



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Saad Dahleb Blida

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme MASTER
Option : Propulsion avions

Thème

Caractérisation non destructive par Courants de Foucault classique et pulsés des alliages de titanes (TA6V)

Présenté par :

DEFFANE Zakaria Et KORICHI Abdellah

Encadré par :

Nacer BOUCHEROU Et Mme BOUDJELLAL Hayet

Année Universitaire : 2018-2019

REMERCIEMENTS

Remerciements et louanges à Dieu, pour nous donner la foi et la force pour accomplir ce modeste travail. Prière et salut sur notre prophète Mohammed et sur sa famille et ses Compagnons.

Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à notre promoteur de thèse Monsieur BOUCHEROU Nacer, chercheur au Centre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité tous les jours, il a été notre père pendant cette période, nous le remercions aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il nous a toujours manifestée, Les mots ne peuvent pas exprimer nos remerciements monsieur Nacer, merci beaucoup, nous ne pourrons jamais vous oublier.

Nous remercions aussi notre Co-promoteur de l'institut d'aéronautique et des études spatiales Madame BOUDJELLAL Hayet Ce qui nous a donné L'occasion de se découvrir et de connaître la face cachée de nos personnalités, de nous donner la détermination, la volonté, l'amour du travail et de la recherche, Ce qui nous a fait attendre le réveil à cinq heures du matin nous alarmer avec impatience pour aller au crti de Blida à Cheraga et nous tous joie et détermination, merci du fond du cœur madame.

Nous remercions tous les professeurs de l'institut d'aéronautique et des études spatiales tous sans exception pour les beaux moments passés avec eux pendant cinq ans Mr NECH AHMED, Mr EL-HIRTSI ABDELLAH, Mr ALLOUCHE RACHID, Mr RENANE RACHID Mr ABADA OMAR et les autres.

Nous remercions aussi toutes l'équipe CRTI et tous ceux qui nous ont aidé dans cette recherche Y compris : Mr HAMMOUDA Amirouche, Mm ZIOUCH Aicha , Mr HEDDAD Ahmed, Mr FODHIL Mohamed.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Dédicace....

A un sourire qui perturbé le charme de vie et les minutes de silence qui ont donnés le sens de la pensée, le sens de la vie et les éclairs du futur ...

A chaque question que je me suis posé...

A l'avenir que j'ai attendu pendant des années.

Aux personnes qui sont entrés dans ma vie et ont contribué de loin...

Aux larmes de mon père et La tendresse de ma mère et le sourire de ma sœur Khaoula et mon frère Abderrahmane..

Zakaria

Je dédie ce travail :

A la lumière de ma vie, ma mère.

A mon très cher père.

*A mes frères et sœurs et leurs conjoints ainsi qu'à leurs
petits anges.*

A toute ma famille.

A tous mes amis et collègues.

A tous ceux qui me sont chers.

Abdellah

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CONTROLES NON DESTRUCTIFS.....	03
I.1 Introduction.....	03
I.2 Le chemin d'application de cnd.....	03
I.3. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du CND	03
I.3.1-Hétérogénéités et défauts	03
I.3.1.1-Les défauts de surface	04
I.3.1.2- Les défauts internes	05
I.4-Procédure de CND.....	06
I.4-1Principe de la détection d'un défaut.....	06
I.5-Technique de control.....	07
a-Méthode surfaciques.....	07
a.1 -EXAMEN VISUEL.....	07
a.2- Ressuage.....	08
a.3 - Contrôle d'étanchéité.....	08
a.4- Magnétoscopie.....	09
a.5 - La thermographie infrarouge.....	09
a.6 Courants de Foucault	10
b-Méthodes volumiques.....	11
b-1 Radiographie.....	11
b-2). Analyse vibratoire.....	11
b-3) Emission acoustique.....	12
b-4). Ultrasons	12
CHAPITRE II : LES COURANTS DE FOUCAULT.....	13
II -1 Courant de Foucault classique	13
II -1-1 Principe des capteurs à courants de Foucault.....	13
II -1-2 Profondeur de pénétration	13
II -1-3. Les avantages de la technique.....	16
II -1-4. Limite du contrôle par CF	16
II -1-5. Objectif du contrôle par CF	16
II -1-6. Techniques de contrôle non destructif par courant de Foucault	16
II -1-6-1. Modes de fonctionnement du capteur.....	16
II -1-6-2. Types de capteurs	17
II -1-6-3. Détection par changement d'impédance.....	19
II -1-6-4. Plan d'impédance complexe.....	19
II -1-6-5. Différents modes d'excitation	20
II -2 . Contrôle par courants de Foucault en régime pulsé.....	20
II -2-1. Profondeur de pénétration en régime pulsé.....	23

CHAPITRE III: LE TITANE ET SES ALLIAGES.....	24
III-1. Généralités.....	24
III-2. Le Titane dans l'industrie aéronautique	24
III-3. Structure de titane	24
III-4. Les alliages de titane.....	25
III-4-1. Éléments d'alliage.....	25
III-4-2. Classification des alliages de titane	26
III-4-3. Propriétés du Titane	29
III-4-3-1. Propriétés physiques du titane	29
III-4-3-2. Propriétés mécaniques.....	30
III-5. Le TA6V	31
III-5.1. Caractéristiques du Ti-6Al-4V.....	31
III-5.2. Microstructure.....	33
III-5.2.1. Microstructure type	33
III-5.2.1.1. Microstructures typiques du titane	33
III-5.3. Propriétés du TA6V.....	34
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES.....	36
IV-1. Introduction	36
IV-2. Préparation des échantillons.....	36
IV-2. 1-Analyse chimique	36
IV-2. 2-Découpage de la plaque.....	36
IV-2. 3- Traitement Thermique	37
IV-2. 3.1 Objectifs des traitements thermiques	37
IV-2. 3.2 Homogénéisation des échantillons.....	37
IV-2. 3.3 Traitement thermique des échantillons	37
IV-2. 4-enrobage des échantillons	38
IV-2. 4.1-Enrobage à chaud – Principe.....	38
IV-2. 5-polissage des échantillons.....	39
IV-2. 6-l'attaque chimique	40
IV-2. 7-Observation de microstructure.....	41
IV-2. 8 - Essai de dureté	42
IV-2. 9- Essais de micro dureté.....	42
IV-3. Le control par CF.....	44
IV-3. 1 : fabrication des sondes	44
IV-3.2 Manipe de CF classique	46
IV-3.2.1 Matériel utilisé.....	46
IV-3.3 Manipe de CF pulsé	50
CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	
V-1. Microstructures.....	50
V-1-2.Discussion.	51
V-2 Relation entre les valeurs de dureté de l'alliage de titane TA6V traité en HV.....	52

V-2.1. Discussion.....	52
V-3 Variation de la micro dureté dans la phase α et β	53
V-3.1. Discussion.....	54
V-4 Résultats de courant de Foucault.....	55
V-4.1. Diagrammes d'impédances obtenus	55
V-4-2 Diagrammes d'impédances obtenus pour la fréquence de 125 KHz.....	56
V-4-3 diagramme d'impédance Z en fonction de basses fréquences.....	57
V-4-4 Diagramme d'impédance Z en fonction de marge des fréquences (120 Hz à 500kHz).....	58
V-4-5 Diagramme d'impédance dans la fréquence de 125 KHz	59
V-4-6 Discussion.....	59
V-5 . Variation d'impédance Z et la dureté à 125 KHz.....	60
V-5- 1 Variation d'impédance Z et la dureté à 10 KHz	60
V-5- 2. Discussion.....	60
V-6. Variation de phase et la dureté la pour les différents Fréquences prenait.....	61
V-6-1. Discussion.....	62
V-7. Variation de la dureté et le courant de Foucault pulsé.....	62
V-7-1. Discussion	63
V-8. Variation de l'impédance et la micro dureté à 125 KHz	63
V-8-1.Variation de l'impédance et la micro dureté à 10 et 08 KHz (Basses fréquences)....	64
V-8- 2 Discussion.....	64
V-9-Variation de la phase et la micro dureté pour des basses fréquences	65
V-9-1.Variation de la phase et la micro dureté pour 125KHz	65
V-9- 2. Discussion.....	65
V-10. Variation de la micro dureté et le courant de Foucault pulsé	66
V-10-1. Discussion.....	66
CONCLUSION.....	67
LISTE DES FIGURES	68
LISTE DES TABLEAUX.....	69
Références.....	70
Resumé	80

SYMBOLS :

δ : Profondeur de pénétration.

σ : Conductivité électrique.

μ_0 : Perméabilité de l'air.

μ : Perméabilité magnétique du matériau.

f : fréquence en Hertz.

$J(z)$: le module de la densité de courant à la profondeur z.

J_S : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).

Z_0 : L'impédance normale.

R_0 : La partie réelle de l'impédance.

X_0 : La partie imaginaire de l'impédance.

α : La phase alfa.

β : La phase béta.

α' : La phase α' ou martensite.

RF : Refroidis au four.

TE : Trempe à eau.

Introduction :

La perfection n'existe pas dans cette vie, à l'exception de Dieu. Tout ce que l'homme fabrique contient des défauts qui doivent être entretenus et diagnostiqués. C'est pour ça l'Homme pensés à Réduis la gravité des effets de ces défauts et les diagnostiqués avant qu'il ne soit trop tard, tant du côté médical que du côté industriel, par des moyens non destructifs.

Le control non destructif (CND), également connus sous les noms d'examen non destructif (END), d'inspection non destructive (IND) et d'évaluation non destructive (END) sont des techniques d'analyses utilisés par l'industrie pour évalué les propriétés d'un matériau, d'une structure ou un système sans causer de dommages.

Dans l'aéronautique, Les composants de l'aéronef sont exposés à des conditions extérieures difficiles, telles que de grandes différences de température, des impacts potentiels et des profils de charge cycliques importants. C'est pourquoi, conformément à une réglementation de sécurité stricte, les composants de l'aéronef doivent être inspectés régulièrement au cours des cycles de maintenance, à l'aide de méthodes d'essais non destructifs (CND).

Dans cette étude on a choisi le control par courant de Foucault classique et pulsé pour déterminer les caractéristiques des alliages de titane TA6V.

Pourquoi on a choisi ce type du matériau ?

C'est un matériau très utilisé dans l'industrie aéronautique compris des bons caractéristiques tels que la résistance, ductilité, résistance à la rupture, résistance à la température, caractéristiques de fluage, soudabilité, et aptitude au traitement thermique.

En coté structurale, le titane TA6V est utilisé pour remplacer les matériaux à base acier à but de gagner du poids dans les cadres et les joints, caisson d'aile, Encadrement de cockpit, carters structuraux, Fixation..etc.

D'une autre coté la propulsion a sa part du ce alliage, car le TA6V est utilisé dans les disques de compresseurs, aubes de compresseurs, carter Fan, aubes Fan, etc.

Pourquoi la méthode de control par courant de Foucault classique et pulsé et pas autres méthodes ?

Le test par courants de Foucault (CF) est une méthode de CND souvent utilisée dans l'industrie aéronautique Étant donné que de nombreux composants sont fabriqués à partir de matériaux conducteurs tels que l'aluminium et le titane. Les courants de Foucault convient à déterminer les différents défauts de surface.

La méthode d'inspection par courants de Foucault remplace des méthodes d'inspection plus longues et plus dangereuses, telles que la radiographie. Dans la plupart des cas, les inspections par courants de Foucault peuvent être effectuées avec un technicien qualifié. Dans la plupart des États, la radiographie nécessite deux techniciens pour des raisons de sécurité, du coût élevé des équipements et des produits chimiques utilisés pour le traitement du film et des déchets dangereux. Le processus par courants de

Foucault ne comprend fondamentalement aucun matériau consommable, tel que des gels, des couplants et des produits chimiques, et la plupart des inspections d'aéronefs se font sur la surface extérieure sans préparations d'aéronefs.

La rapidité, l'efficacité, et le plus moindre cout, ces trois facteurs nous ont fait choisir la méthode de control par courant de Foucault .

Le but de ce travail est d'évaluer les modifications structurales causés par des traitements thermiques sur du Titane TA6V par les courants de Foucault classique et Pulsé.

Cette étude a été présentée en cinq chapitres.

Le premier chapitre (I) a présenté une généralités sur le contrôle non destructif qui contenait une définition générale du mots CND, les divers types de défauts et les différents méthodes pour les diagnostiquer.

Le deuxième chapitre (II) a été réserver au courant de Foucault classique et pulsé dans lequel nous avons expliqué le principe de courent de Foucault et comment l'utiliser en détail pour détecter les défauts et Nous avons présenté une conclusion dans laquelle nous avons différé les deux méthodes.

Dans le troisième chapitre (III) Nous l'avons dédié au titane et alliages inclus le TA6V .

Le quatrième chapitre (IV) a pris la partie pratique est intitulée matériels et méthodes, Nous avons discuté dans ce chapitres les diverses expériences, méthodes et appareilles utilisés dans cette étude.

Et pour le dernier chapitre le cinquième (V) Résultats et interprétations nous avons mentionné et discuté les résultats obtenus et les comparés pour produire une conclusion final de cette étude.

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.1-Introduction :

Le Contrôle Non Destructif (CND) regroupe un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. on peut les classer selon la nature ou le type des défauts soit volumiques ou surfaciques.

Le métier du CND s'est historiquement construit autour des activités nucléaires (1950-80), puis celles de l'aéronautique (1980-2000) lorsque les matériaux composites sont apparus.

I.2- Le champ d'application de CND [1] :

I.2-1-Le contrôle en cours de fabrication :

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

I.2- 2 -Le contrôle de réception :

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant. Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi souvent d'en définir la nature et les dimensions.

I.2- 3 -Le contrôle en service :

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps.

I.3. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du CND :

I.3.1-Hétérogénéités et défauts :

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes. [2]

I.3.1.1-Les défauts de surface : accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'oeil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

. La première catégorie (**défauts ponctuels**) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

. La seconde catégorie correspond aux **défauts d'aspect**, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

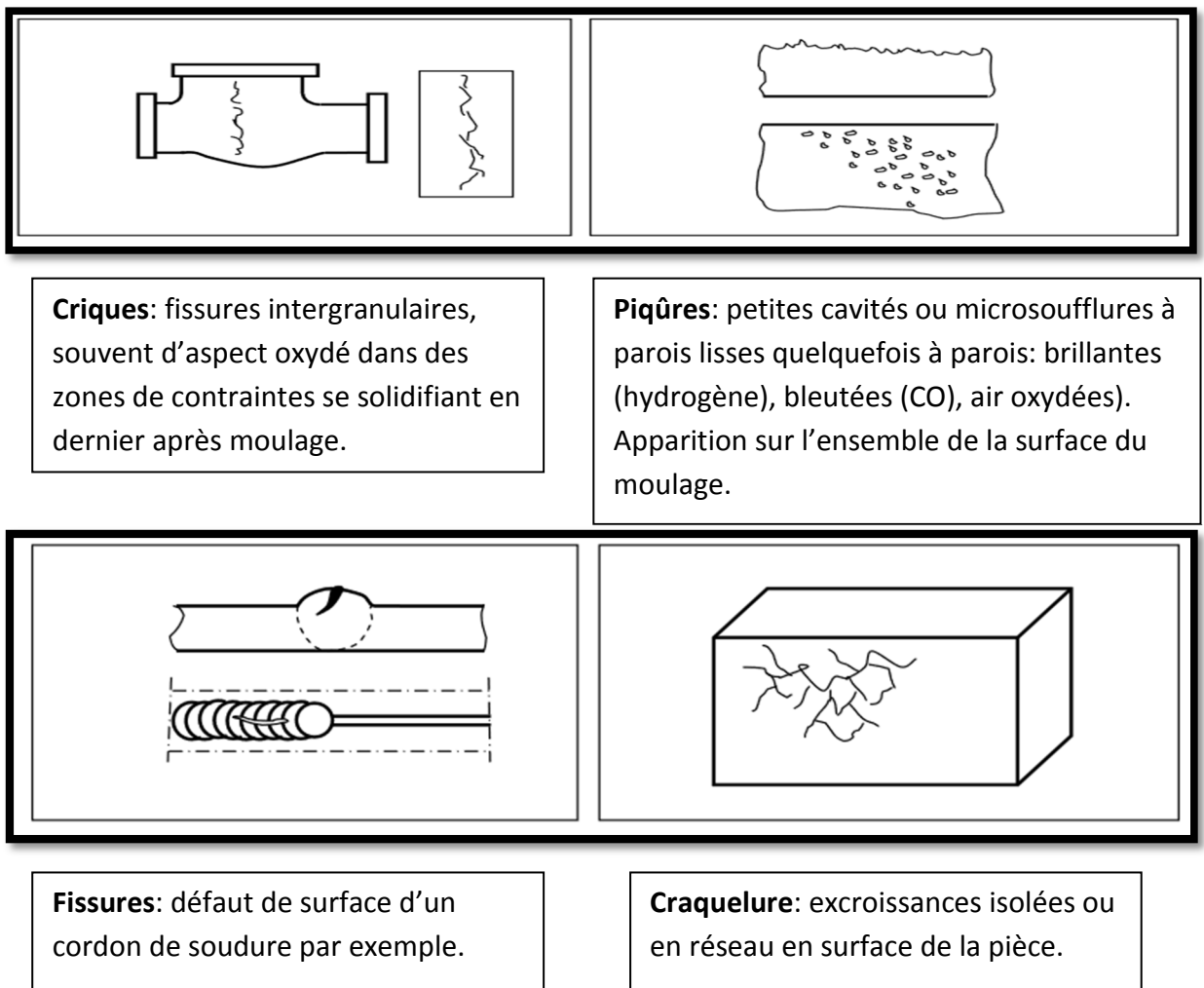


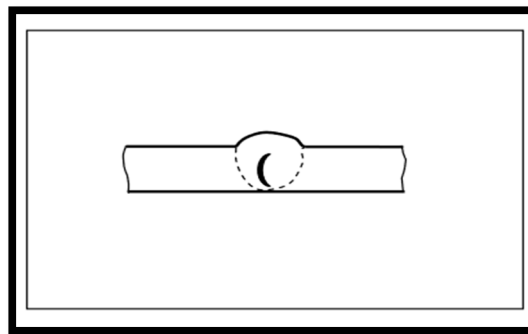
Figure 1.1 : Les défauts de surface [2]

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

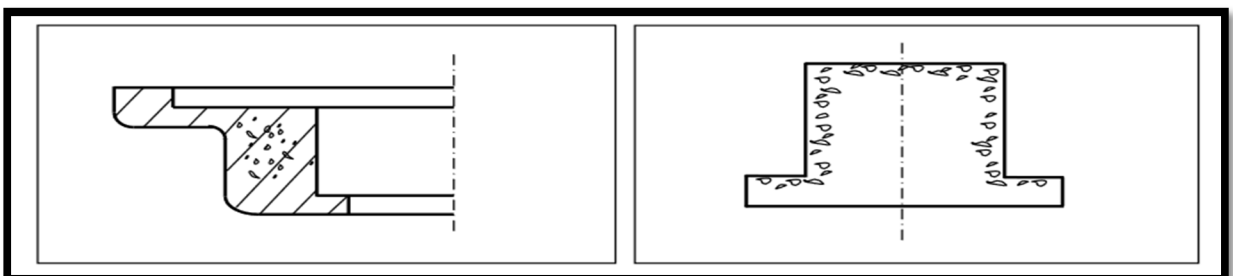
I.3.1.2- Les défauts internes : sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie.

[2]



Criques internes: des fissures se forment dans le métal déposé, lors du refroidissement, donc sous l'effet des retraits. Certaines des causes: % C élevé, épaisseur et retraits importants, manque de pénétration ou section de soudure insuffisante.



Porosités: microporosités spongieuses localisées dans les zones de fin de solidification (massives) souvent avec concentrations d'inclusions et des précipitations de gaz.

Soufflures: petites cavités dispersées situées en points hauts de la pièce à parois lisses, origine gazeuse.

Figure 1.2: Les défauts interne [2]

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.4 -Procédure de CND

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts.

En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans de bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel [1] .

