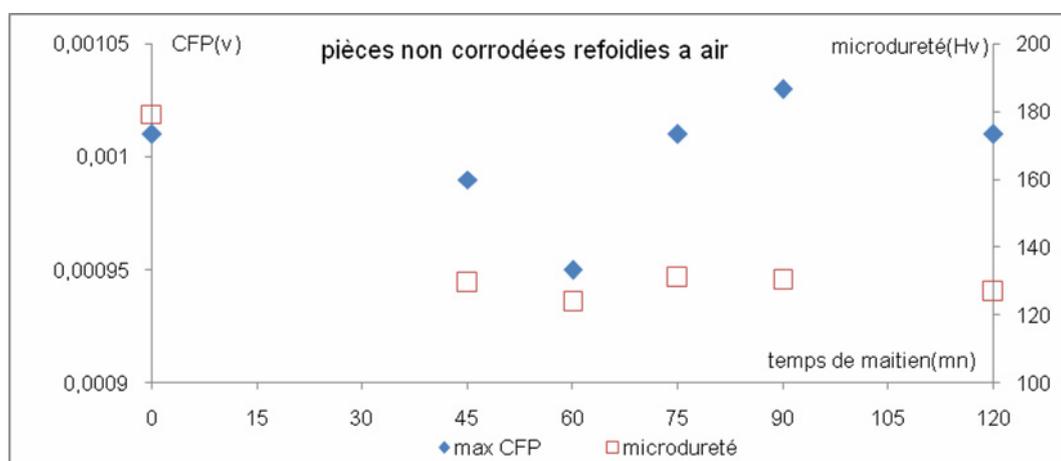


Figure 8-45: La variation de CFP et de la microdureté des pièces refroidies à air non corrodées

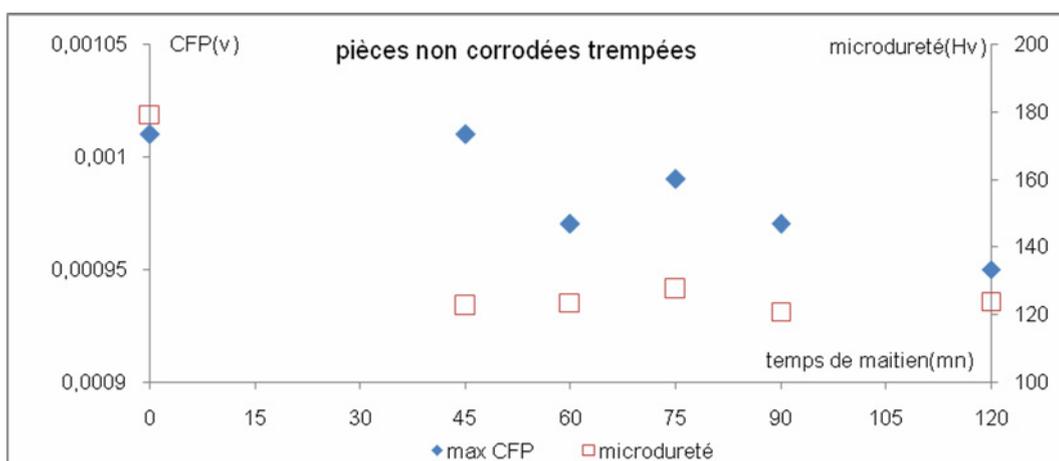


Figure 8-46: La variation de CFP et de la microdureté des pièces trempées non corrodées

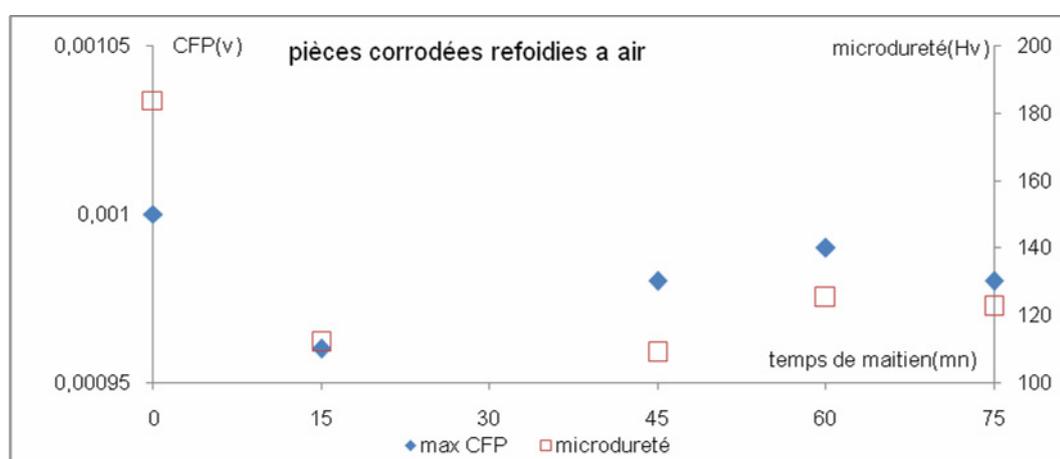


Figure 8-47: La variation de CFP et de la microdureté des pièces refroidies à air corrodées