I.4-1. Principe de la détection d'un défaut :

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée:

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique, (excitation).
- modulation ou altération de ce processus par les défauts, (perturbation).
- détection de ces modifications par un capteur approprié, (révélation).
- traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

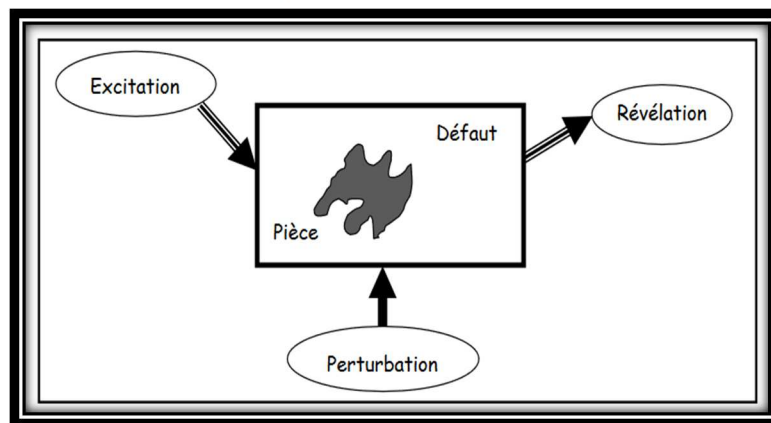


Figure 1.3 : Principe de détection d'un défaut

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...).

On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

- **les méthodes de flux**, avec une excitation et une détection de même nature et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique) figure 1.4 ; la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes.

- **les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont de natures différentes**, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique, l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique, elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique.

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

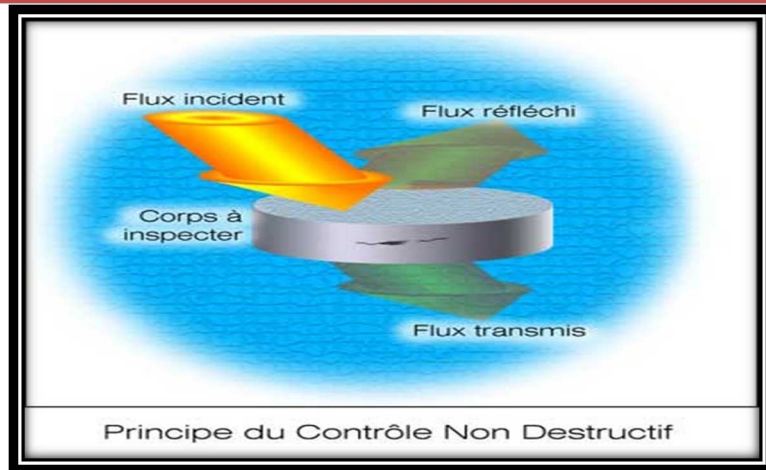


Figure 1.4 : Principe du contrôle non destructif [3]

I.5 -Technique de control :

I.5.1-Méthode surfaciques

I.5.1.1 -Examen visuel : visuels, endoscopique et télévisuel.

L'examen visuel est le plus ancien, le plus simple et le plus utilisé des contrôles non destructif. C'est aussi le point de départ et final de la majorité des autres procédés non destructif. Il permet la détection des défauts de surface dans tous types des matériaux. Toutefois, il ne permet pas de déterminer l'extension en profondeur des défauts.

L'examen visuel, permet de guider l'opération dans la définition d'une autre technique: direction de magnétisation en magnétoscopie, choix de l'angle de tire en radiologie,...ect.

L'examen visuel direct des pièces permet de détecter les défauts débouchants en surfaces ainsi que les dégradations par les conditions de service ou d'environnement.

Pour l'examen visuel indirect est éventuellement aidé par un dispositif de type endoscopique ou télévisuel.

L'endoscope est un appareil permettant d'observer les surfaces non directement accessibles à l'oeil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité. Et les cameras numériques de télévision permet une observation en distance. [4]



Figure 1.5: exemple de l'examen visuel

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

1.5.1.2- Ressuage :

Le ressuage comprend trois étapes :

- Après un nettoyage soigné, la pièce est soumise à l'action d'un pénétrant qui diffuse dans le défaut.
- On procède au rinçage de l'excès du pénétrant à la surface de la pièce.
- Le pénétrant contenu dans le défaut diffuse sur le révélateur appliqué à la surface de la pièce. On observe la tache résultante sous un éclairage adapté. [5]

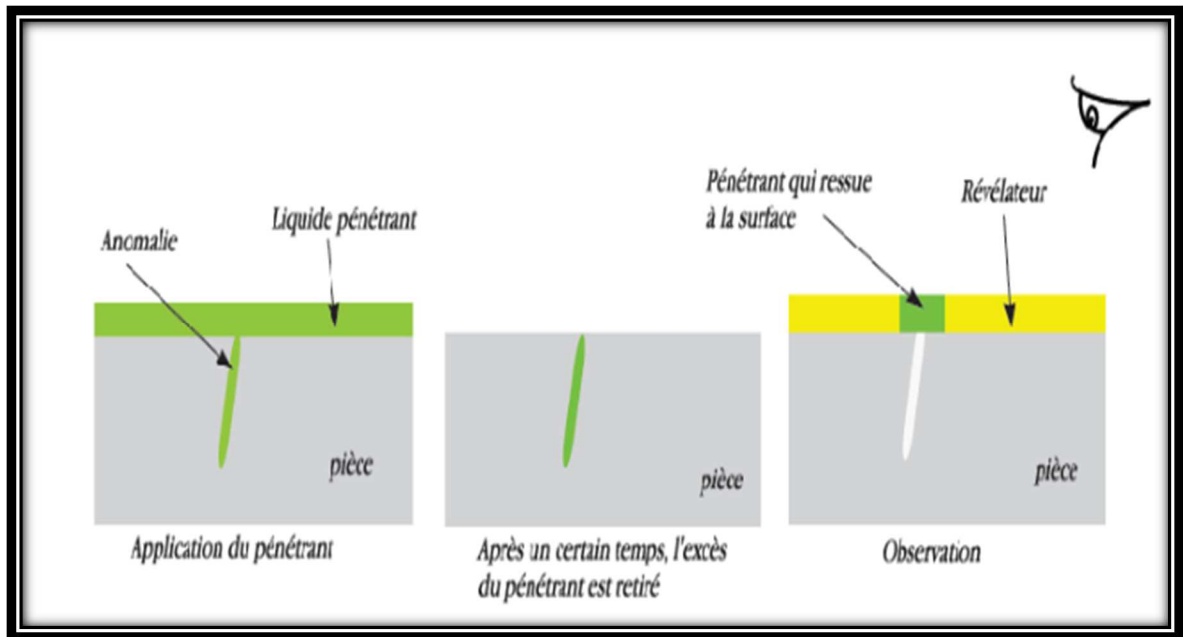


Figure 1.6 :Principe de ressuage [5]

1.5.1.3 - Contrôle d'étanchéité :

Pour détecter une fuite de gaz ou de liquide à travers la paroi d'une enceinte, plusieurs méthodes peuvent être utilisées en contrôle d'étanchéité. Les premières font appel à des gaz traceurs couplés à des instruments très sensibles. Les gaz traceurs utilisés sont en général l'hélium ou l'hydrogène du fait de la toute petite taille de leurs molécules. A l'aide d'un système permettant de mesurer une différence de pression entre l'amont et l'aval, les fuites peuvent ainsi être mises en évidence avec gaz traceur ou sans gaz traceur (mise en bassin). Une autre méthode de contrôle couple une mise en dépression (par pompe à vide) des éléments à contrôler à une détection acoustique des « bruits de fuite ». Cette turbulence est détectée grâce au positionnement de capteurs reliés à un système informatique. Cette méthode est applicable à tout type de matériau, et est utilisée pour détecter des fuites dans des canalisations, des containers ou des réservoirs. Toutefois, cette technique n'est utilisable uniquement pour des fissures transversantes.[6]

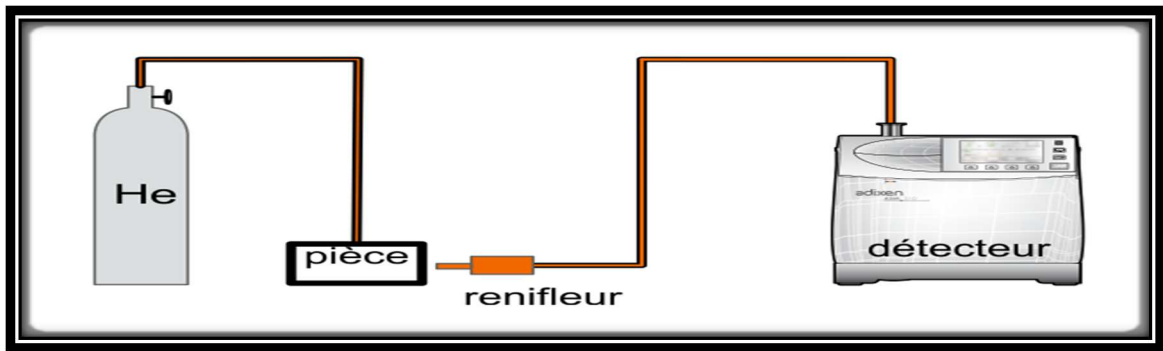


Figure 1.7: Principe de control d'étanchéité par test global d'hélium [6]

I.5.1.4- Magnétoscopie :

La magnétoscopie est utilisée pour détecter des discontinuités de surface, débouchant en surface (dans certaines conditions, jusqu'à quelques millimètres de profondeur), exclusivement sur matériaux ferromagnétiques.

Si la magnétoscopie est plus 'restrictive' que le ressuage, elle lui est préférée quand elle est applicable car elle est, entre autres, beaucoup plus rapide.

La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un "champ de fuite magnétique", appelé également « fuite de flux magnétique ».

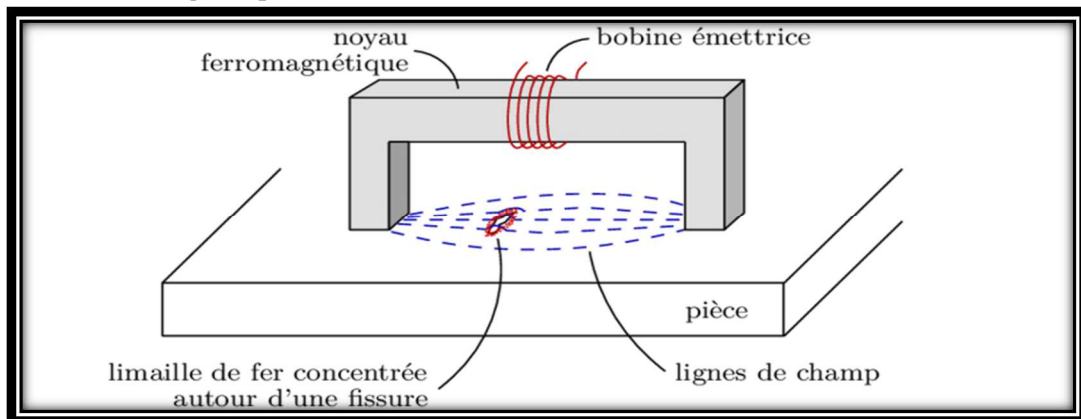


Figure 1.8 : principe de la magnétoscopie [8]

I.5.1.5 - La thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la Maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un refroidissement anormal. Seule la thermographie infrarouge vous permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'œil nu, la thermographie permet des actions correctives avant l'apparition de pannes ou problèmes coûteux. [9]

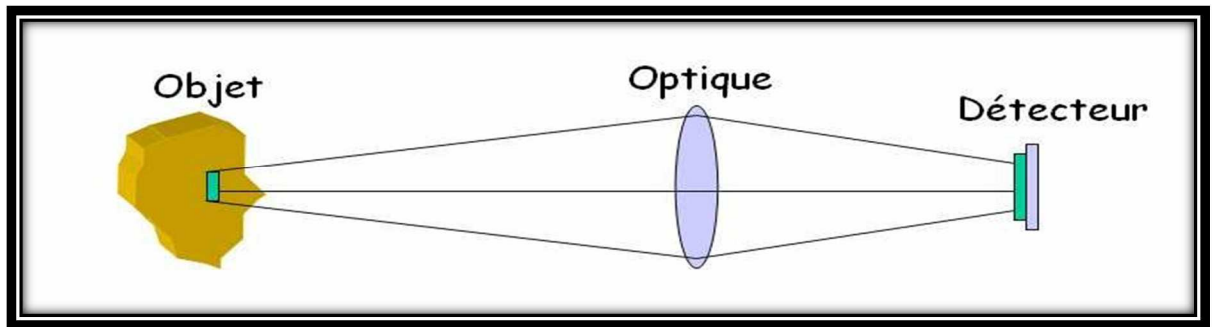


Figure 1.9 : Principe de la thermographie infrarouge [10]

I.5.1.6 . Courants de Foucault :

Cette méthode consiste à créer des courants induits dans un matériau conducteur en faisant varier un flux magnétique. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la pièce examinée. En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leurs déplacements sont perturbés (comme le montre la Figure 1.10), entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension volumique. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle. L'interprétation des signaux recueillis s'effectue par comparaison de ceux relevés dans le matériau contrôlé avec ceux d'un étalon, comportant des anomalies représentatives des phénomènes recherchés, Cet examen consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique jusqu'à sa saturation. Ce champ se trouve dévié s'il rencontre un obstacle sur son parcours. Si cet obstacle est proche de la surface, les lignes de force du champ peuvent sortir à l'extérieur de la pièce en créant à l'endroit du défaut une sorte de mini aimant sur les pôles duquel peut s'accumuler une poudre magnétique très fine préalablement déposée (utilisée à sec ou en suspension dans un liquide). [1]

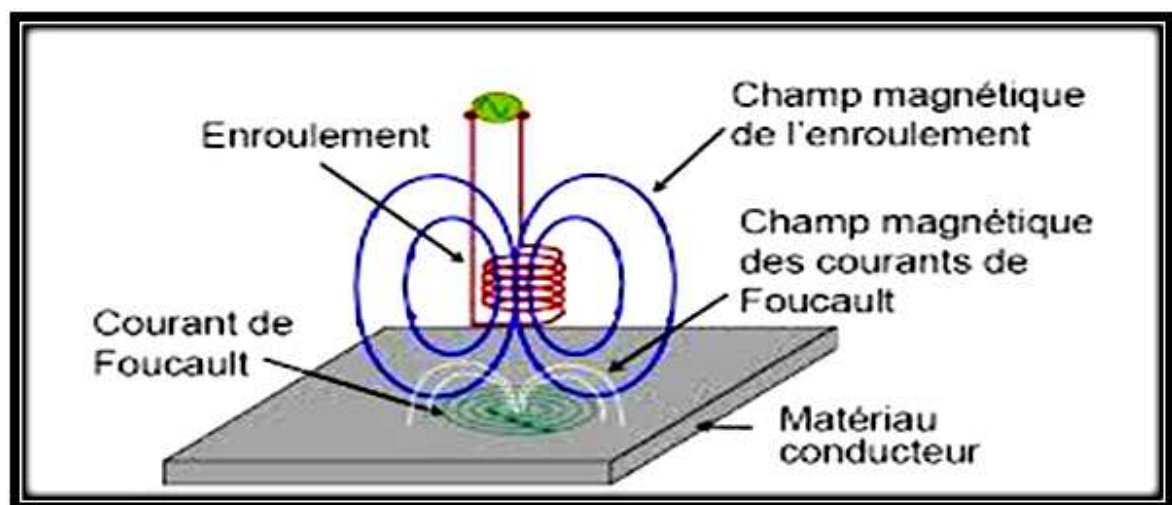


Figure 1.10: Principe de control par courant de Foucault [11]

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.5.2-Méthodes volumiques :

I.5.2.1 -Radiographie :

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants. L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou γ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (I.11).

Les inconvénients principaux de cette technique sont : Coût de mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel; Réglementation souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives,...) [12]

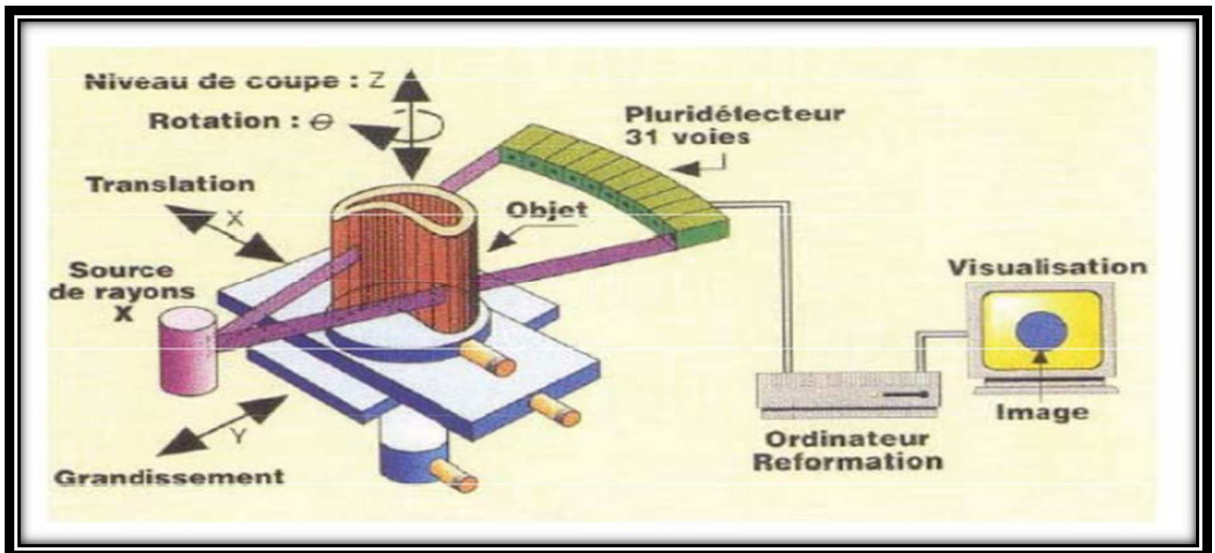


Figure I.11 : Principe de la tomographie X

I.5.2.2 -Analyse vibratoire :

Applicable à tous types de matériaux, l'analyse vibratoire consiste à analyser les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence. Ces oscillations peuvent être créées par des sollicitations extérieures ou par le système lui-même. Après avoir enregistré le signal, l'état mécanique du système est déterminé à partir des descripteurs utilisés durant la phase de traitement du signal. Bien que cette méthode soit simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, elle n'apporte pas d'information sur la localisation et la taille des défauts. L'utilisateur sait ainsi juste s'il doit réaliser ou non un examen plus approfondi de la pièce. [13]

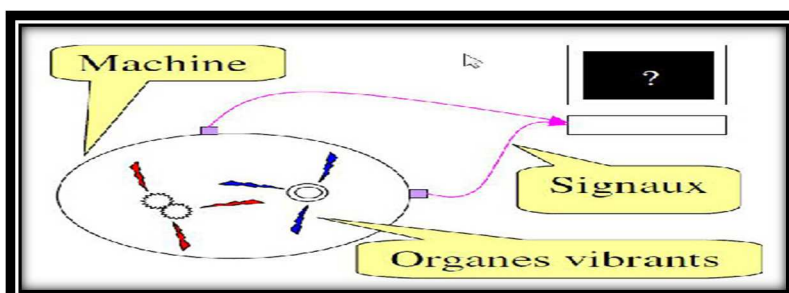


Figure 1.12 : Principe de l'analyse vibratoire [14]

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.5.2.3- Emission acoustique :

Cette méthode passive est utilisée pour suivre des propagations de défauts dans un matériau suite à une sollicitation par contrainte thermique, mécanique, chimique... Un train d'ondes élastiques est créé à chaque propagation du défaut, ce train se propageant ensuite dans tout le matériau. Ces ondes sont détectées par un capteur piézoélectrique puis amplifiées. Cette technique permet une évaluation globale de l'intégrité de la pièce. Il est aussi possible par triangulation de localiser le défaut dans la pièce. [13]

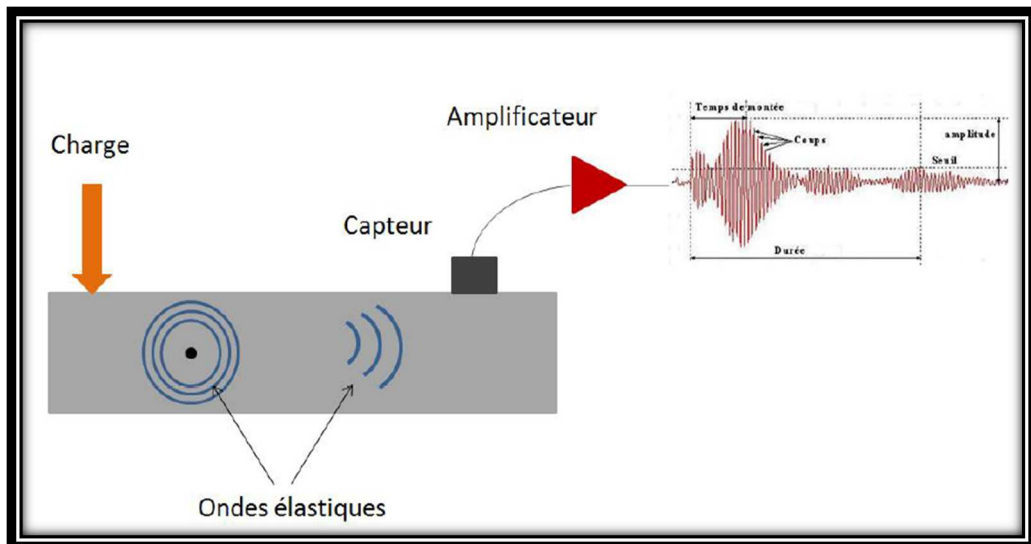


Figure 1.13 : Principe de la détection de défauts par émission acoustique

I.5.2.4 -Ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce) . Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises . [5]

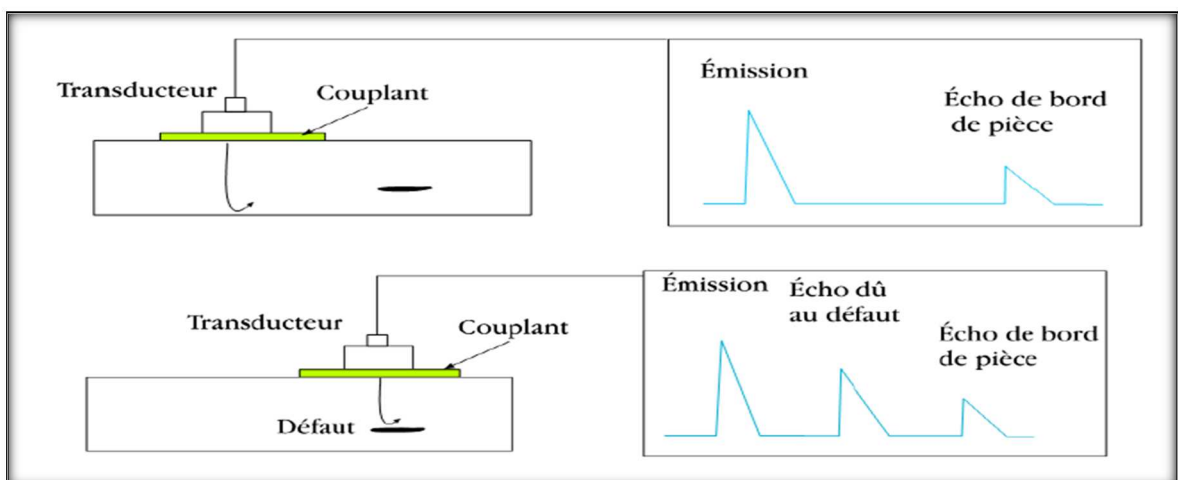


Figure 1.14–Principe des ultrasons [5]

II -1 Courant de Foucault classique :

II -1-1 Principe des capteurs à courants de Foucault :

Le contrôle par courants de Foucault repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique (découvert par Faraday en 1831). Tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une force électromotrice d'induction, cette f.é.m donne naissance à des courants induits appelés courants de Foucault, créant à leur tour un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur.

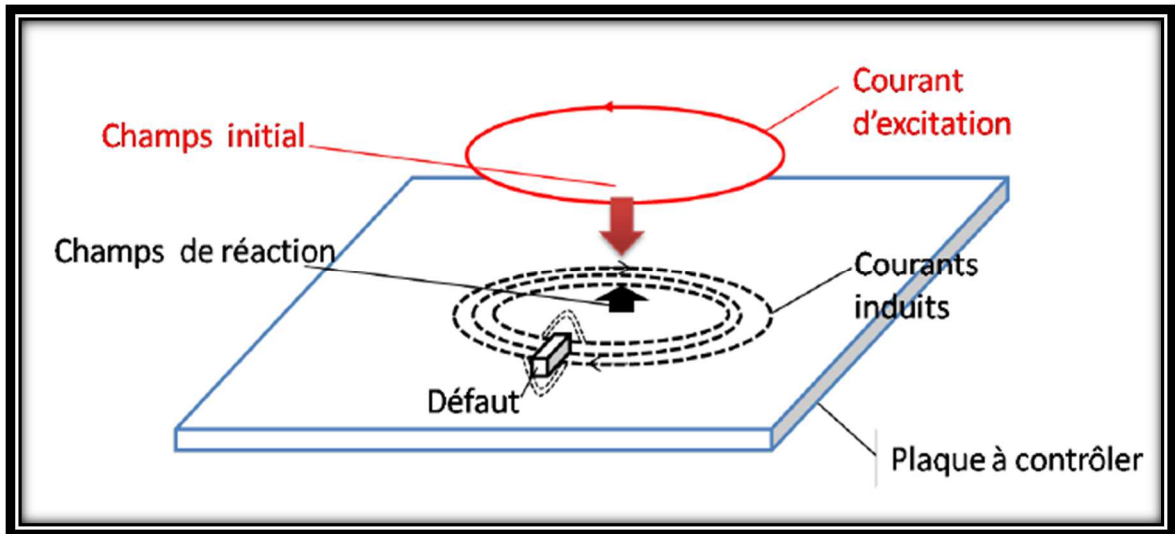


Figure 2.1 – Principe de contrôle par courant de Foucault[15]

L'intensité des courants de Foucault dépend, entre autre des caractéristiques physiques (conductivité, perméabilité) et géométriques du conducteur ainsi que de la présence éventuelle de défauts dans celui-ci.

L'évaluation de la réaction électromagnétique de l'induit va permettre par l'intermédiaire de mesures adaptées, d'accéder à des informations concernant ses propriétés géométriques (épaisseur) ou physiques (conductivité, perméabilité) ou encore la présence d'un défaut qui modifie la trajectoire des courants induits.

La topologie des courants de Foucault engendrés au sein d'une pièce est riche en informations. Cependant, cette topologie n'est pas directement accessible à la mesure. C'est par l'intermédiaire d'un capteur inductif que nous obtenons les informations utiles à l'analyse du système à contrôler sous forme de variation d'impédance ou de différence de potentiel aux bornes de ce capteur.[16]

II -1-2 Profondeur de pénétration :

Le concept de profondeur de pénétration est surtout utilisé dans les milieux conducteurs, notamment dans les métaux qui sont caractérisés par une conductivité électrique σ et une perméabilité magnétique μ qui diminue avec la profondeur du matériau. Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique variable dans le temps. Le champ électromagnétique est alors concentré dans une couche mince en surface d'épaisseur δ et il décroît d'une manière

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

exponentielle suivant la profondeur de la pièce, et on parle d'effet de peau [16]. . Cette décroissance est caractérisée par la profondeur de peau conventionnelle δ et donnée par:[4]

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (\text{II-1})$$

Où : f est la fréquence Hz.

μ_r est la perméabilité magnétique relative du matériau .

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

σ est la conductivité électrique du matériau $(\Omega\text{m})^{-1}$.

La profondeur de pénétration dépend donc de la fréquence du champ variable et de la nature du matériau. En effet, celle-ci est inversement proportionnelle à la fréquence et les propriétés du matériau.

Si on considère une pièce plane d'épaisseur infinie, excitée par un courant extérieur de fréquence f parallèle au plan, 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. le module de la densité de courant dans la pièce est [17] :

$$J(z) = J_s e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (\text{II-2})$$

avec z la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce, $J(z)$ le module de la densité de courant à la profondeur z et J_s le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).

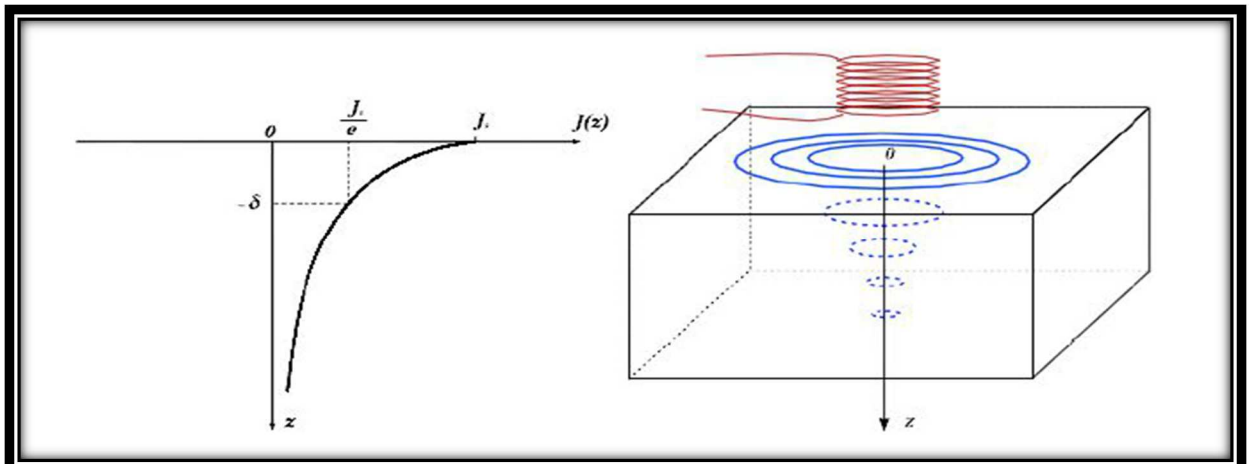


Figure 2.2: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z [4]

L'affaiblissement très rapide du champ électromagnétique dans des matériaux Conducteurs explique pourquoi le contrôle par courant de Foucault convient à la caractérisation des pièces minces et la détection des défauts situés près de la surface de la pièce. Ceci explique que les fréquences utilisées sont variables en fonction des applications. Alors pour la détection des défauts à surface, on utilise des fréquences élevées au contraire pour arriver un peu profond, on utilise des fréquences très basses.

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

La plage générale d'utilisation des CF se situe entre 10Hz et 02MHz .

Matériau	σ [MSm ⁻¹]	μ_r
Alliage Titane	0.74	1
Inconel 600	1.02	1.009
Acier inoxydable 304 L	1.39	1.04
Alliage Aluminium	18	1
Aluminium	35.4	1
Nickel	14.3	110
Fer	10	10000

Tableau 1.1: Conductivité électrique et perméabilité magnétique théoriques de matériaux à contrôler dans l'industrie.

II -1-3. Les avantages de la technique : [4]

- Aucune préparation de la surface de contrôle
- Contrôle non polluant.
- La transportabilité.
- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis dans tous matériaux conducteurs.
- Peut fonctionner sur une large plage de température.
- Rapidité du balayage et de détection.

II -1-4. Limite du contrôle par CF :

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à fortes profondeurs
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

II -1-5. Objective du contrôle par CF :

La technique du contrôle par CF est utilisée pour accomplir plusieurs taches. Du fait que l'impédance du système Capteur/pièce est fonction des différentes Caractéristiques électromagnétiques et géométriques et de l'état de santé de la pièce.

a-Caractérisation géométrique :

- Mesure de l'entrefer
- Mesure de l'épaisseur

b-Caractérisation électromagnétique :

- Mesure de la conductivité
- Mesure de la perméabilité

c-Caractérisation des défauts :

- Détection des défauts
- Position des défauts
- Taille des défauts
- Forme des défauts

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

II -1-6. Techniques de contrôle non destructif par courant de Foucault :

D'un point de vue pratique, les courants de Foucault sont créés par un bobinage alimenté sous tension ou courant variables, la réponse du dispositif à l'excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Cet élément qui assure les fonctions d'induction et la mesure du champ électromagnétique est le capteur.

II -1-6-1. Modes de fonctionnement du capteur[18]:

On distingue deux modes de fonctionnement du capteur :

- 1- Les capteurs à double fonctions, pour lesquels les fonctions d'excitation et de mesure sont assurées par la même bobine.

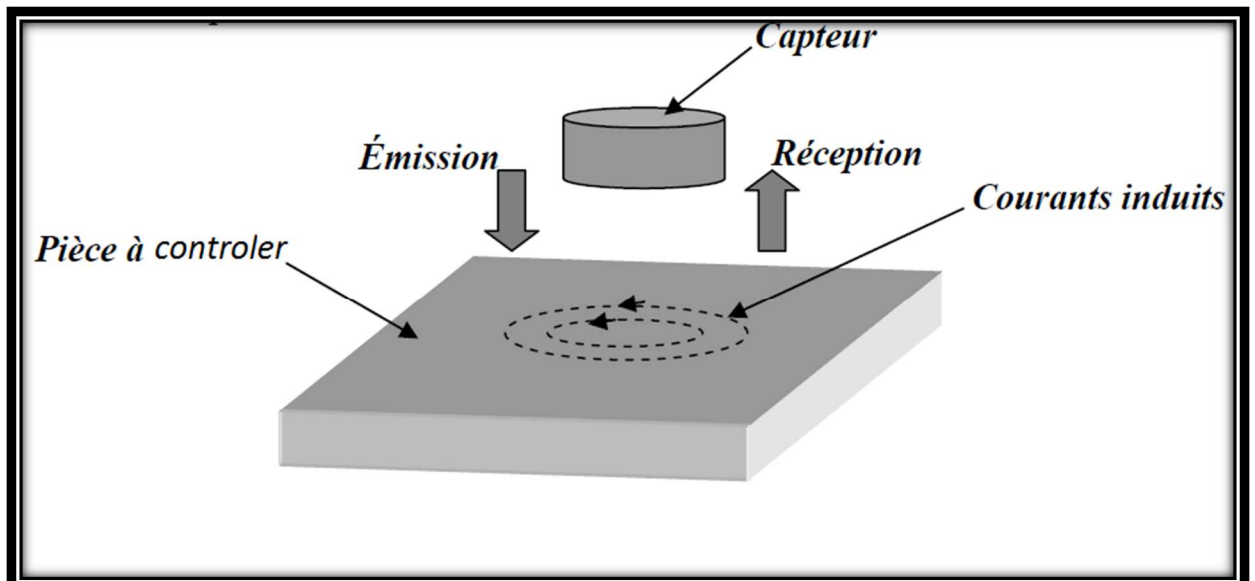


Figure 2.4 : Capteur à double fonctions

- 2- Les capteurs à fonctions séparées, pour lesquels les fonctions d'excitations et de mesure sont assurés par des éléments distincts.

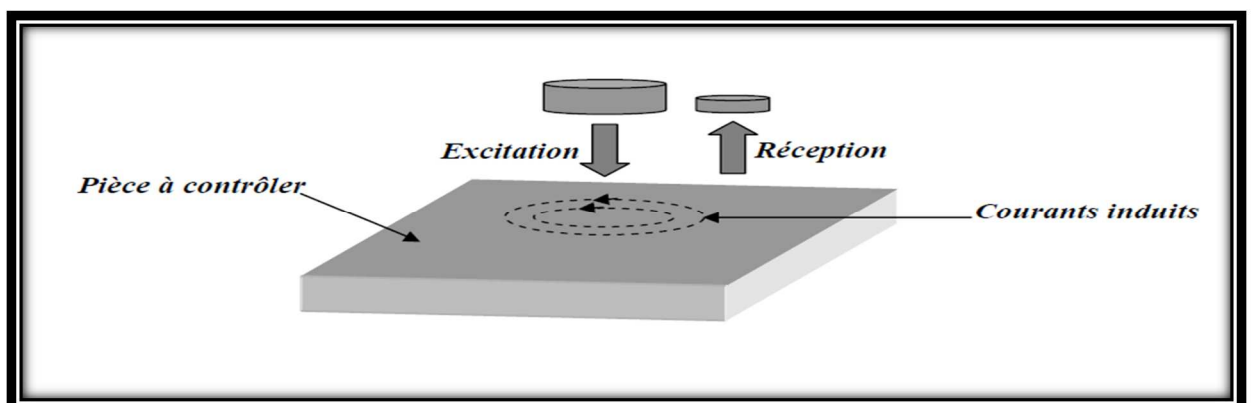


Figure 2.5 : Capteur à fonction séparée

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

II -1-6-2. Types de capteurs : Du point de vue géométrique, on distingue trois types de capteur :

a- La bobine encerclante :

Les bobines encerclantes sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à contrôler, ils sont destinés au contrôle des produits longs ou des pièces au défilé (tubes, barres, ...).

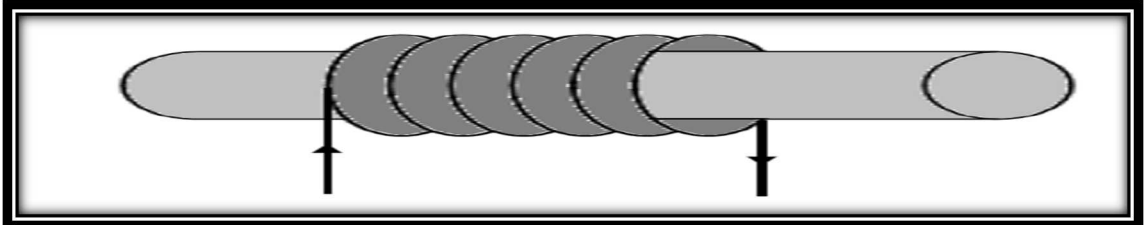


Figure 2.6: Bobine encerclante

b- Le palpeur :

C'est une petite bobine qui est destinée à l'examen local d'un produit à partir de sa surface sur laquelle il peut se déplacer.

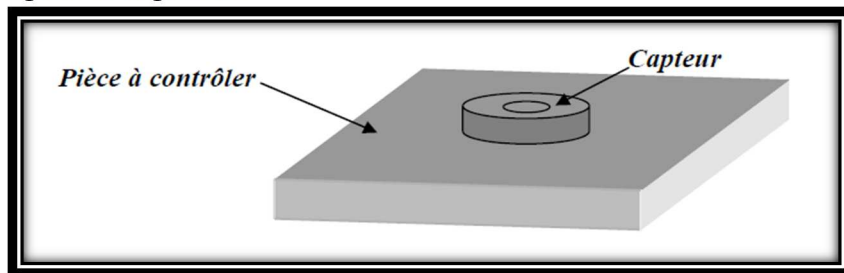


Figure 2.7: Palpeur

c- La sonde

Elle est destinée à l'examen des tubes par l'intérieur, développée principalement pour l'inspection des tubes des générateurs de vapeur dans les installations nucléaires. Il existe des sondes dites « axiales » pour lesquelles les enroulements sont bobinés autour de leurs axes de translation, et des sondes dites « tournantes » constituées de bobines ponctuelles autour de leurs axes de translation.



Figure 2.8 : Sonde

d- Sonde avec un noyau ferromagnétique :

Afin d'éviter que les lignes de champs se propagent dans l'air, on couple les bobines avec un noyau ferromagnétique, celui-ci peut être réalisé en tôle feuilletées à basse fréquence ou

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

en ferrite pour les fréquences élevées, son rôle est de canaliser le champ magnétique près du centre de la sonde.