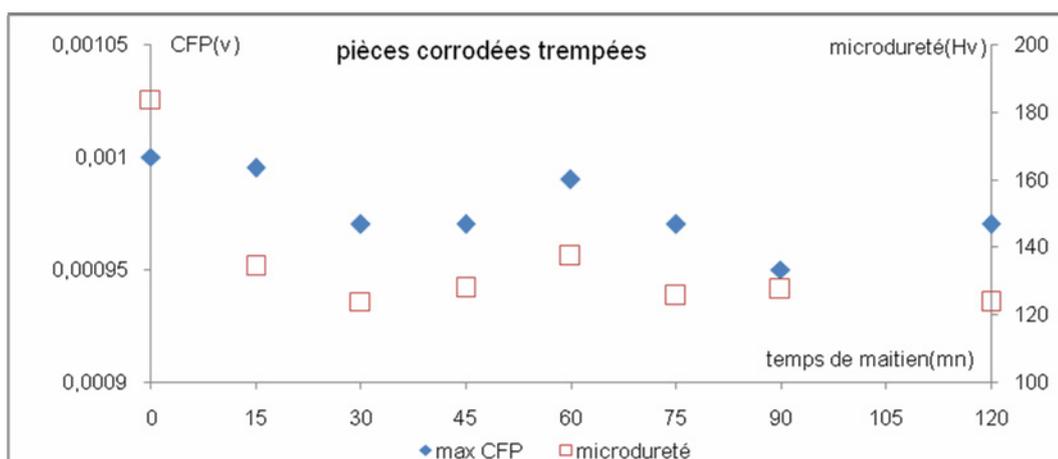


Figure 8-48: La variation de CFP et de la microdureté des pièces trempées corrodées

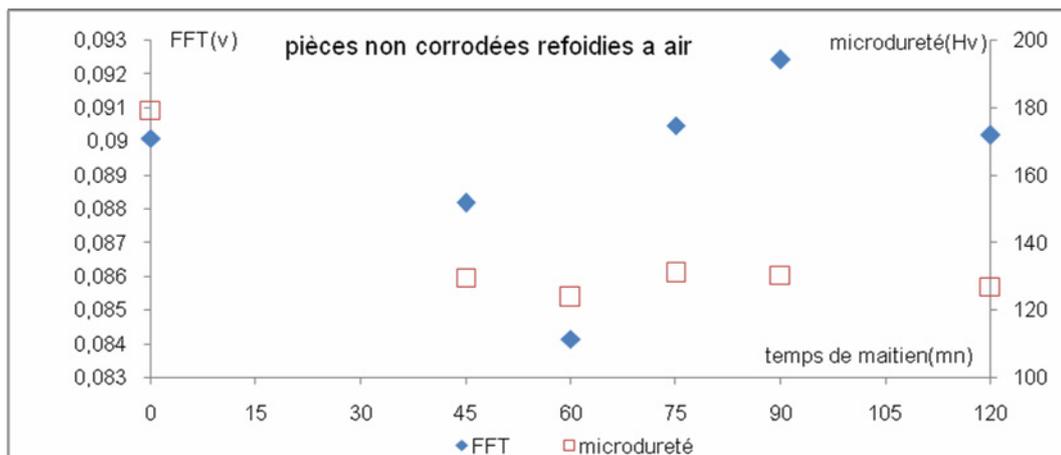


Figure 8-49: variation de la FFT de signal CFP et de la microdureté des pièces refroidies à aire non corrodées

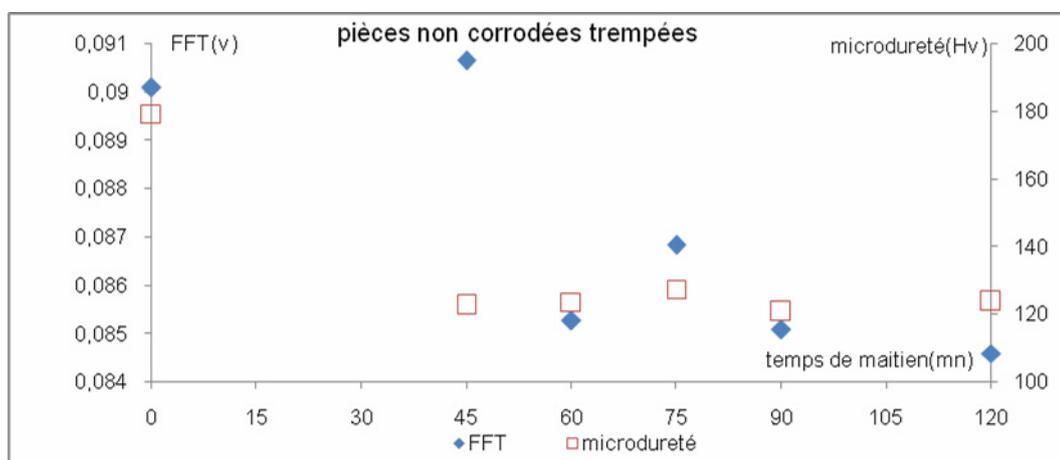


Figure 8-50: variation de la FFT de signal CFP et de la microdureté des pièces trempées non corrodées

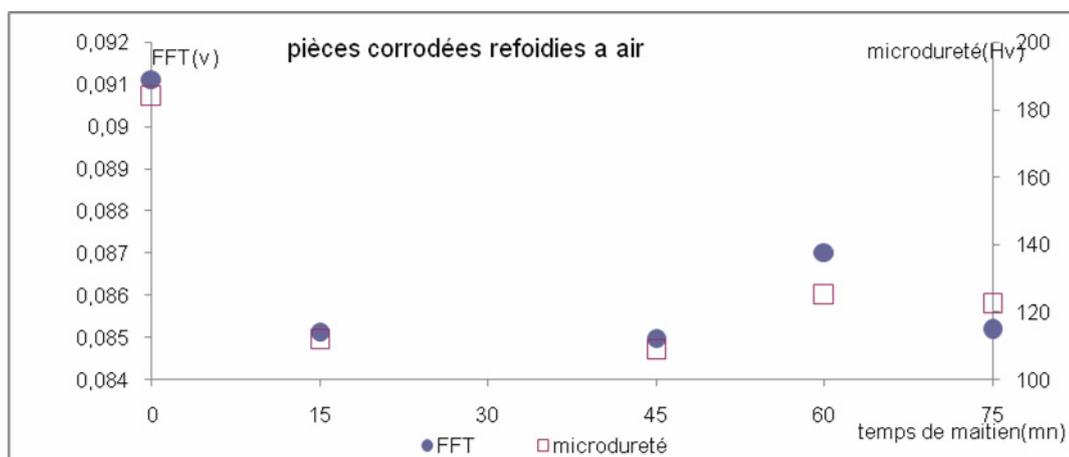


Figure 8-51: variation de la FFT de signal CFP et de la micro-dureté des pièces corrodées refroidies à aire

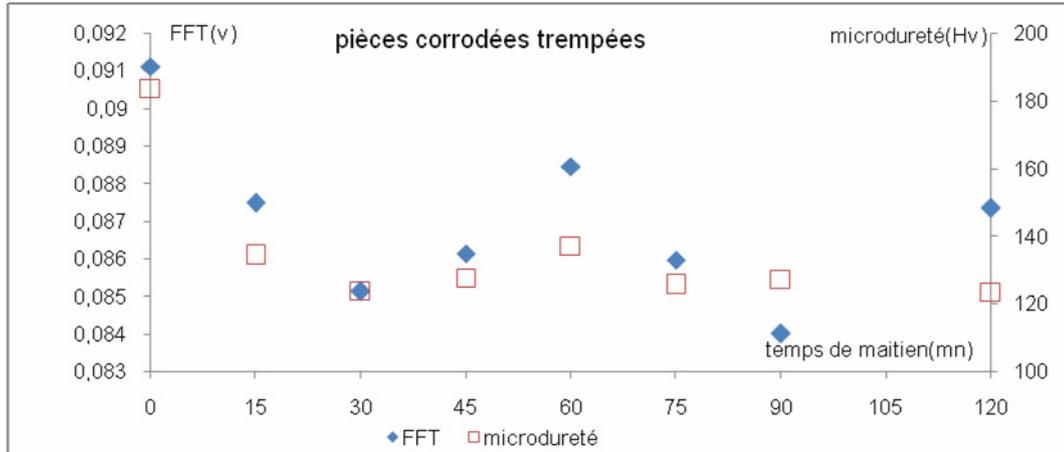


Figure 8-52:variation de la FFT de signal CFP et de la micro-dureté des pièces corrodées trempées

Le contrôle des pièces d'aluminium ayant subit des modification microstructurale voir tableau (4.2) et des figures(de 4.45 à 4.50) montre que l'évolution des résultats obtenus par CFP et micro dureté est la même. Nous remarquons qu'à travers les amplitudes des pic en fonction du temps de maintien la trajectoire des courbes CFP est la même que celle de la micro dureté.