Les sondes avec des noyaux de ferrite tendent à être plus sensibles que celles avec des noyaux d'air, et sont moins affectées par les oscillations et le décollage de la sonde .

e- Sonde sans noyau :

La sonde à courants de Foucault sans noyau est facile à modéliser que celle avec noyau, mais elle est moins sensible car la distribution dans l'espace de l'énergie émise par le capteur n'est pas optimale.

On peut augmenter la sensibilité du capteur à courants de Foucault en augmentant son diamètre mais ceci nuit à sa résolution latérale.



Figure 2.9: Bobines réelles.[16]

II -1-6-3. Détection par changement d'impédance :

Lorsqu'une bobine alimentée en tension alternative est proche d'un matériau électriquement conducteur, le champ magnétique alternatif primaire pénètre dans le matériau et génère des courants circulaires. Ces courants induits circulent à l'intérieur de la pièce à tester en générant un champ magnétique secondaire qui a tendance à s'opposer au champ magnétique primaire, Ce champ a un effet d'affaiblissement sur le champ magnétique primaire. En effet, la nouvelle partie imaginaire de l'impédance de la bobine diminue proportionnellement lorsque l'intensité du courant de Foucault dans la pièce à tester augmente. Les courants de Foucault contribuent également à l'augmentation de la dissipation de puissance qui modifie la partie réelle de l'impédance de la bobine. La mesure de cette variation d'impédance peut révéler des informations spécifiques relatives à ce matériau.[15]

II -1-6-4. Plan d'impédance complexe :

Comme cité plus haut, lorsqu'une bobine interagit avec un matériau électriquement conducteur, un changement d'impédance de cette dernière se produit. Cette variation est souvent représentée dans ce qu'on appelle le plan d'impédance normalisé. En l'absence de pièce de test à proximité de la bobine, son impédance a une valeur complexe Z_0 :

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \text{ (II-3)}$$

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

R_0 et X_0 représentent respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance à vide Z_0 . Si la bobine s'approche de la pièce à tester, des courants induits se créent et le champ qu'ils génèrent va s'opposer au champ initial. La nouvelle impédance devient :

$$Z_C = R_C + jX_C \text{ (II-4)}$$

R_C et X_C représentent respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance Z_C . Elles peuvent être représentées sur ce qui est appelé un plan d'impédance. Dans ce plan, on va reporter la partie réelle de l'impédance sur l'axe des abscisses, et la partie imaginaire sur l'axe des ordonnées. Pour ne conserver que les variations dus à la présence de la cible, on préfère ramener cette représentation dans un plan normalisé où les valeurs de la partie réelle et imaginaire sont calculées par :

$$R_{cn} = \frac{R_C - R_0}{X_0} \text{ (II-5)}$$

$$X_{cn} = \frac{X_C}{X_0} \text{ (II-6)}$$

R_{cn} et X_{cn} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire normalisées. En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante des caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide) et de l'accroissement de la réactance en fonction de la fréquence ($X = \omega.L$ où $\omega = 2.\pi.f$). Elle va dépendre uniquement des paramètres de la structure : la fréquence d'excitation f , la géométrie du capteur ainsi que des paramètres de la cible (géométrie, conductivité électrique σ , perméabilité magnétique μ) et la distance capteur/cible (lift-off). L'étude de la variation de Z_n s'effectue dans le plan d'impédance normalisé en traçant R_n en fonction de X_n [18].

II -1-6-5. Différents modes d'excitation :

Le mode d'excitation est un paramètre très important pour avoir des bonnes informations sur la cible à inspecter. On distingue :

a .Excitations mono fréquence :

Les courants induits sont obtenus par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe, elle est limitée car elle caractérise difficilement les défauts. Elle devra être située dans une gamme raisonnable :

- Pour une fréquence très basse, l'amplitude sera très faible et la précision de mesure est insuffisante à cause du bruit.
- Une fréquence très élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites

b. Excitations multifréquence :

C'est l'excitation la plus utilisée dans le contrôle par CF et peut être réalisée soit :

- En séquence : fréquence par fréquence en utilisant un dispositif de mesure mono fréquence.
- Simultanément : les fréquences sont générées simultanément et cela nécessite un dispositif de mesure compliqué.

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

c.Excitations pulsée :

Cette méthode présente une alternative à l'excitation multifréquence qui consiste à émettre un champ magnétique large bande, en excitant le capteur avec un signal impulsionnel. La forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire, triangulaire ou semi sinusoïdale, et cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité.

II -2 .Contrôle par courants de Foucault en régime pulsé :

Le contrôle par courants de Foucault pulsés est une nouvelle et émergente technique du contrôle non destructif. Les premières applications des courants de Foucault pulsés ont été développées pour la mesure d'épaisseurs de matériaux puis se sont étalées pour inspecter des assemblages rivetés, des inclinaisons et des objets de surfaces irrégulières, caractériser les revêtements, détecter les défauts profonds et les corrosions même dans les structures en multicouches.

La méthode de contrôle par les courants de Foucault pulsés dérive de la précédente où le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant plutôt que par une tension sinusoïdale entretenue. Elle est très sollicitée pour le contrôle des matériaux multicouches et d'épaisseur plus importante.

L'onde électromagnétique ainsi engendrée se propage dans le matériau et est recueillie par une sonde réceptrice distincte et protégée du rayonnement direct de la bobine émettrice, le caractère «pseudo-échographique» des signaux les rend sensibles à la nature interne du matériau, ce qui explique que cette technique est utilisée pour la mesure d'épaisseur des revêtements et pour la détection de défauts sous-cutané. L'appareillage utilisé pour l'application de cette technique est illustré sur la figure 2-10 .

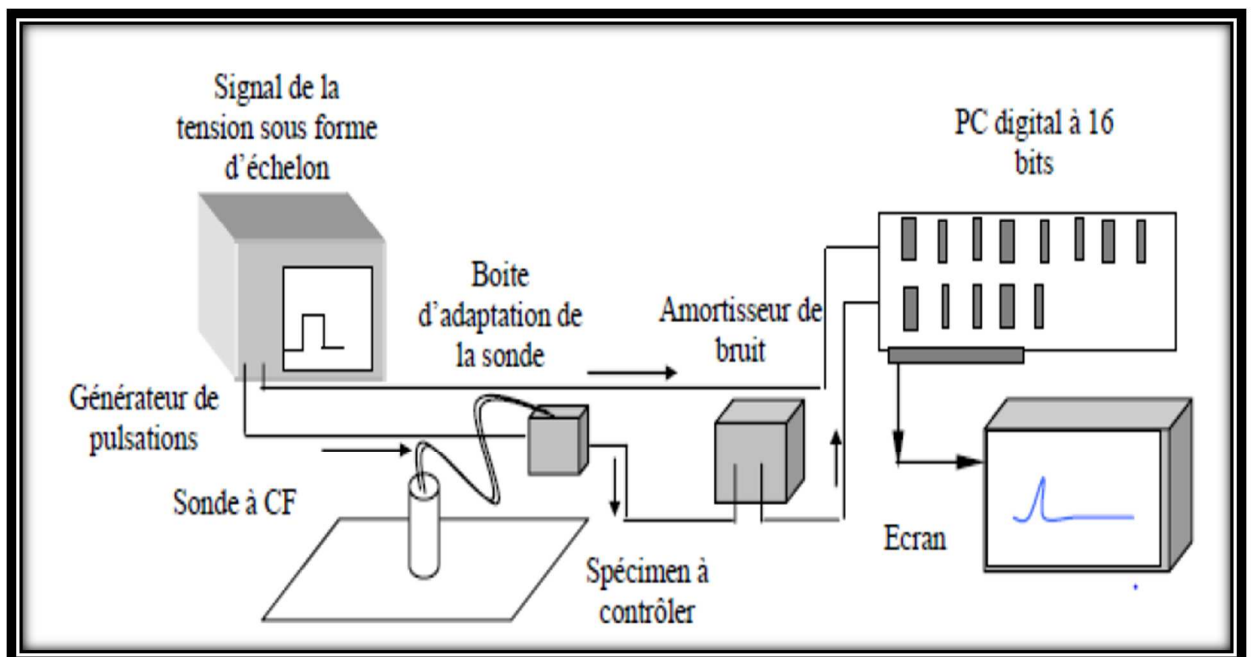


Figure 2-10: Appareillage utilisé pour les courants pulsés [15].

Chapitre II : Le control par courants de Foucault

Dans un problème de contrôle où il s'agit de discriminer plusieurs paramètres, la Méthode de contrôle par courants de Foucault pulsés représente une alternative à l'excitation multi fréquences pour laquelle la complexité de l'appareillage et la difficulté de mise au point pratique limite le nombre de fréquences exploitables.

Dans le cas du contrôle par courants de Foucault pulsés, on injecte dans le capteur un courant d'excitation de forme rectangulaire, en forme de trapèze ou de demi sinusoïde qui représentent des impulsions de courtes durées. Une onde obtenue à partir d'une décharge capacitive est aussi utilisée dans le cadre de ce travail. La décomposition en série de Fourier de l'onde engendre des signaux de fréquences multiples.

L'analyse du signal de mesure ne se fait plus à l'aide du plan d'impédance normalisée, mais c'est une analyse temporelle ou fréquentielle. La caractérisation de la grandeur recherchée se fait par l'étude de l'évolution d'un point particulier du signal, passage par zéro, extremum et aussi le point fixe (crossing-point) qui est un point insensible à la variation de l'entrefer capteur-charge (voir figure 2.11), l'évolution de ces points permet de faire un diagnostic.

Il a été montré par une analyse spectrale, que le phénomène du point fixe concerne aussi le signal transitoire que chacun de ses harmoniques, la variation des coordonnées de ce point est prédictible en fonction de la conductivité et de l'épaisseur, l'origine de ce phénomène ainsi que les éventuelles applications restent encore à explorer.

Les figures (2.11) et (2.12) représentent les points particuliers qu'on pourrait extraire d'un signal pulsé, exploitables dans une analyse temporelle.

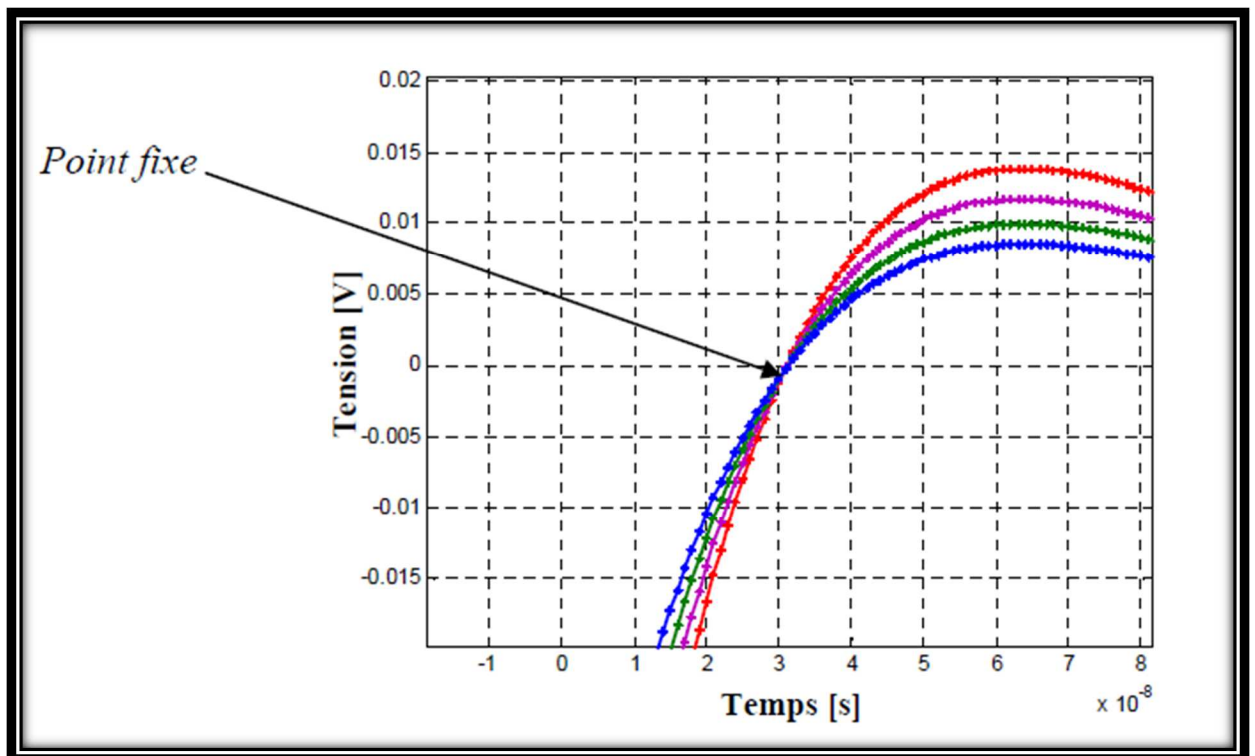


Figure 2-11: Réponses pulsés pour différentes valeurs de l'entrefer[16]

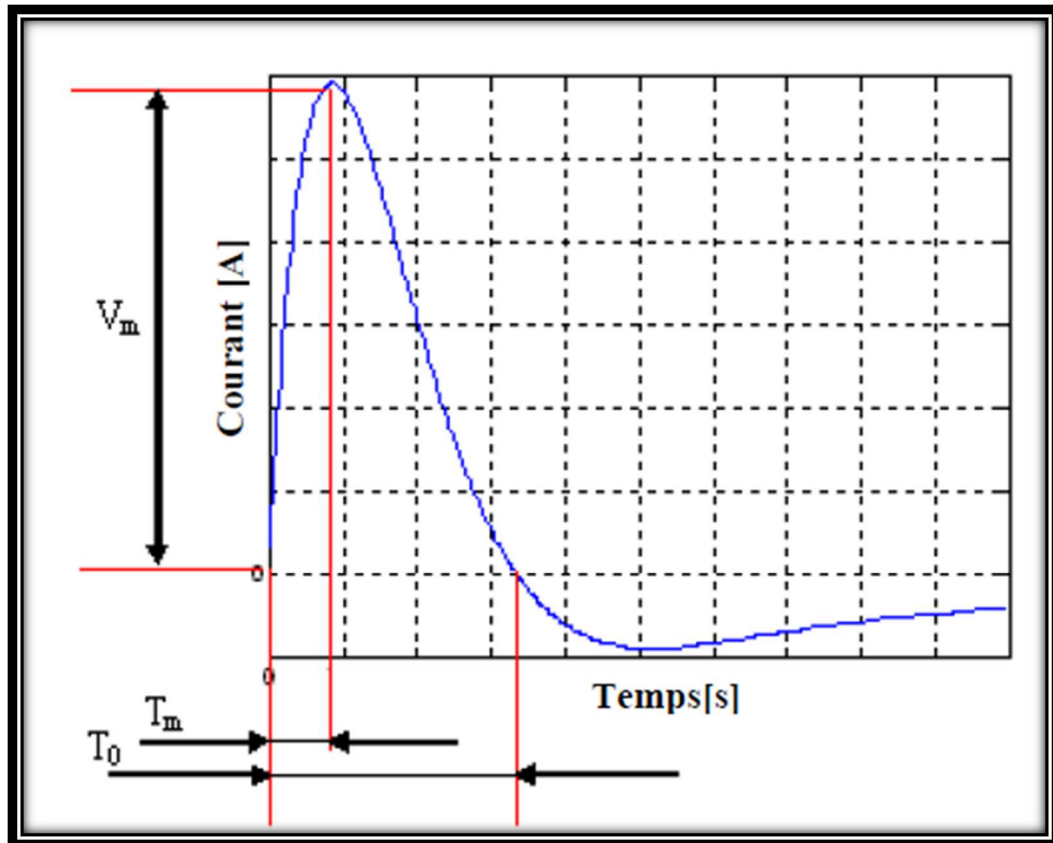


Figure 2-12: Points particuliers d'un signal pulsé[18]

V_m : valeur crête du signal.

T_0 : temps de passage par zéro

T_m : temps correspondant à la valeur crête.

Le signal d'excitation pulsé est de courte durée, il peut donc atteindre une valeur élevée en Intensité (plusieurs ampères), contre une centaine de milliampères pour le signal sinusoïdal .

II -2-1. Profondeur de pénétration en régime pulsé :

Dans le cas d'une impulsion rectangulaire de courant de durée T_0 , l'expression de la Profondeur de pénétration est donnée par:

$$\delta' = \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\sigma \cdot \mu}} \quad (\text{II-7})$$

Elle dépend de la durée de l'impulsion, des caractéristiques du matériau et de la forme de l'impulsion. Cette grandeur ne constitue que des indications qualitatives du phénomène physique réel.

Différentes expressions de la profondeur de pénétration ont été considérées ,elles ne représentent que très partiellement la répartition des courants de Foucault et n'ont été établies que pour des géométries et des formes d'excitations très particulières.[16]

III-1. Généralités :

L'élément titane (Ti) a été découvert en 1791, c'est le quatrième élément métallique le plus abondant de la croûte terrestre. Il est utilisé depuis 1940 grâce aux progrès réalisés dans les domaines de l'extraction et de l'élaboration du titane. Il a été développé dans un premier temps pour les industries aéronautique et aérospatiale en raison d'un bon rapport résistance/masse volumique, de bonnes résistances en fatigue, en fluage et à l'oxydation ainsi que d'une grande facilité de mise en forme. La grande résistance à la corrosion est un atout pour son utilisation dans les industries chimiques ainsi que pour l'aéronautique et la marine. [20]

III-2. Le Titane dans l'industrie aéronautique :

A cause de ces propriétés mécanique et physique intéressantes on utilise le titane dans le domaine aéronautique que ce soit dans la structure comme les cadres et les joints, caisson d'aile, Encadrement de cockpit, carters structuraux, Fixation..etc.
ou dans le système propulsif comme les disques et aubes de compresseurs, carter Fan, aubes Fan, etc.