Cette remarque est plus net pour les échantillons corrodés (figures 4.51 & 4.52). Les résultats obtenus confirment l'évolution des pics d'amplitude en fonction de temps de maintien pour ces pièces.

CONCLUSION

Le contrôle et l'évaluation non destructifs par procédé magnétique des matériaux sont très sollicités par 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, la technique de contrôle par courants de Foucault et par les courants de Foucault pulsé tient par sa sensibilité une place importante qui la sollicite pour résoudre des problèmes complexes dans le nucléaire, l'aérospatiale et la construction navale.

Dans le contrôle par courant de Foucault, le système de mesure est très important, en effet il apparaît, après étude des différents types de sondes à géométrie différente qu'il est nécessaires de souligner que le succès d'une recherche et la faisabilité d'une application donnée dépend de la conception de la sonde, de telle sorte que celle ci soit le mieux adapté au problème considéré.

L'étude relative entreprise dans la réalisation des sondes a permis d'optimiser certains de ces paramètres. Chaque contrôle et mesure effectués par cette technique nécessitent l'emploi d'une sonde appropriée.

La réalisation de sondes de contrôle par courants de Foucault a été satisfaisante au vue des résultats de teste et de contrôle d'échantillon. 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. Les résultats obtenus par la sonde

avec un noyau en ferrite, nous permettent de conclure que la sensibilité augmente et l'influence du champ latéral est minimisée de façon notable.

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 CFP et de visualisation des signaux et la représentation des défauts en images C-Scan. Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans la pratique du contrôle industriel.

Ce travail a permis une étude par voie non destructive sur l'état métallurgique, sur la qualité des transformations subies par des matériaux conducteurs. On a utilisé l'alliage d'aluminium 7075 pour les matériaux non ferromagnétique et l'acier de nuance 16NC6 comme matériau ferromagnétique. Ces échantillons ont été soumis à de forte température à des différent temps d'exposition, de trempe et de corrosion.

L'évaluation non destructive par les courants de Foucault a révélé que le signal CFP est influencé par le caractère métallurgique du spécimen. Les expérimentations réalisées et les résultats obtenus ont montré que l'analyse par les courants de Foucault pulsé peut être corrélée avec l'évolution des propriétés métallurgiques. Toute modification métallurgique de la structure entraîne des variations simultanées de la conductivité et de la perméabilité. Ce qui a été montré par l'étude comparatif avec les micro-duretés.

Le travail que nous avons présenté à pour objectif d'évaluer et d'optimiser les paramètres de contrôle de la technique de contrôle par les courants de Foucault pulsés. Les résultats obtenus expliquent le comportement des courants de Foucault pulsés et l'influence des différents paramètres électromagnétiques sur le contrôle. La technique permet la mesure du revêtement, la détection des défauts en 2ème et 3ème couche qui n'est pas possible par les autres méthodes de contrôle non destructif.

Contrairement aux courants de Foucault classique ou la pénétration ne dépasse pas les 2 mm, les courants de Foucault pulsés atteignent une profondeur supérieure à 10mm.

La dimension des défauts a été déterminée dans un conducteur, sans être influencés par les paramètres magnétiques. La décroissance du champ magnétique en présence des différents milieux est confirmée pour les courants de Foucault pulsés, cette décroissance est à exploiter pour la mesure du revêtement isolant ou conducteur non ferromagnétique. L'analyse et le traitement du signal CFP a permis d'améliorer la qualité du signal échantillonnée. Les résultats obtenus par le traitement d'image C-scan, élaboré permettent de visualiser les défauts et le caractériser par la suite.

Le contrôle des matériaux par courants de Foucault pulsés est importante pour détecter des défauts en profondeur et en multicouche très intéressant en Aéronautique. Cette technique permettrait aussi mesurer ou contrôler sans arrêt de l'appareil (inspection in service) et donc un gain économique important.

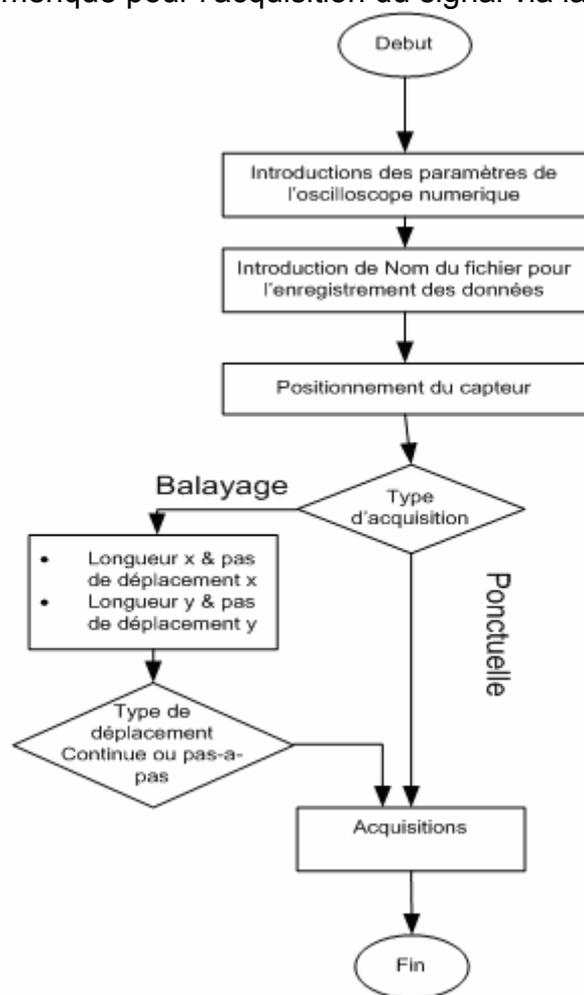
APPENDICE A : LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

CND :	Controle Non Destructif
CFP :	courants de Foucault pulsés
CF :	courants de Foucault.
J :	Amplitude des courants a une profondeur x.
J0 :	Amplitude des courants a la surface.
δ :	Profondeur standard (mètre m)
f :	Fréquence de contrôle (Hz)
μ_r :	Perméabilité relative (sans unité)
σ :	Conductivité (siemens/mètre s/m)
τ_0 :	Coefficient de décroissance de l'impulsion u (t).
Vs :	la tension d'excitation
$N(\rho, z)$:	Densité de courant
ρ', ρ :	Rayon
z', Z :	hauteur
J1 :	fonction de Bessel du premier ordre
$\Gamma(k, s)$ et $T(k, s)$	Les coefficients électriques transversaux de réflexion et de transmission
a_1 :	Le rayon externe de la bobine.
a_2 :	Le rayon interne de la bobine.
2b :	Longueur de la bobine.
h :	La distance entre le centre de la bobine et la surface du conducteur
H_0 et H_1 :	fonctions de Struve.
$B(d_i, p)$:	champ magnétique
R :	Résistance
L :	Inductance.
C :	condensateur