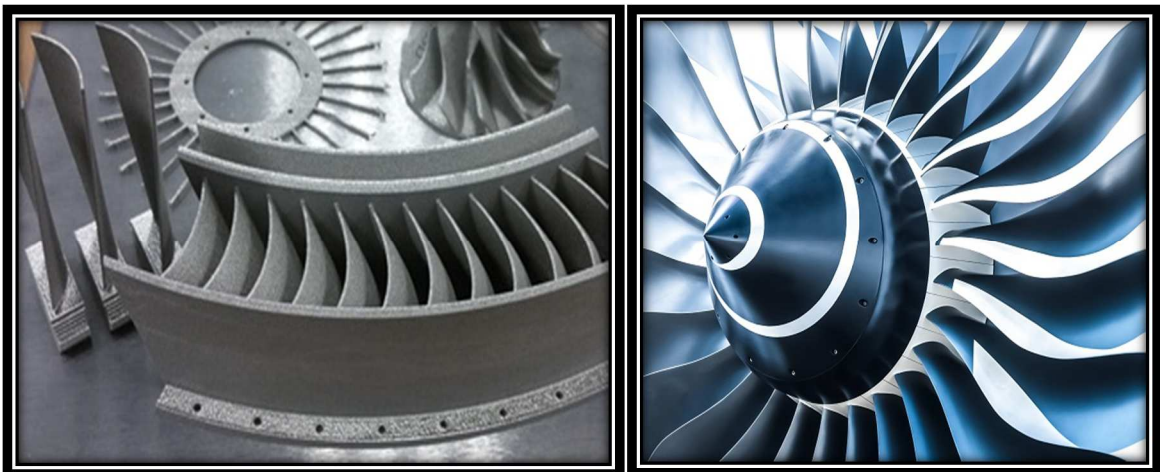


Figure 3.1 : Exemple de l'utilisation du titane en aéronautique [21]

III-3. Structure de titane :

Le Titane peut exister sous 2 formes cristallines qui se différencient par la nature du réseau cristallin avec transformation réversible à 882°C. Le Titane peut cristalliser dans le système Hexagonal Compact (HC), c'est le (Ti α) qui consiste la forme la plus stable à température ordinaire. Il peut également cristalliser dans le système cubique centré (CC), c'est le Titane bêta (Ti β) qui existe aux températures élevées jusqu'au point de fusion. Les formes α et β constituent deux variétés allotropiques. β étant plus léger que α . [22]

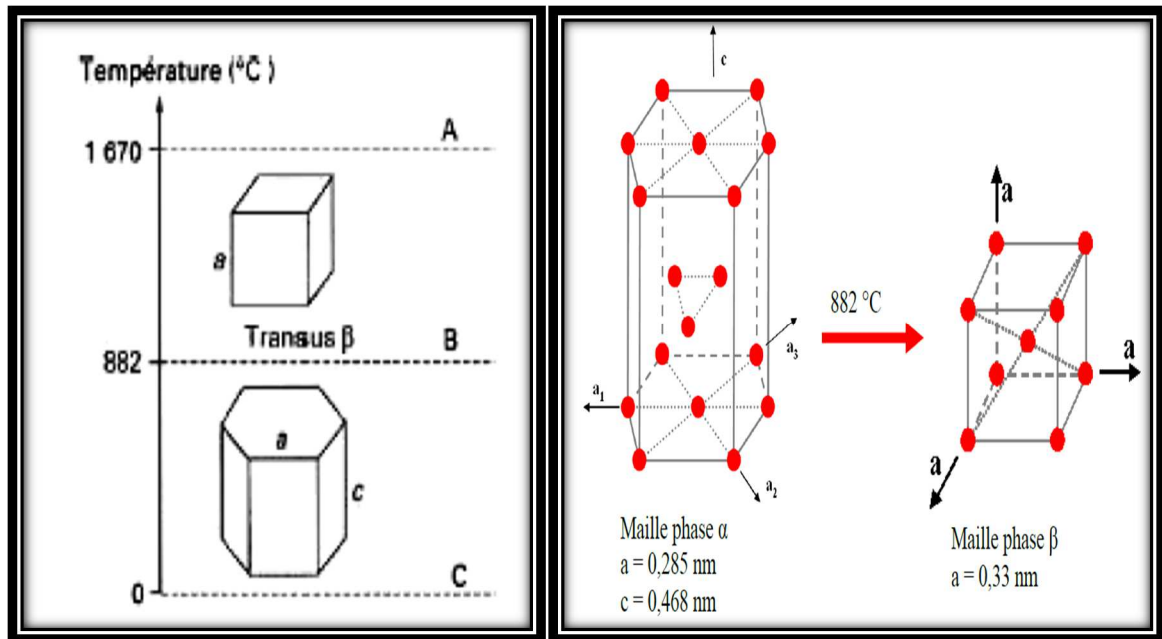


Figure 3.2 – Passage de la phase α à la phase β à 882° [23]

III-4. Les alliages de titane

Le titane pur est généralement associé à des éléments d'alliage pour améliorer ses propriétés.

Chaque élément apporte certaines caractéristiques conditionnant les applications pour lesquelles l'alliage, ainsi formé, peut être utilisé. En particulier, les éléments d'alliage peuvent stabiliser soit la phase α soit la phase β . Les différents alliages peuvent alors être classés en plusieurs catégories.[20]

III-4-1. Éléments d'alliage :

Les éléments d'alliage de titane peuvent être regroupés en trois catégories différentes:

-les **éléments α gènes** (ou α stabilisant) qui favorisent l'apparition de la phase α . Tel que l'aluminium (Al), l'azote (N), le carbone (C) et l'oxygène (O).

-les **éléments β gènes** (ou β stabilisant) qui favorisent la présence de la phase β , Comme le vanadium (V), le chrome (Cr), le fer (Fe), le molybdène (Mo) et le silicium (Si).

-les **éléments neutres** qui n'ont pas d'influence sur la création et la stabilisation de phases, tel que l'étain (Sn), le zirconium (Zr) et le hafnium (Hf).

Dans l'alliage Ti-6Al-4V étudié, l'aluminium (Al) et le vanadium (V) nous intéressent Plus particulièrement. Ce sont des éléments de substitution. L'aluminium durcit la phase α , augmente la résistance mécanique ainsi que la tenue au fluage et diminue la ductilité. Il est limité à une teneur de 7% en masse afin d'éviter la précipitation du composé intermétallique fragilisant Ti_3Al . Le vanadium favorise la ductilité et diminue la tenue à l'oxydation. Son utilisation en présence d'aluminium permet de réduire la tendance à la fragilisation de l'alliage.

Chapitre III : Le Titane et ses alliages

Les éléments d'insertion (azote, carbone, oxygène et hydrogène) sont généralement à proscrire car ils entraînent une baisse de la ductilité des alliages de titane[25]

III-4-2. Classification des alliages de titane : [26]

Les alliages de titane sont classés en 4 catégories en fonction de la concentration de la phase α (Hexagonal Compacte) et la phase β (Cubique Centré) à température ambiante.

Les propriétés thermomécaniques ce défèrent de type à l'autre.

Dans la figure 03-03 représente les quatre classes d'alliages en fonction de la concentration en éléments β gènes dans le matériau.

- a- **Alliages α et quasi- α** : Ils sont constitués en majorité de phase α , les éléments β -stabilisant (Mo, Si, V ...) sont présents en faible quantité (% β -gènes $\leq 2\%$). Généralement utilisés à l'état de recuit, ils sont soudables et ont de bonnes caractéristiques mécaniques depuis les températures cryogéniques jusqu'à 500°C. Ils ont également une résistance exceptionnelle à la corrosion et une bonne tenue au fluage. Ils sont néanmoins difficiles à former à froid. Le titane pur et les alliages Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-5Al-2Sn sont des exemples d'alliages α et quasi- α .
- b- **Alliages $\alpha+\beta$** : Ce sont les alliages qui présentent souvent le meilleur compromis entre les différentes caractéristiques mécaniques. Ils sont composés entre 4% et 6% d'éléments β -gènes et possèdent entre 5% et 20% de phase β à température ambiante. Ils répondent bien aux traitements thermiques et sont faciles à former. Cependant, ils ont une résistance au fluage limitée et sont souvent difficiles à usiner et à souder. Les alliages Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo sont des exemples d'alliages $\alpha+\beta$.
- c- **Alliages β -métastable** : Ils sont généralement composés entre 10% et 15% d'éléments β -stabilisants et possèdent entre 20% et 35% de phase β à température ambiante. Ils sont utilisés à l'état recuit ou traité et il est possible de souder ces alliages quand ils sont à l'état trempé. Les alliages Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn sont des exemples d'alliages β -métastable.
- d- **Alliages β** : Ils sont constitués en majorité de phase β . Ils sont généralement résistant à la corrosion. Les alliages Ti-35V-15Cr, Ti-40Mo, Ti-30Mo sont des exemples d'alliages β .

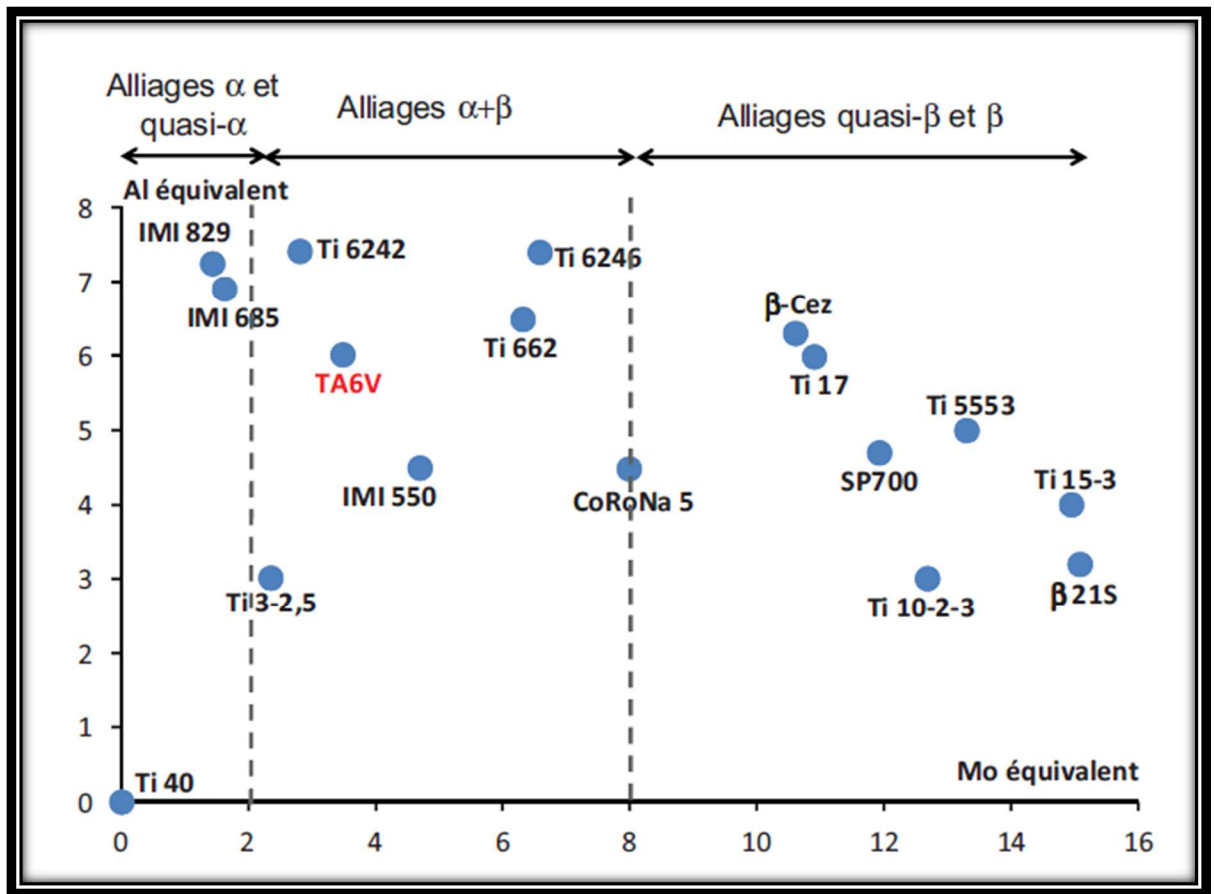


Figure 3.3: Classification des alliages de titane en fonction de la teneur en éléments alphagènes et bétagènes. [22]

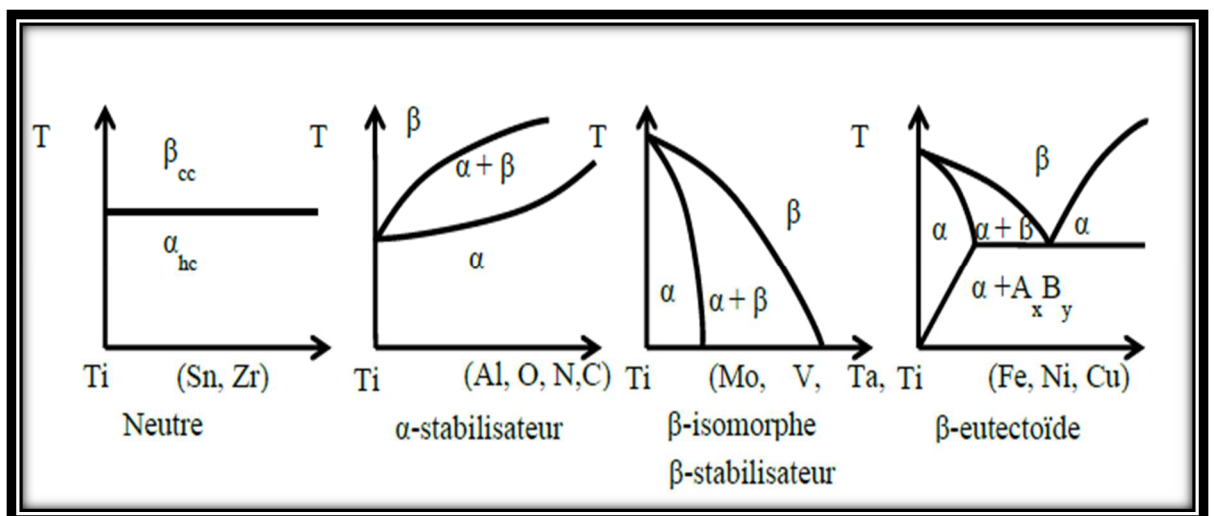


Figure 3.4 - Influence des éléments d'alliage sur un alliage de titane [28]

Chapitre III : Le Titane et ses alliages

III-4-3. Propriétés du Titane : [22]

III-4-3-1. Propriétés physiques du titane :

a-La densité du titane : est la plus faible des métaux utilisés en odontologie. Ceci permet de réaliser des prothèses confortables pour le patient par leur faible poids.

b- La conductivité thermique : valeur intermédiaire entre les alliages précieux et non précieux. Elle représente un avantage pour les couronnes sur dents vivantes en évitant des sensations désagréables de froid ou de chaud.

c- Le Coefficient de Dilatation Thermique (CDT) ($8,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$): voisin de celui de la dentine mais plus bas que celui de la céramique feldspathique conventionnelle, il impose, pour la réalisation de couronne céramo-métallique sur une chape en titane, une céramique adaptée.

d- La température de fusion : élevée = 1720°C pose un problème lors de la mise en forme par coulée et nécessite des systèmes de pression-aspiration.

e- La transformation allotropique à 882°C nécessite le recours à des céramiques basse-fusion en cas de TCM.

Etat ordinaire	solide
Couleur	blanc argenté
Volumemolaire	$10,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$
La densité	$4,507 \text{ g/cm}^3$
Conductivité électrique	$2,34 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
Coefficient de dilatation thermique	$21,9 \text{ W/(m.K)}$

Tableau 3.1: Propriétés physiques du titane [28]

Propriétés	Valeurs	Unités
Numéro atomique	22	-
Masse atomique	47,9	g
Masse volumique	4,507	g cm^{-3}
Température de transformation allotropique	882	$^{\circ}\text{C}$
Température de fusion	1670	$^{\circ}\text{C}$
Température d'ébullition	3535	$^{\circ}\text{C}$
Capacité thermique massique	522,5	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Conductivité thermique	16,7	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Résistivité électrique à 20°C	$47,8 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot \text{m}$
Coefficient de dilatation linéaire à 25°C	$8,5 \times 10^{-5}$	K^{-1}
Module d'élasticité	115	GPa
Coefficient de Poisson	0,33	-

Tableau 3.2 - Propriétés physique du titane [29]

Chapitre III : Le Titane et ses alliages

	Mg	Al	Ti	Fe	Cu
Masse volumique (g/cm ³)	1,74	2.70	4.51	7.86	8.94
Module d'élasticité (MPa)	45000	70000	110000	210000	120000
Point de fusion (°C)	650	660	1670	1535	1084
Conductivité thermique à 20°C (J/m.s.°C)	146	240	16,7	71	380
Résistivité électrique (.m)	4,4.10-8	2,68.10-8	47,8.10-8	10.10-8	1,7.10-8
Coefficient de dilatation (m/°C)	25,7.10-6	24,6.10-6	8,5.10-6	11,9.10-6	16,4.10-6

Tableau 3-3 : Propriétés physiques du titane et d'autres matériaux [30]

III-4-3-2. Propriétés mécaniques : [31]

a- Le module d'élasticité est faible en le comparant avec celui des alliages non précieux. Ceci constitue un inconvénient pour les bridges de longue nécessitant d'augmenter l'épaisseur de la bracée pour obtenir une rigidité suffisante. Les bridges collés sont contre indiqués avec le titane.

b- La limite élastique assez élevée justifie son utilisation en endodontie et son aptitude à retrouver sa forme initiale après contrainte en prothèse dentaire.

c- L'allongement à la rupture : (10% pour le T_{cp} et 14% pour le TA6V) est comparable avec les alliages précieux donc le titane est un matériau malléable.

e- La dureté est caractéristique de la pureté du titane. Elle dépend de la teneur en oxygène suivie de l'azote et du carbone. Ces derniers durcissent le métal, augmentent sa limite élastique et sa résistance à la traction et diminuent sa ductilité.

En effet, les propriétés mécaniques varient en fonction de la teneur en impuretés. Exemple: la teneur croissante en Fe ou en O₂ améliore la résistance à la rupture et élève la limite élastique du titane.

Pour l'industrie aéronautique l'alliage TA6V est utilisé. Voici ci-dessous une comparaison de deux alliages de titane : Le Tricalcium phosphate coated titanium et le TA6V :

Propriétés mécaniques	Titane T _{cp}	TA6V
La rigidité en GPa	80 à 100	107
Limite élastique en MPa	750	960
Ténacité en MPa	800	980
La ductilité (L'allongement à la rupture en %)	10	14

Chapitre III : Le Titane et ses alliages

LarésistanceàlatractionenMPa.	290à410	-
Ladureté(VHN)	190à200	300

Tableau 3.4: Propriétés mécaniques dutitane

III-5. Le TA6V :

III-5.1. Caractéristiques du Ti-6Al-4V :

L'alliage de titane Ti-6Al-4V (ou TA6V ou Ti64 ou titane Grade 5) est très utilisé dans le domaine de l'aéronautique. En effet, cet alliage de titane à de très bonnes propriétés mécaniques, est léger et a une très bonne résistance à la corrosion. Son utilisation en fabrication additive a donc été rapidement développée.

La composition de l'alliage Ti-6Al-4V est indiquée dans le Tableau 3-5 [31]

Elément	Ti	Al	V	O	N	C	H	Fe
Composition (% en masse)	Reste	5,5- 6,75 %	3,5-4,5 %	<0,2%	<0,05 %	0,08 %	<0,015 %	0,3%

Tableau 3-5: Composition chimique du titane Ti-6Al-4V d'après la norme ASTM F2924 [28]

Les deux principaux composants de cet alliage sont l'aluminium et le vanadium. L'aluminium est α -gène (il favorise la phase α) et permet d'atteindre une meilleure résistance mais une moins bonne ductilité. Le taux est cependant limité pour ne pas favoriser l'apparition de précipités Ti 3Al qui sont fragilisants. Le vanadium, β -gène, permet d'améliorer la ductilité. Le taux est limité car il n'est pas favorable à la tenue à l'oxydation.

Selon Huiqiang [32] la phase α du TA6V est composée de 6.7% massique d'aluminium et de 2.8% massique de Vanadium, la phase β est composée de 5.1% massique d'aluminium et de 13.1% massique de Vanadium.

A température ambiante, l'alliage est biphasé $\alpha + \beta$ avec un faible pourcentage volumique de β résiduel. Ce pourcentage augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la température de transus β . L'évolution de la teneur en β en fonction de la température lors d'un chauffage lent est décrite en Figure 3. 7 (a) selon l'équation suivante:

$$\% \beta_{vol} = (2.5).97.5e^{-0.0085(980-T)} \quad (3.1)$$

Où β_{vol} est la fraction volumique de phase β et T la température en $^{\circ}C$ L'évolution de la teneur en phase α lors d'un maintien en température suite à une trempé dans le domaine β est présentée en Figure 3. 7 (b).