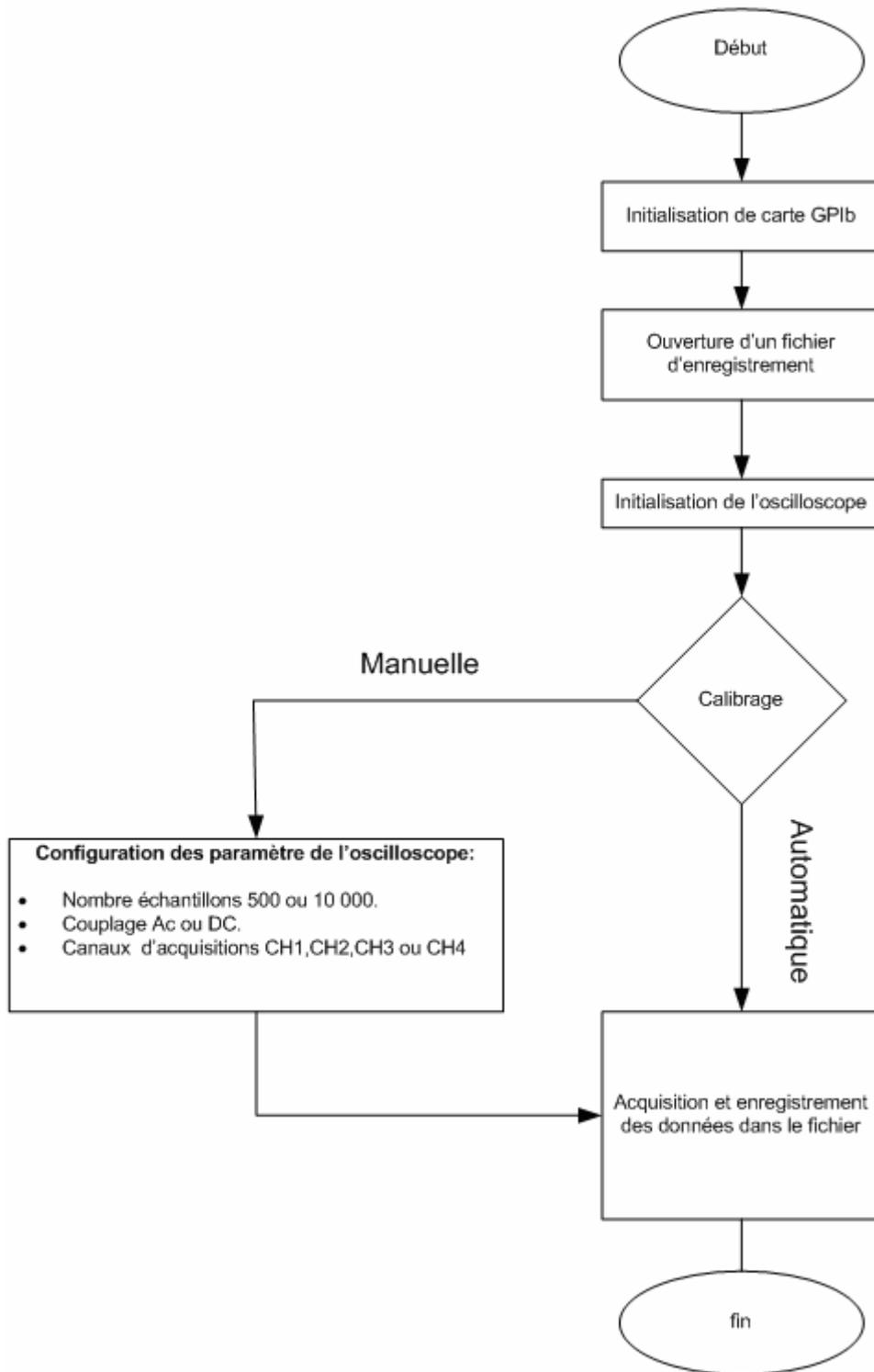
RC :	filtre
RLC :	filtre
Q :	la charge du condensateur
α :	le coefficient d'amortissement
$ X(f) $:	Spectre d'amplitude.
$\arg(X(f))$:	Spectre de phase.
TF :	transformé de Fourier.
FFT :	Fast Fourier Transform
TFD :	Transformation de Fourier Discrète
TFR :	Transformation de Fourier Rapide
f :	fréquence
w :	la pulsation d'oscillation

APPENDICE B : B. Organigramme de programmation

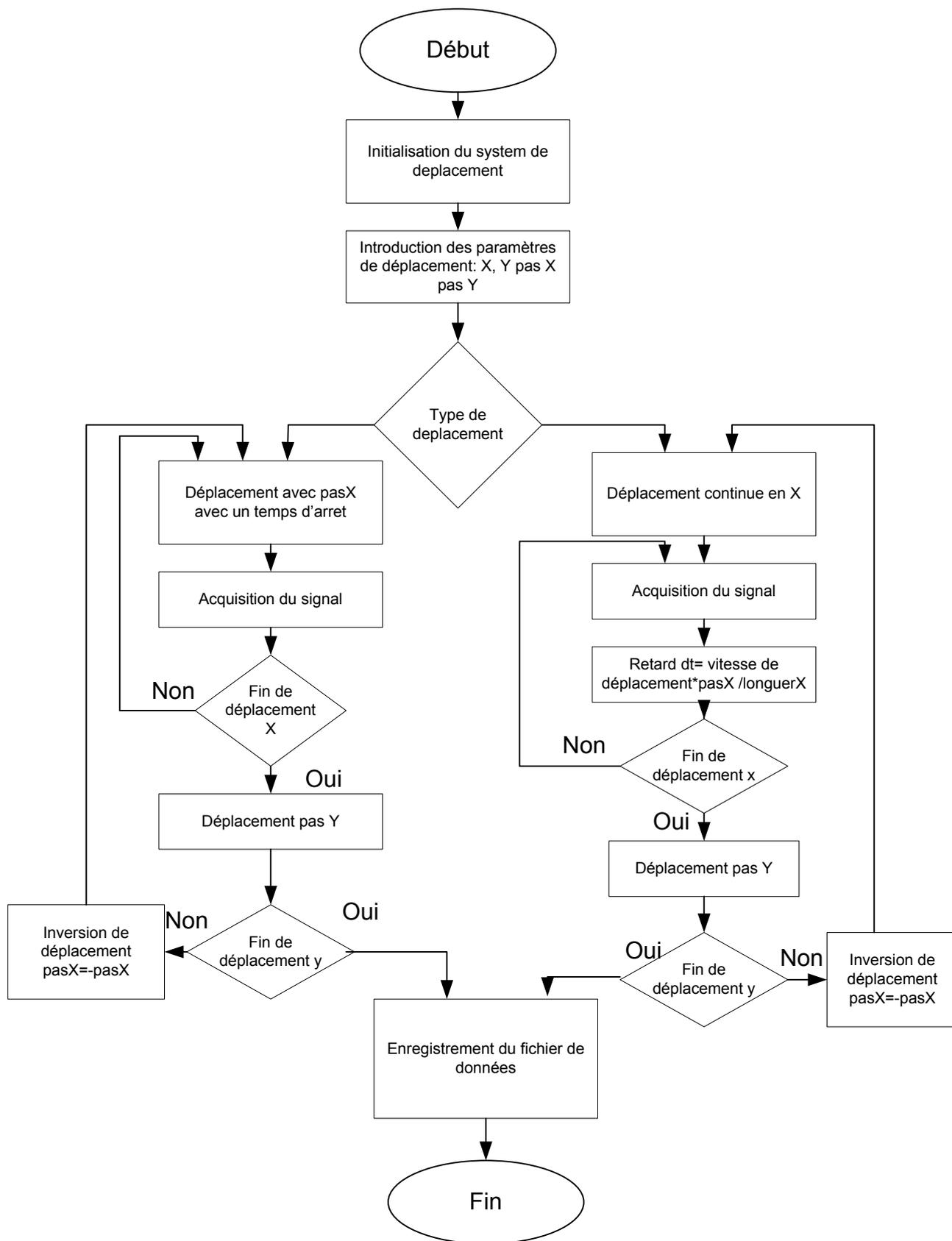
Dans cet appendice nous allons donner les organigrammes de notre programme d'automatisation de la chaîne de mesure qui permet de commander l'oscilloscope numérique pour l'acquisition du signal via la carte GPIB et la table de déplacement



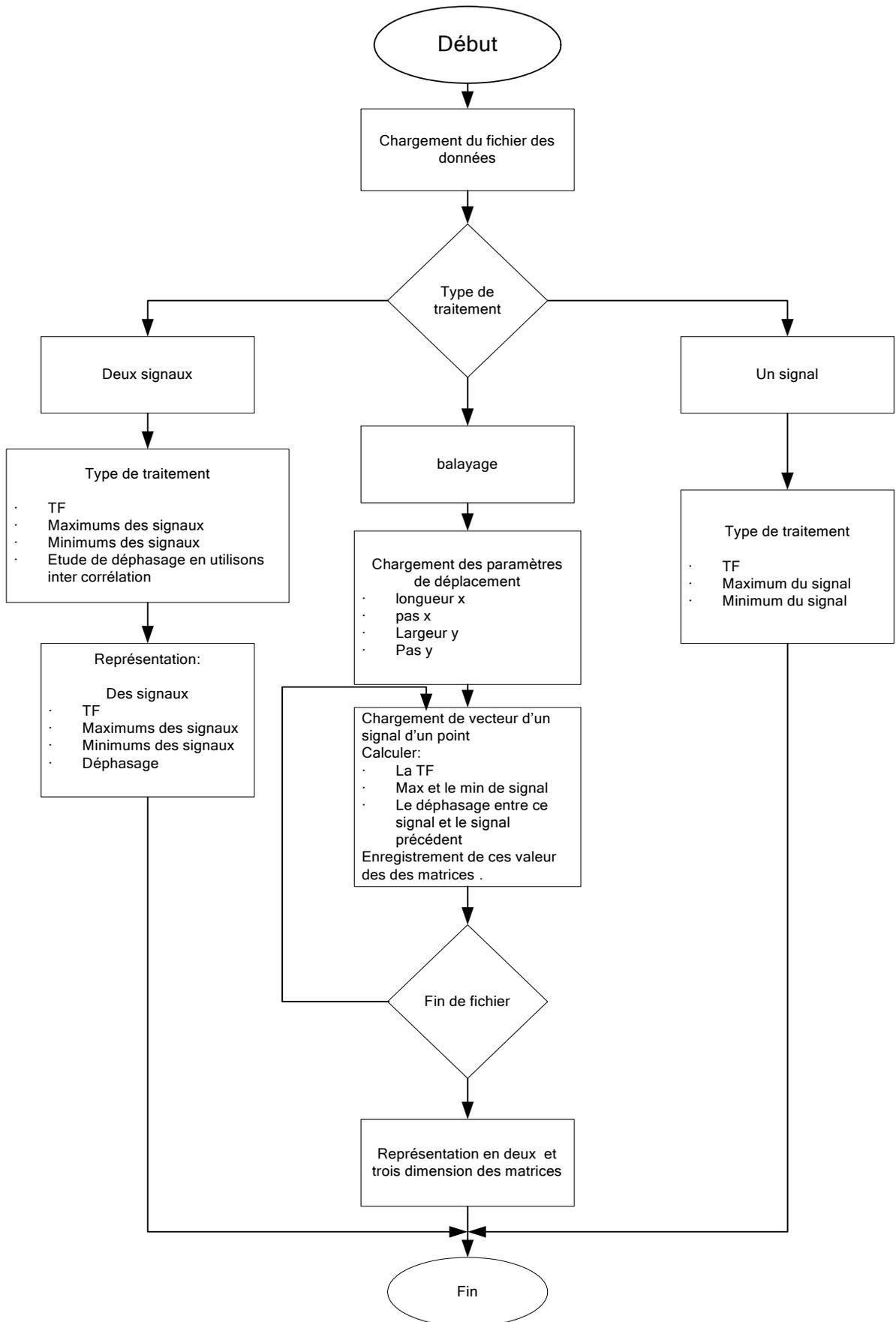
Organigramme général du système de déplacement et d'acquisition