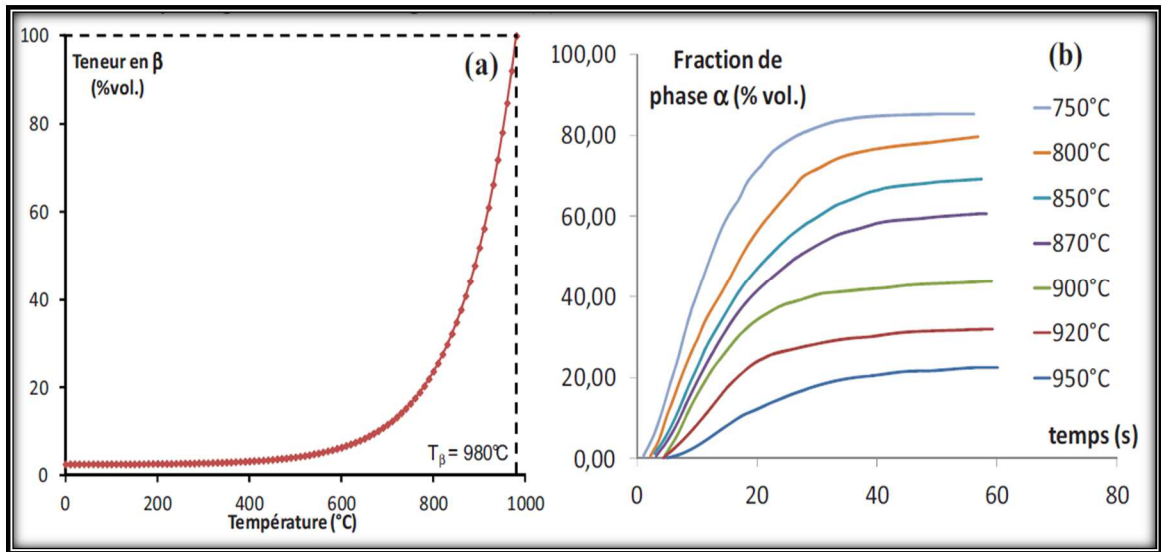


Figure 3.5: Evolution de la fraction volumique de phase β dans le TA6V en fonction de la température (a) et à l'issue d'une trempe depuis le domaine β , évolution de la fraction volumique en phase α dans le TA6V en fonction de la durée de maintien à la température T (b) [20]

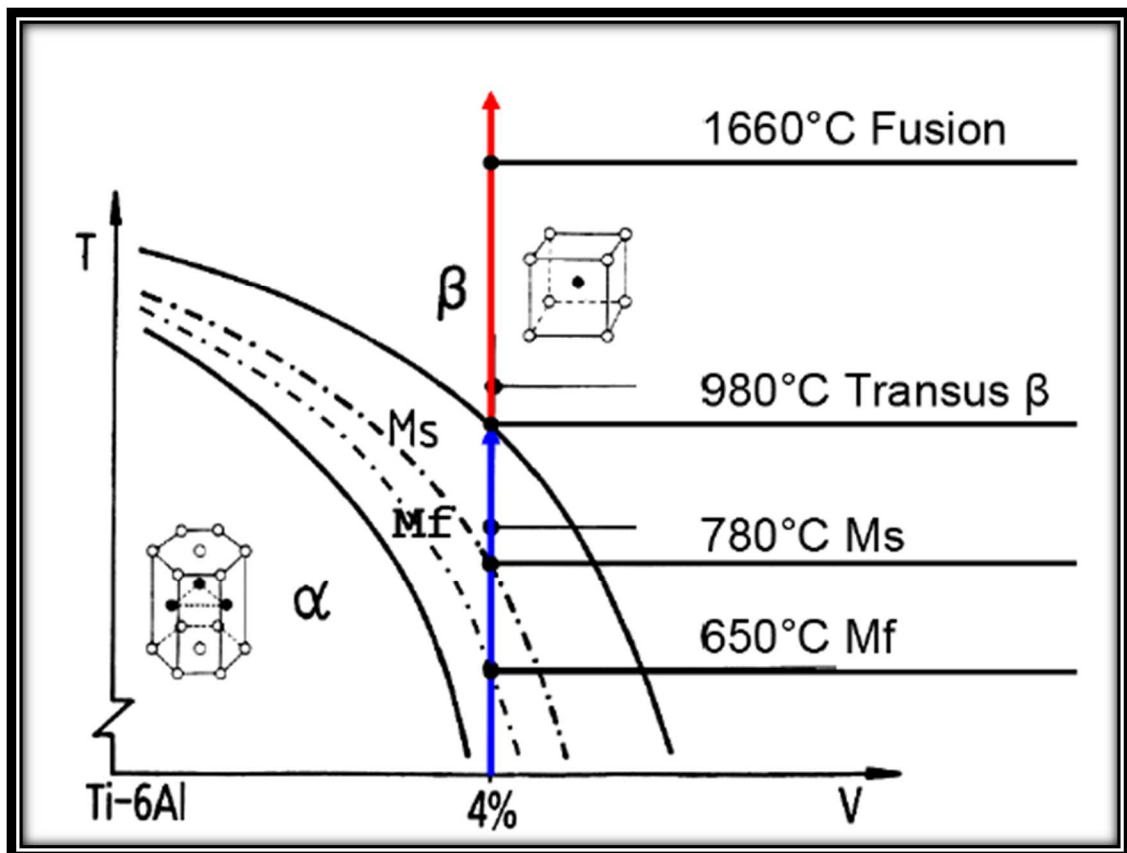


Figure 3-6 : Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V[25]

III-5.2. Microstructure

III-5.2.1. Microstructure type :

III-5.2.1.1. Microstructures typiques du titane :

La microstructure du titane Ti-6Al-4V dépend fortement de la méthode de fabrication et des traitements thermiques appliqués.

La Figure 3.9 montre les trois principaux types de microstructures rencontrés sur cet alliage].

- Dans la structure bimodale (Figure 3.9a), les grains gris correspondent à la phase α et les autres grains correspondent à des lamelles α dans une phase β . L'épaisseur des grains dépend des vitesses de refroidissement et des températures des traitements thermiques.

- La structure lamellaire (Figure 3.9b) correspond à une phase lamellaire α (en gris) dans une phase β (en noir). L'épaisseur des lamelles dépend des vitesses de refroidissement et des températures des traitements thermiques.

- La structure martensitique (Figure 3.9c) est composée d'une phase α' en aiguille (en noir). Cette microstructure correspond à un refroidissement rapide. [25]

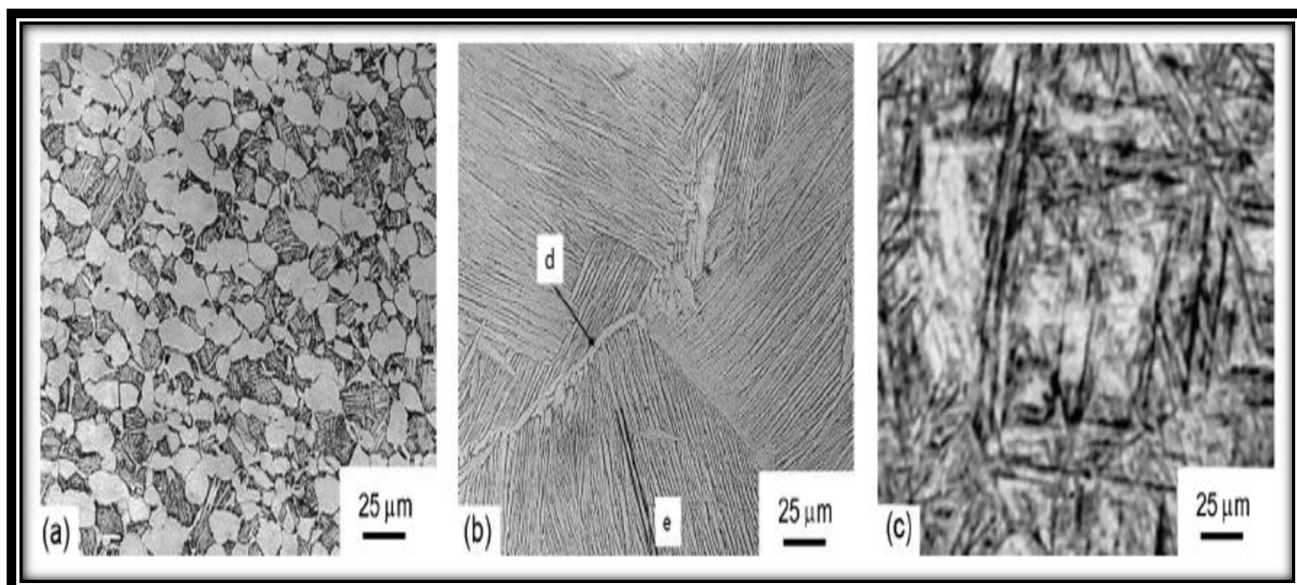


Figure 3-7: Images optiques montrant les principaux types de microstructures du Ti-6Al-4V (a) structure bimodale, (b) structure lamellaire et (c) structure martensitique

III-5.3. Propriétés du TA6V :

Le TA6V est actuellement l'alliage de titane le plus utilisé, il représente plus de 50 % du tonnage de titane dans le monde. À ce jour, aucun autre alliage de titane ne menace sa position dominante. L'industrie aérospatiale représente plus de 80% de cette utilisation. Contrairement au T40, le TA6V est plus propice au formage à chaud.

L'alliage TA6V est un alliage de titane qui possède une bonne formabilité, une excellente soudabilité et qui a de bonnes propriétés en résistance à la corrosion. Cela fait du TA6V un matériau idéal pour des applications aéronautiques et aérospatiales. [28]

Chapitre III : Le Titane et ses alliages

Le tableau ci-dessous résume les propriétés physique, mécaniques, thermiques et électriques du TA6V :

Physical Properties	Metric
Density	4.43 g/cc
Dureté, Brinell	334
Dureté, Knoop	363
Dureté, Rockwell C	36
Dureté , Vickers	349
Résistance à la traction	950 MPa
limite d'élasticité	880 MPa
allongement à la rupture	14 %
Réduction de la superficie	36 %
module d'élasticité	113.8 GPa
limite d'élasticité en compression	970 MPa
Résistance à la traction entaillée	1450 MPa
Force de roulement	1860 MPa
rapport de poisson	0.342
résistance à la fatigue	240 MPa
résistance à la fatigue	510 MPa
ténacité	75 MPa-m ^{1/2}
module de cisaillement	44 GPa
résistance au cisaillement	550 MPa
résistivité électrique	$1.724 \times 10^{-6} \text{ Ohm/m}$
conductivité électrique de	$5.82 \times 10^5 \text{ Siemens/m}$
Perméabilité magnétique	1.00005
susceptibilité magnétique	3.3e-006
la capacité thermique spécifique	0.5263 J/g-°C
Conductivité thermique	6.7 W/m-K
Point de fusion	1604 - 1660 °C
Solidus	1604 °C
Liquidus	1660 °C
Beta Transus	980 °C

Tableau 3-6: Propriétés du titane Ti-6Al-4V [33]

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-1. Introduction :

Dans ce chapitre, on a présenté en deux parties tous les équipements et les différentes méthodes et étapes utilisés dans cette thèse, la première partie présente l'étude faite sur le titane TA6V à but de caractériser les propriétés chimiques, mécaniques et métallurgiques. Et la deuxième partie traite des procédures de l'application de la technique de courant de Foucault, soit classique ou pulsé à partir de la réalisation des sondes allongées à la main.

IV-2. Préparation des échantillons :

IV-2. 1-Analyse chimique :

Déterminer avec précision les types et les proportions de chaque composant chimique de notre plaque de Titane à but de confirmer le type d'alliage concerné, cette analyse est faite par un chimiste des laboratoires du centre CRTI.

IV-2. 2-Découpage de la plaque :

On a tracé dans la plaque de TA6V les mesures des échantillons à comme montre le tableau ci-dessous :

échantillons	nombres	Dimensions (cm)
petit	07	1 x 1
grande	07	3.5 x 2.5

Tableau 4.1 : échantillons découpés

PS : les grands échantillons destinés pour l'examen de courant de Foucault et les petits pour l'observation des microstructures et les essais de dureté et de la micro dureté.

Matériel utilisé dans le découpage :

On a utilisé la machine (PRESI Mecatoms T300) illustrée dans la photo ci-dessous :



Figure 4.1 : Machine de découpage (PRESI Mecatoms T300) et échantillons coupés

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-2. 3- Traitement Thermique :

IV-2. 3.1- Objectifs des traitements thermiques :

Les traitements thermiques ayant des objectifs variés en fonction des applications visées, différentes catégories peuvent être envisagés :

- traitements de durcissement, pour accroître la résistance et la tenue au fluage des alliages de titane et donc augmenter l'éventail de leurs applications, principalement aéronautiques.
- traitements d'adoucissement, pour faciliter la mise en forme et améliorer la stabilité dimensionnelle ou structurale.
- traitements d'amélioration spécifique de certaines propriétés d'emploi (ténacité, fatigue, fluage, corrosion sous contrainte, usure et grippage) .

Dans notre étude on à utiliser le traitement thermique pour varier les propriétés de matériau TA6V comme la conductivité, la dureté à but d'interpréter c'est variation dans le control par CF.

IV-2. 3.2-Homogénéisation des échantillons :

L'homogénéisation est assurée par un traitement thermique pour supprimer l'historique de matériau.

Pour atteindre ce but en fait un traitement thermique de 950° c avec un temps de maintien de 3 heures suivi par une trempe à eau. ce traitement est fait pour tous les échantillons juste après le processus de découpage.

Après cette homogénéisation en garde que 2 échantillons pour faire notre étude à leurs bases et les autres sont suivis par des traitements thermiques différentes montrés ci-dessous.

IV-2. 3.3 Traitement thermique :

On a effectué deux type de traitement thermique, un chauffage suivi par une trempe à eau et un autre chauffage suivi par un recuit au four ces traitements et faisaient après l'homogénéisation du tous les échantillons à 950°C.

Le tableau suivant montre tous le processus de traitement thermique fait dans cette étude:

Type de Traitement	Nombre des échantillons	Temps de traitement
Homogénéisation à 950°C	Tous les 14 échantillons	3 Heurs
550°C Trempe à eau	02	8 Heurs
550°C Refroidie au four	02	8 Heurs
750°C Trempe à eau	02	8 Heurs
750°C Refroidie au four	02	8 Heurs
950°C Trempe à eau	02	8 Heurs
950°C Refroidie au four	02	

Tableau 4.2: traitement thermique appliqué



Figure 4.2 : four thermique utilisé (Nabertherm B180)

IV-2. 4-Enrobage des échantillons :

L'objectif de l'enrobage est de protéger les matériaux fragiles ou revêtus pendant le processus de préparation (Polissage) et d'obtenir une parfaite netteté des bords. L'enrobage est utilisé lorsqu'une protection des couches est requise. Il permet également une manipulation plus sûre et plus pratique par exemple pour les échantillons de petite taille, coupants ou de forme irrégulière.

On a fait l'enrobage à chaud pour tous les échantillons avec l'appareille LaboPress-1 .

IV-2. 4.1-Principe de l'enrobage à chaud:

L'échantillon propre et sec est positionné dans le cylindre d'enrobage de la presse d'enrobage et la résine d'enrobage adaptée est ajoutée. Une température d'environ 180 °C et une force d'environ 250 bars sont appliquées pendant l'enrobage de l'échantillon. Un système de refroidissement à eau est utilisé pour réduire au maximum le temps d'enrobage.

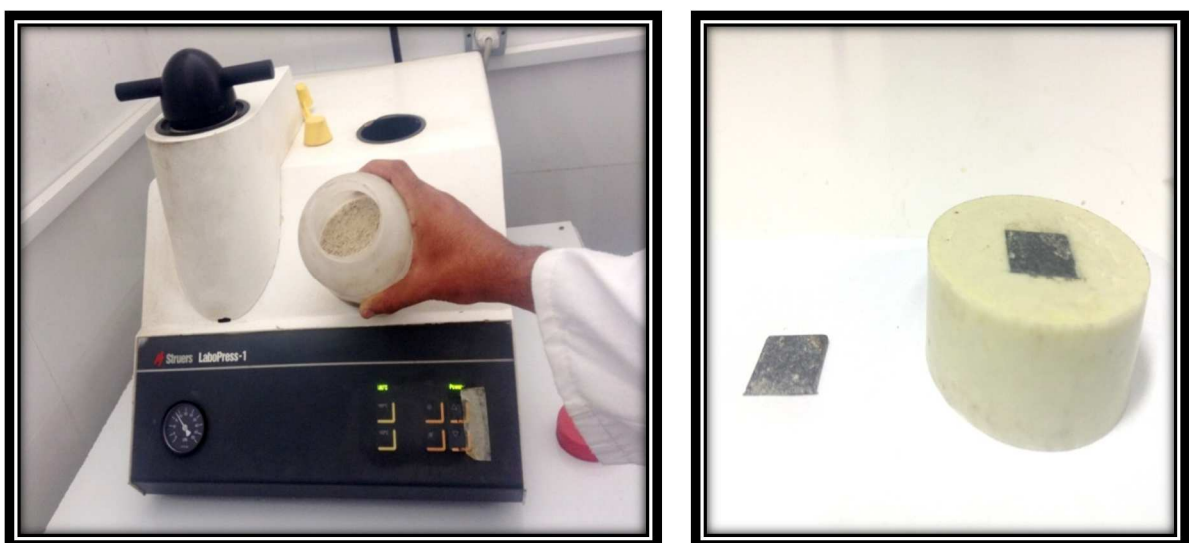


Figure 4.3 : Machine d'enrobage (Struers LaboPress-1) et l'échantillon enrobé

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-2. 5-Polissage des échantillons :

Le polissage est le processus qui rend l'état de surface d'un matériau lisse et brillant à but de préparer les échantillons à un examen microscopique, il se fait par des appareils soit manuelles ou automatique.

Dans notre étude en le fait avec l'appareille manuelle (Struers LaboPol-25) avec des papiers verres de taille de grains **500,800,1000,1200,2400**et **4000** micromètre et la finition de polissage on la fait avec l'automatique (PRESI Mecatech 264) en mode manuelle en utilisant le film de Film de polissage alumine, 1 μm . Diamètre 200 mm, les figures suivantes montres les deux types d'appareilles

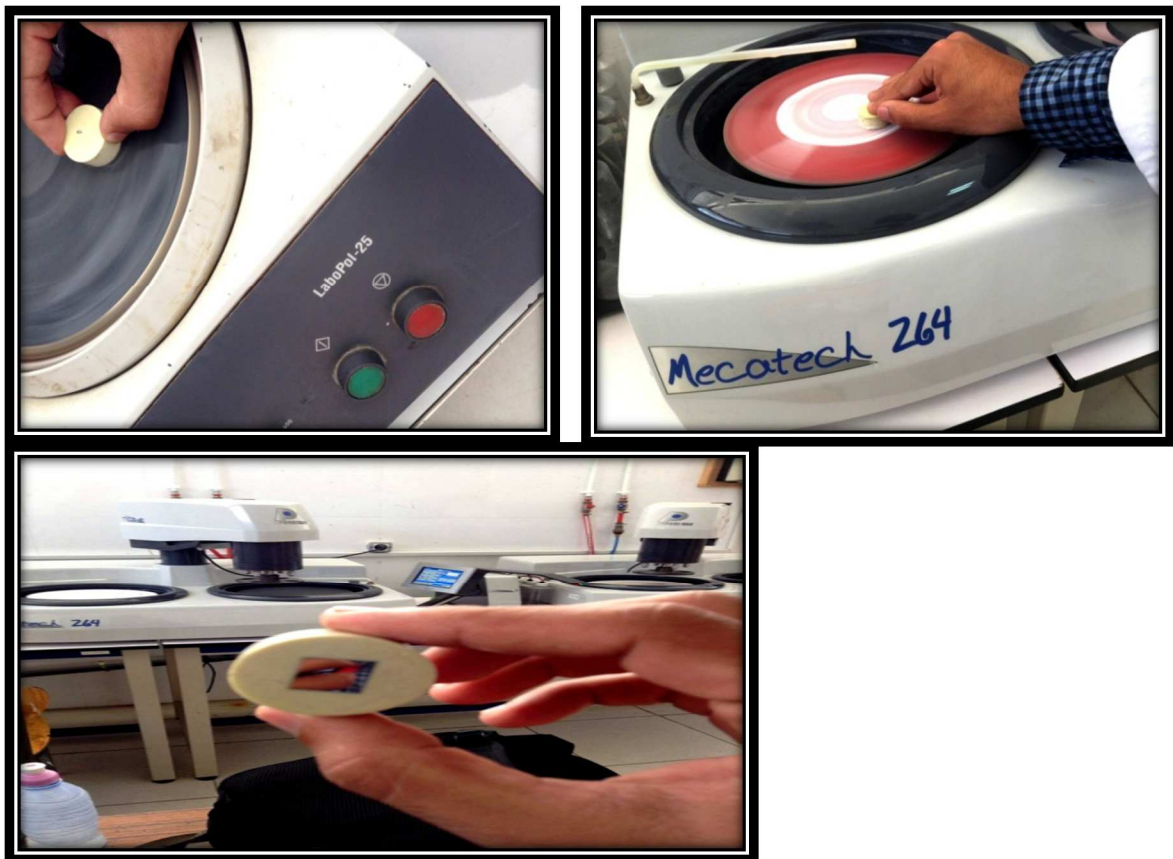


Figure 4.4 : le processus de polissage de L'échantillon

IV-2. 6-l'attaque chimique :

Après le polissage il ya une étape avant de maitre l'échantillon sous microscope pour l'observation de microstructure, cette procédure s'appelle l'attaque chimique.

-Définition de l'attaque chimique :

C'est d'injecter quelque gouttelettes d'une solution chimique spéciale avec une seringue sur la surface de matériaux pendant un temps précis qui est définis par des apparaissons des bulles d'air Bouillir sur la surface, après ces apparaissons en attend quelque secondes et après en lave l'échantillon avec l'eau distillée sans toucher la surface avec les doigts ou autres choses Pour éviter les rayures sur la surface.

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-2. 6.1-la solution d'attaque utilisée :

En utilise une solution d'attaque chimique, composé de 6% d'acide chlorhydrique et 4% de NAOH et 90% d'eau distillé.

Le temps d'attaque pour les échantillons est remarqué dans l'intervalles de 2 minutes et 2 minutes 20 seconde.

La figure 1 montre la solution d'attaque et l'échantillon de titane TA6V



Figure 4.5:l'échantillon prêt pour l'attaque chimique

IV-2. 7-Observation de microstructure :

On obtient la microstructure de nos échantillons avec le microscope Nikon assimilé par un ordinateur avec le programme NIS-ElementsViewer. En prendre toutes les zooms possible avec ce microscope.

La figure ci-dessous montre l'ensemble d'appareilles nécessaires utilisés dans cette étude pour faire l'observation et prendre des photos de microstructures de nos échantillons.



Figure 4.6 : Appareillages de l'observation de la microstructure des matériaux

IV-2. 8. Essai de dureté :

On fait des essais de dureté par l'appareille INNOVA NEMESIS 9000 pour tout les échantillons de ta6v enrobés, en applique une charge de 10 kgf à notre matériau dans 3 points différents.



Figure 4.7 : Appareille de l'essai de la dureté

IV-2. 9. Essais de micro dureté :

On fait des essais de micro dureté par l'appareille WILSON VH3300 pour tout les échantillons de ta6v enrobés, on applique une charge de 0.05 HV (Hardness Vickers) à notre matériau dans 3 points différents de la phase α et 3 autres points de la phase β . Le but de ces essais est de déterminer la dureté de notre alliage TA6V dans chaque phase et pour différencier les deux phases à partir de résultats.

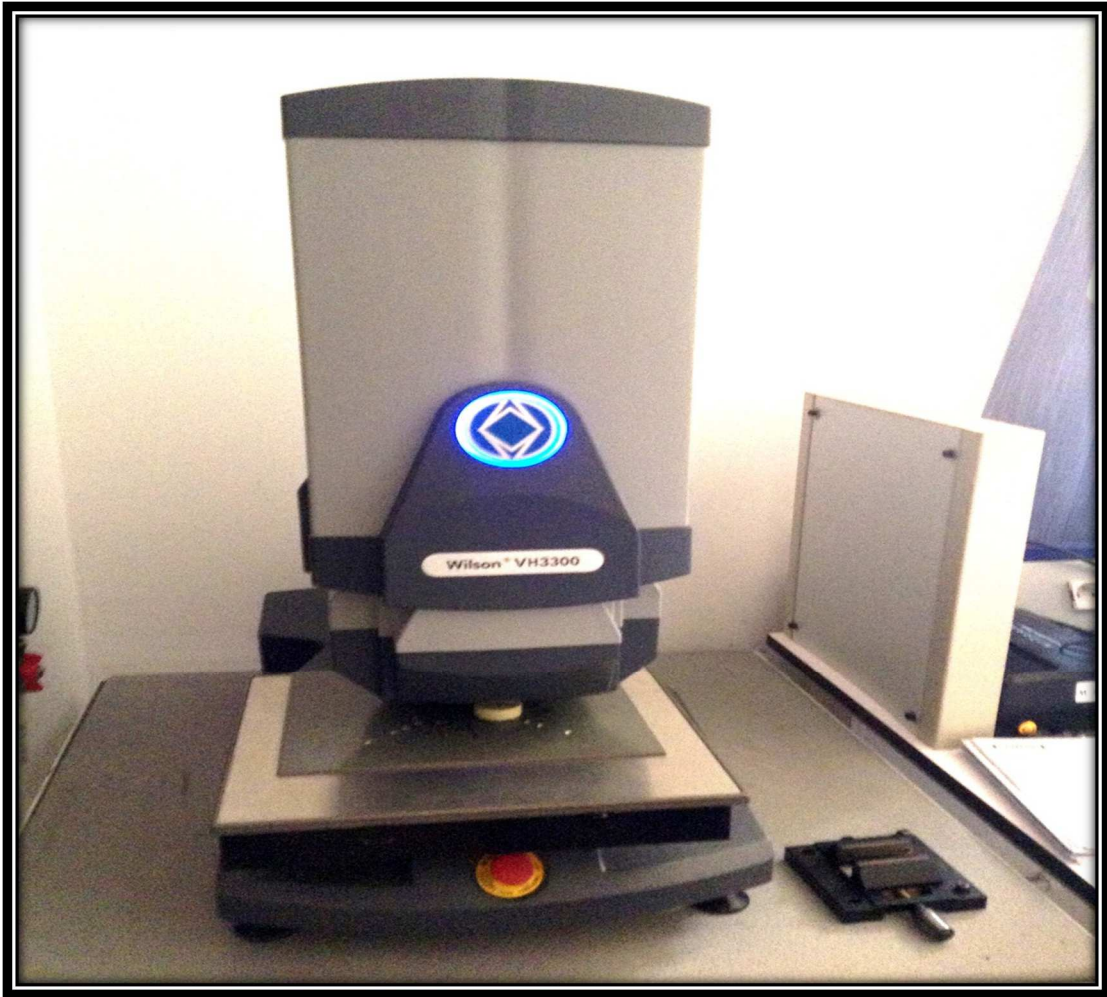


Figure 4.8 : Appareille de micro dureté (WILSON VH3300)

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-3. Le control par Courant de Foucault

IV-3. 1 : fabrication des sondes :

On a fabriqué 5 sondes planes diffères, pour l'utiliser dans notre examen CF.

- une sonde de 100 spires avec diamètre de ferrite de 0.4 mm, et 0.132 mm de diamètre de fil utilisé.
- une sonde de 100 spires avec diamètre de ferrite de 0.4 mm, et 0.25 mm de diamètre de fil utilisé.
- une sonde de 200 spires avec diamètre de ferrite de 0.4 mm, et 0.132 mm de diamètre de fil utilisé.
- une sonde de 400 spires avec diamètre de ferrite de 0.3 mm, et 0.132 mm de diamètre de fil utilisé.

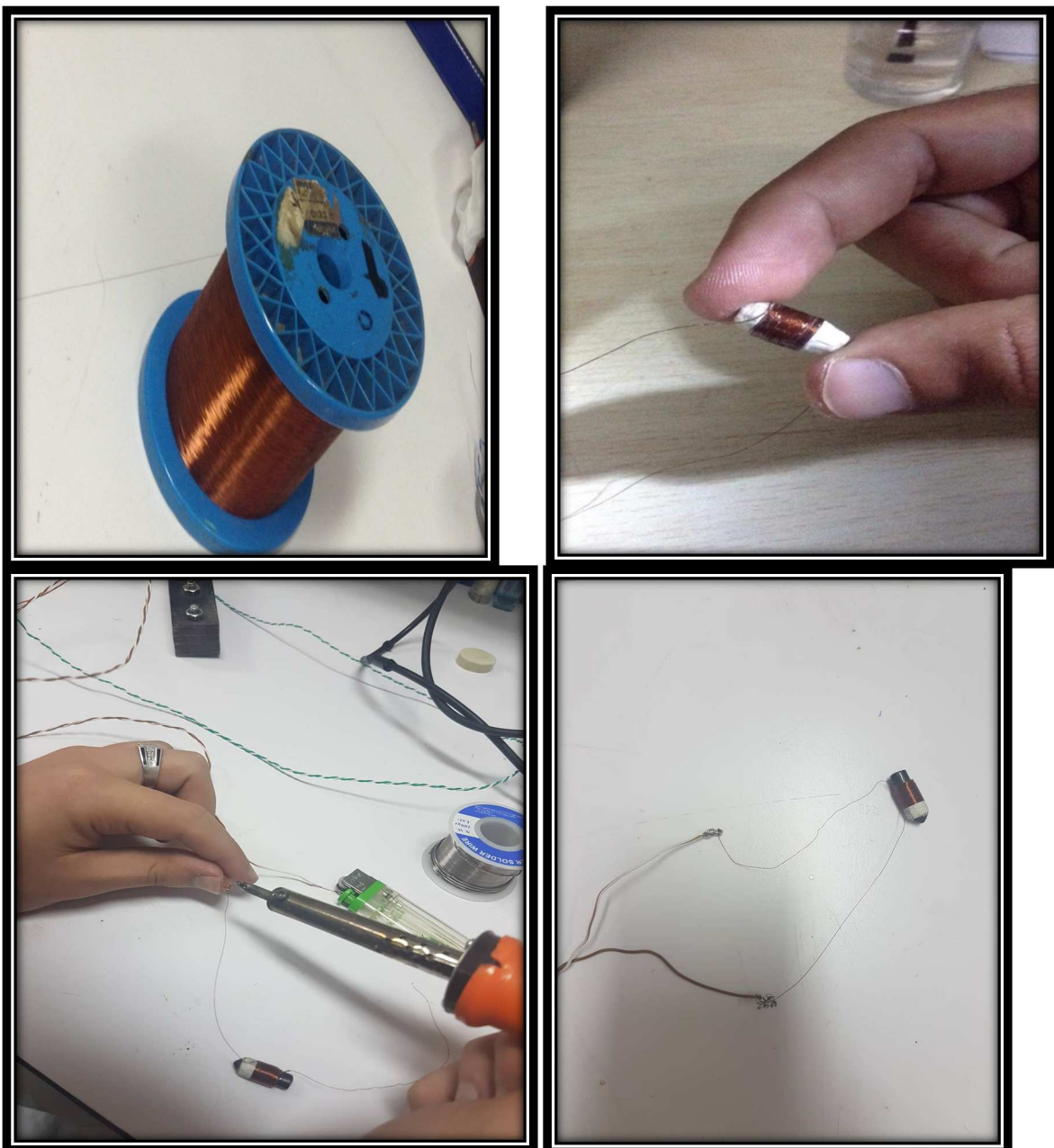


Figure 4.9: étape de fabrication de sonde

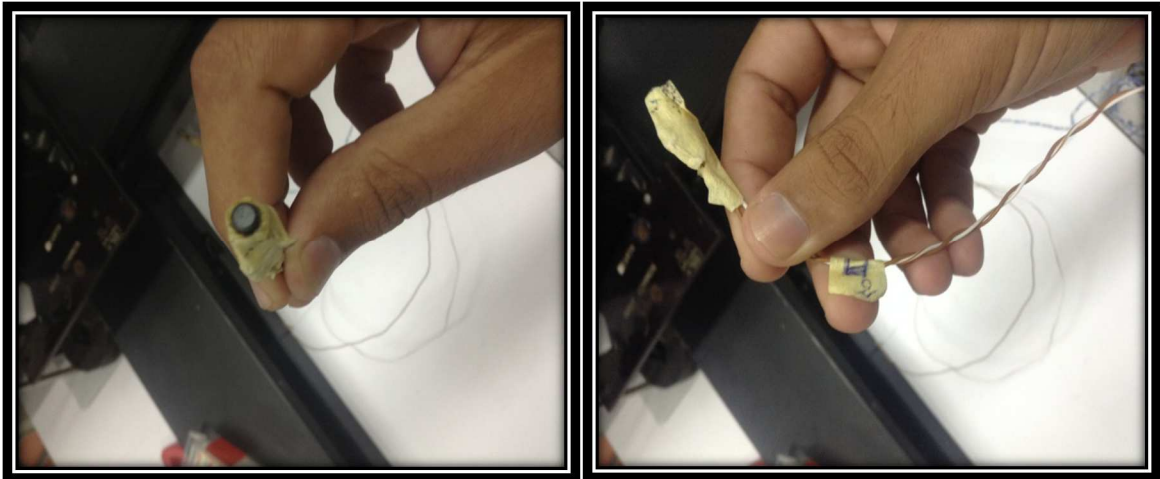


Figure 4.10 : sonde 100 spire, $D_{fil} = 0.132\text{mm}$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

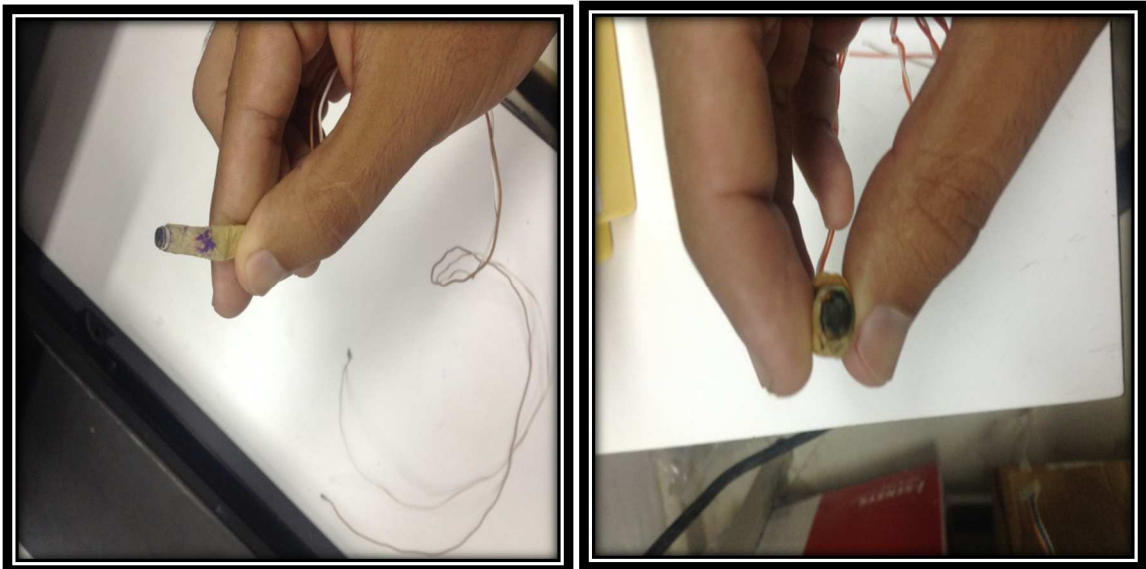


Figure 4.11 : sonde 100 spire, $D_{fil} = 0.20\text{mm}$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

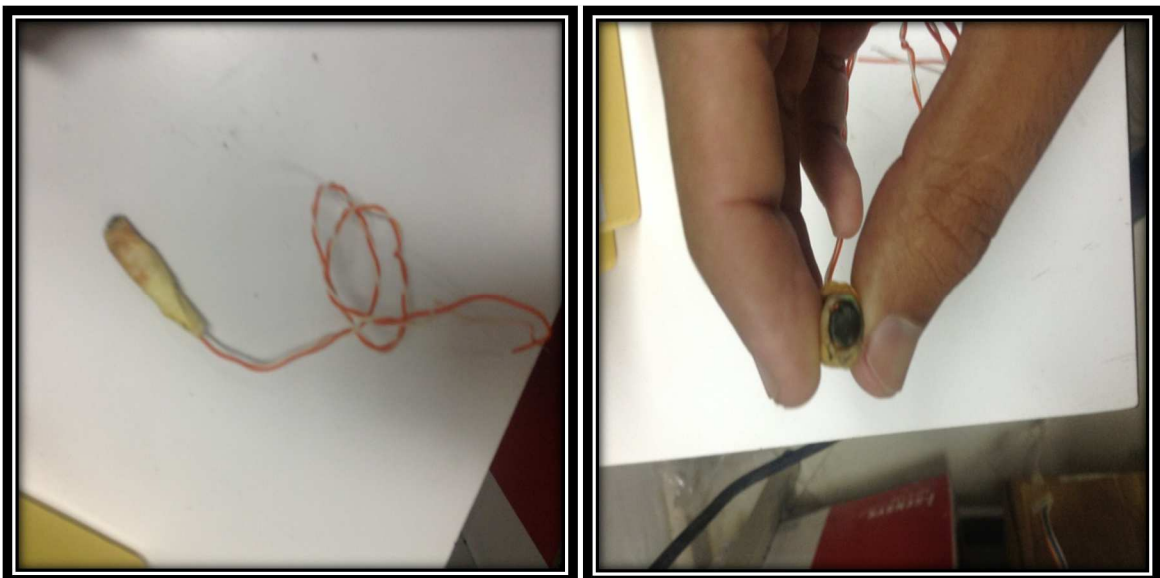


Figure 4.12 : sonde 200 spire, $D_{fil} = 0.132\text{mm}$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

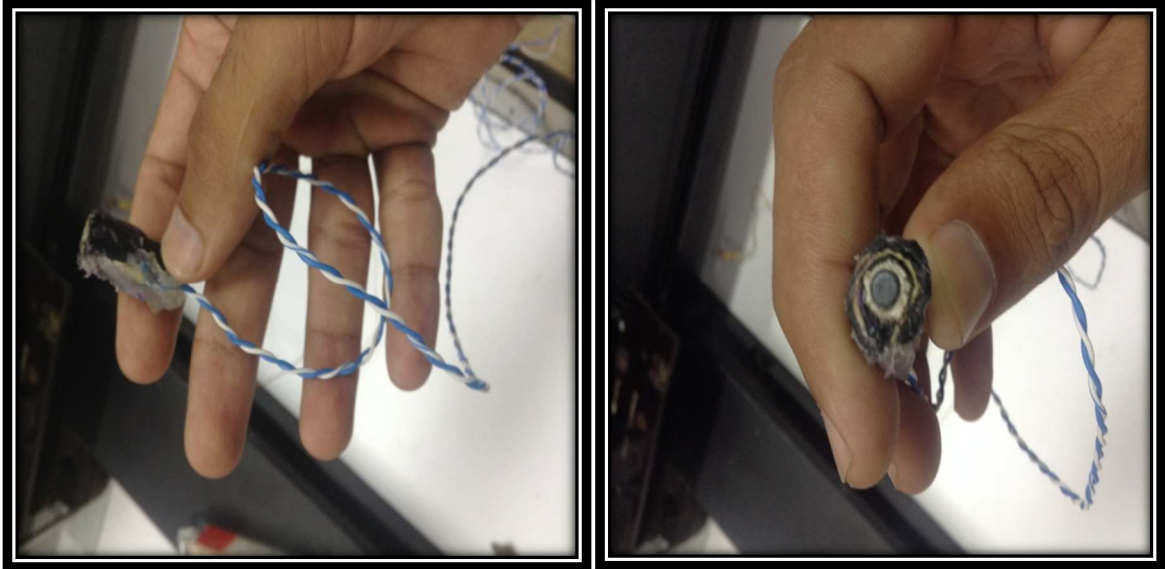


Figure 4.13 :sonde 400 spire, $D_{fil}=0.132\text{mm}$ et $D_{\text{ferrite}}=0.3\text{mm}$

IV-3.2 Manipe de CF classique :

On Connecte les bornes du capteur à l'appareil de mesure de l'inductance et de résistance de sonde par le Hpagilent LCR mètre. On mesure à vide les valeurs de la résistance et l'inductance de la sonde utilisée puis on les mesure on charge on poser la tête de sonde à la surface de l'échantillon, les résultats sont enregistrés sous ordinateur par le programme Hp4284A.EXE.