Organigramme de système de communication et de commande de l'oscilloscope numérique TDS3054



Organigramme du système de déplacement



Organigramme de programme de traitement des données

REFERENCES

1. Advanced manual for eddy current test method.
Canadian general standards Board, CAN/CGSB-48.14-M86,
2. N.D.T EXPERT BOOK Electromagnetic testing, Edition 2000.
3. John Bowler et Marcus Johnson Pulsed Eddy-Current Response to a Conducting Half-Space IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 33, NO. 3, MAY 1997
4. K. Halbach, Some Thoughts on an Eddy Current Septum Magnet, Light Source Note LS-244, Argonne National Laboratory (1994)
5. Gary L. Burkhardt and Jeffrey S. Stolte Magnetic sensor for measurement of stainless steel cladding thickness Southwest Research Institute NDE Science and Technology Division P. O. Drawer 28510 San Antonio, Texas 78228-0510, 2000
6. Théorie et traitement du signal Emmanuel Ademovic Esigetel 1999-2000 (v. 0.99).
7. techniques numeriques pour le traitement du signal Joël Le Roux 2000
8. Signal et bruit Y. Surrel CNAM – Instrumentation Octobre 1999
9. VARGEL, C. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Paris : Dunod, 1979. Chapitre II ; Généralités sur la corrosion de l'aluminium et de ses alliages.
10. CHRISTIAN VARGEL. Corrosion de l'aluminium, édition dunod, 1999.
11. LAKHTINE. I Métallographie et traitements thermiques des métaux, édition MIR, Moscou, 1989.
- [12. PAVLOV. P, KHOKHLOV. B, Physique du solide, édition MIR, Moscou, 1989.
13. M.ZERGOUG, A.HAMMOUDA, and all, Determination of small Electric Conductivity variation by eddy currents.
11eme Symposium en NDT, Mai 2002, Berlin- Allemagne.

14. REMI LECLERC, ROCK SAMSON, Eddy Current Array probes for Aircraft Application
15eme Conférence internationale sur le CND, ROME, 2000, idn 514.
15. LANDOLT, D. Mécanisme de corrosion. Corrosion et Chimie des Surfaces des Métaux, Suisse. 1993. Ed. Press Polytechniques et Universitaires.
16. FONTANA, A. & MARS, G. Corrosion Engineering. USA. 1985. Ed. Mc GRAW-HILL.
17. UHLIG, H. Chapitre 12. Corrosion et protection. Paris 1970. Ed. Dunod.
18. FEUVELLE, C. La corrosion des métaux en milieu aqueux. Introduction à la corrosion, formes et préventions. Ed. CETIM. 1989.
19. JEAN-PAUL BAÏLON et JEAN-MARIE DORLOT, « Des matériaux », 3^e éd., Presses internationales Polytechnique, Canada, 2000
20. G. Béranger, G. Henry, G. Labe, P.Soulinac, « Les aciers spéciaux », *Tec. Et Doc. Lavoisier*
- 21D. Ghiglione, C. Leroux, C. Tournier « Techniques de l'ingénieur, M 1226 (Pratique des traitements thermo-chimiques) » 1994