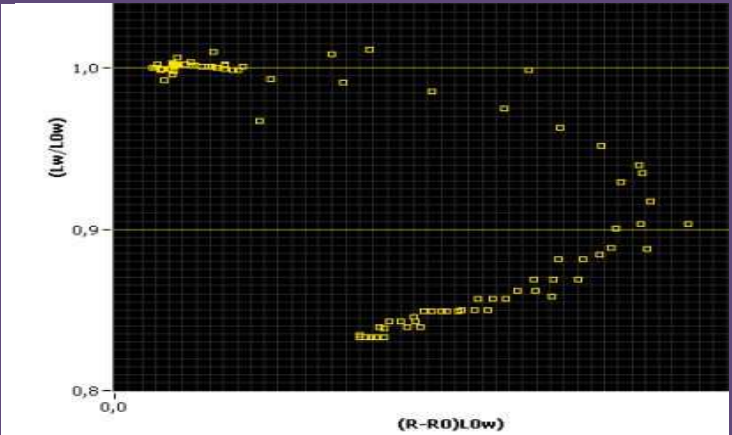
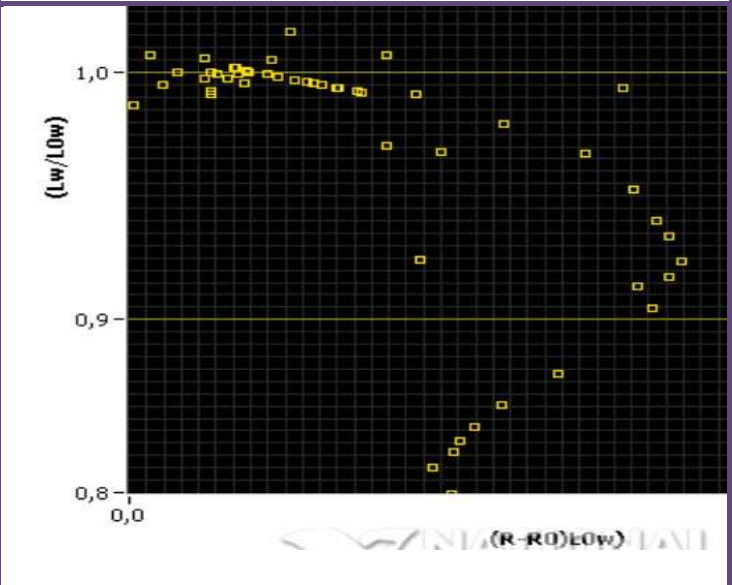
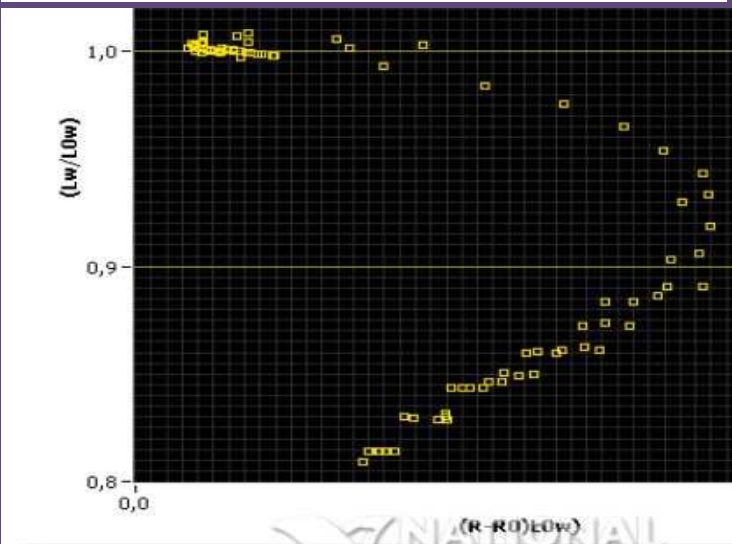
IV-3.2.1 Matériel utilisé :

a-Hpagilent LCR mètre:

Le 4284A LCR mètre est une solution rentable pour mesurer des composants et des matériaux. La large plage de fréquences de test comprise entre 20Hz et 1MHz et les performances du super signal de test 4284A permettent de tester les composants correspondant aux normes de test les plus couramment utilisées. [34]

b-Les sondes : On a mesurés par toutes les sondes réalisé l'impédance dans le matériau non traité, et par la remarque dans les résultats obtenu et le diagramme d'impédance on a choisi la sonde de 200 spires de diamètre de fil de 0.132 mm et de 4 mm de diamètre de ferrite on la trouve utile pour terminer l'examen.

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

Nombre de Spire	Diamètre de fil	Diamètre de ferrite	Diagramme d'impédance
100	0.132mm	4mm	
100	0.200mm	4mm	
200	0.132mm	4mm	

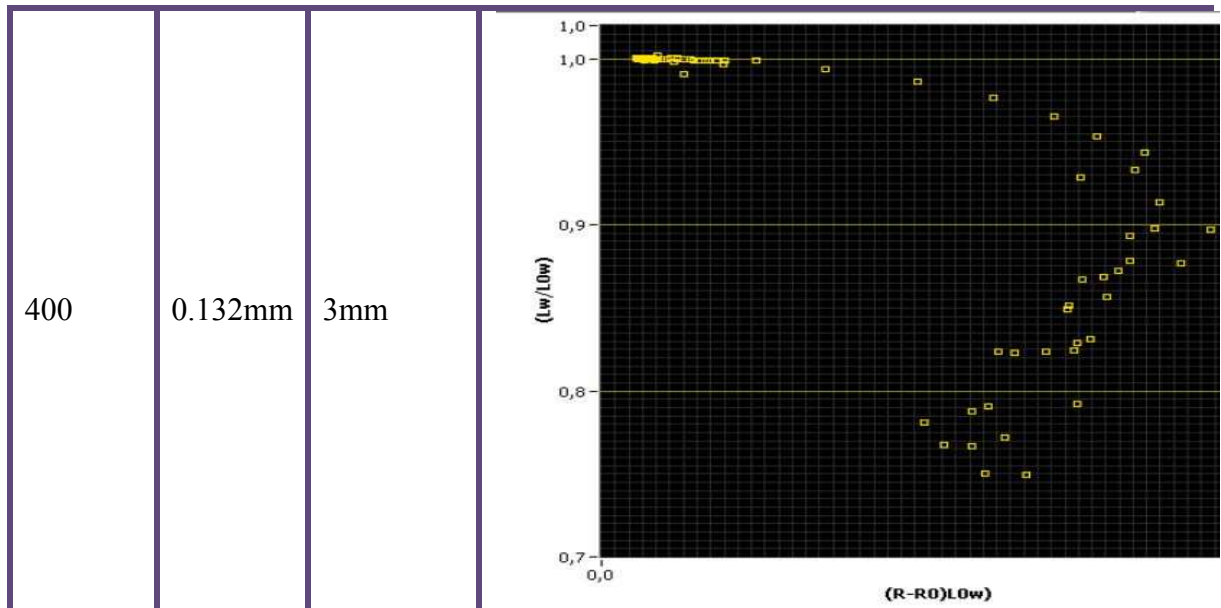


Tableau 4.3 : caractéristique des sondes

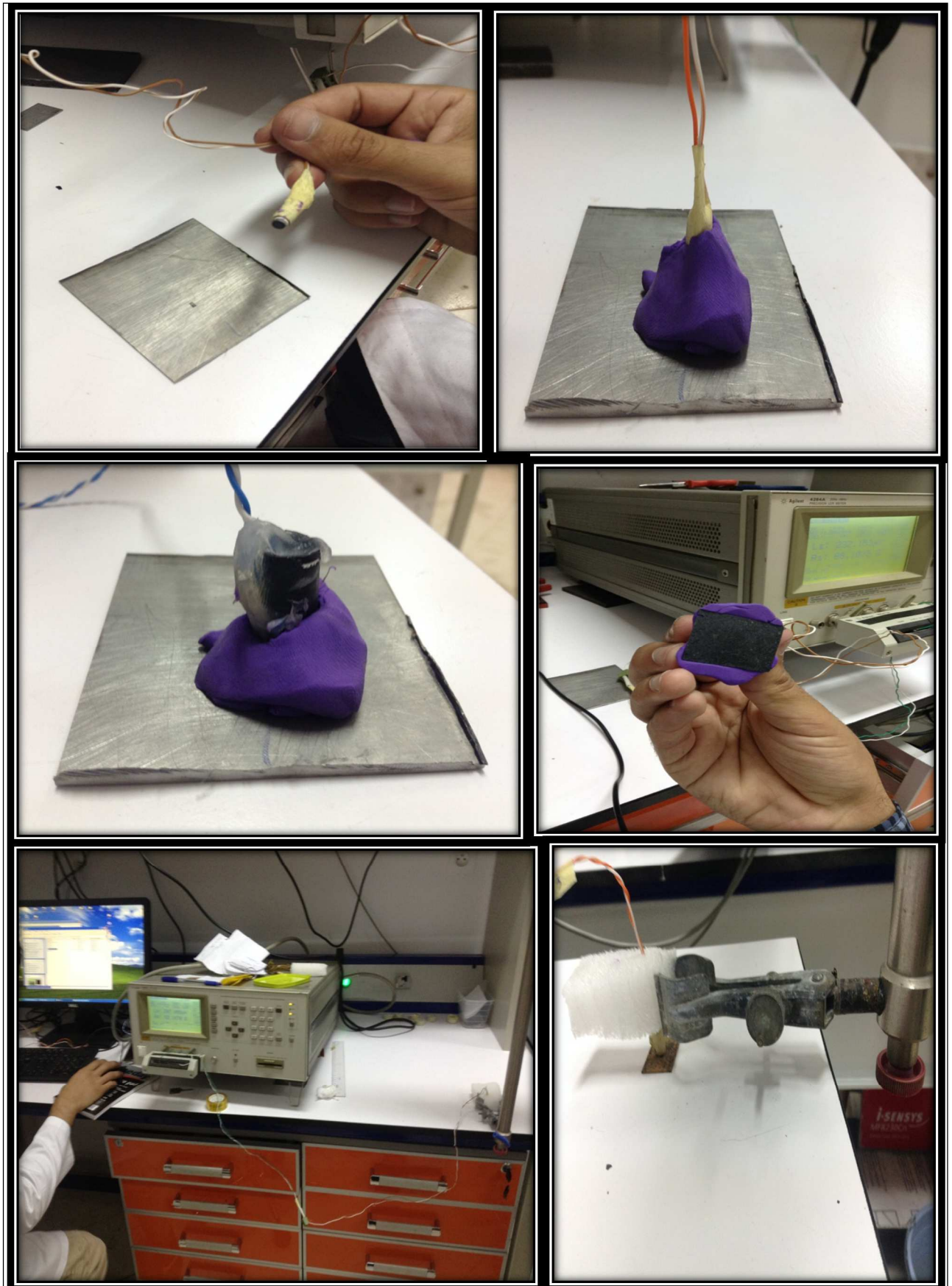


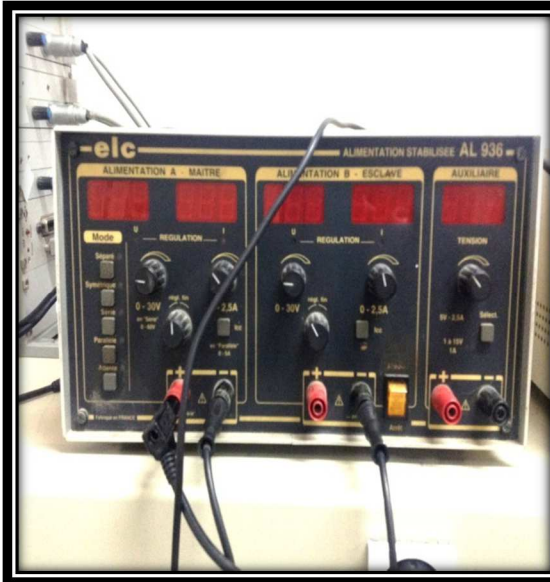
Figure 4.14 : application de CF classique par les différentes sondes réalisés

Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-3.3 Manipe de CF pulsé :

IV-3.3.1 Matériels utilisés :

On utilise dans les CF pulsé une alimentation, un oscilloscope, un générateur de fréquence GBF et une sonde comme illustré dans la figure ci-dessous :



Alimentation stabilisé (elc AL 936)



Oscilloscope TektronixTds 3054



Générateur de basses fréquencesgx240



Sonde de CF pulsé

Figure 4.15 : principaux appareils de control par CF pulsé

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-1. Microstructures :

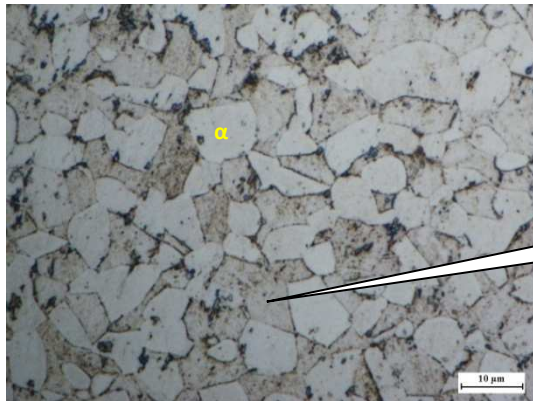


Figure 5-1a Echantillon Non Traité

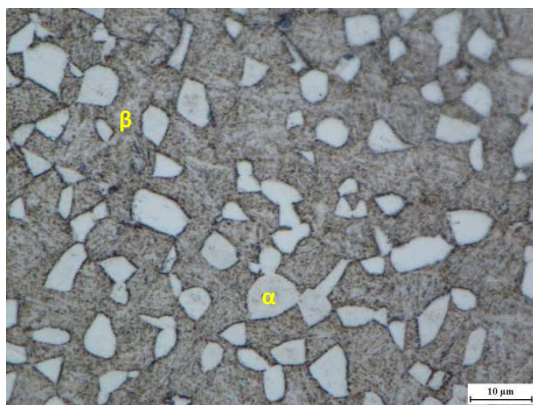


Figure 5-1b. 550°C Refroidissement au four

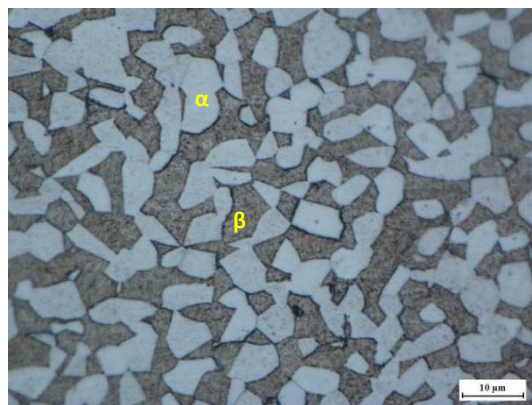


Figure 5-1c. 550°C trempe à eau

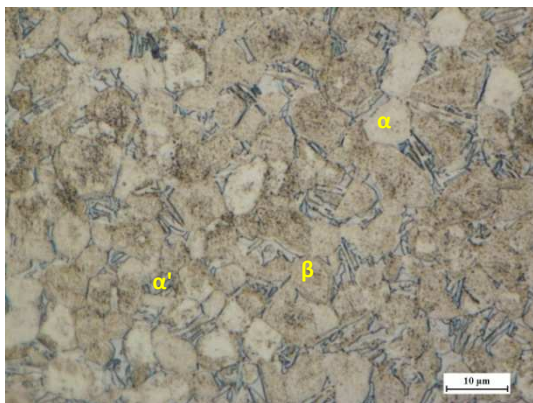


Figure 5-1d 750°C Refroidissement au four

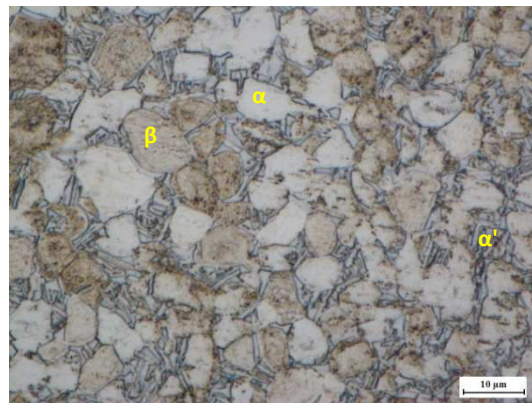


Figure 5-1e 750°C trempe à eau

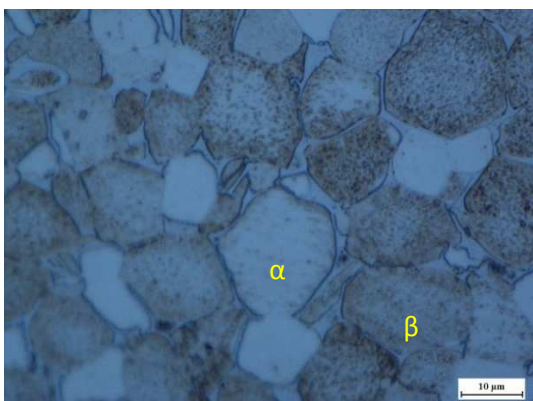


Figure 5-1f 950°C Refroidissement au four

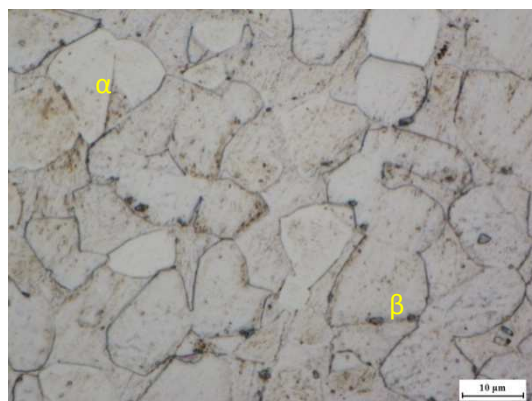


Figure 5-1g 950°C trempe à eau

Figure 5-1 : Changement de microstructures avec les six types du traitement

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-1-2 Discussion :

. La **Figure 5-1** montre les microstructures obtenues par le microscope après 6 traitements thermiques de températures et modes de refroidissement déférent, La **Figure 5-1a** montre la microstructure de l'échantillon de référence c'est-à-dire l'échantillon non traité, après une visualisation de **Figure 5-1a** on peut définisse la nature des phases qui représentent notre échantillon de titane TA6V non traité. On constate deux types des phases, une phase α avec des grains blancs et l'autre c'est une phase β qui est défini par les grains colorés en gris foncé, on remarque aussi que la taille des grains α est supérieure que du β .

. La **Figure 5-1b** et **5-1c** représentent respectivement un traitement thermique fait à 550°C suivis par un refroidissement long au four et une trempe à eau.

Dans le traitement à 550°C suivis par un refroidissement long au four (**Figure 5-1b**) on constate que deux phase favorise l'alliage, une phase α et l'autre β comme l'échantillon Non traité, on remarque aussi que la taille et le nombre des grains β est supérieure que α , par une comparaison avec l'échantillon de référence on observe que β augmente et α diminue.

Dans le traitement à 550°C suivis par une trempe à eau (**Figure 5-1c**), on constate la même chose deux phases α et β avec une augmentation de nombre du grain de α par rapport à β , Dans ce cas-là on constate que α augmente et β diminue.

. La **Figure 5-1d** et **5-1e** représentent respectivement un traitement thermique fait à 750°C suivis par un refroidissement long au four et une trempe à eau.

Dans le traitement à 750°C suivis par un refroidissement long au four (**Figure 5-1d**) on constate une nouvelle phase qui apparait dans la microstructure sous forme des lamelles, cette phase est appellais α' ou α martensite. Alors dans ce traitement il y a trois phases favorisent l'alliage, une phase α et α' et une autre β , on remarque aussi que la taille et le nombre des grains β est supérieure que α , par une comparaison avec le l'échantillon de référence on observe que β augmente et α diminue.

Dans le traitement à 750°C suivis par une trempe à eau (**Figure 5-1e**), on constate la même chose que dans le traitement à même température suivi par un refroidissement long au four trois phases α , α' et β ou α' est plus importante dans l'échantillon trempé, on remarque aussi que la taille et le nombre des grains α est supérieure que β , par une comparaison avec l'échantillon de refroidi au four on constate que α augmente et β diminue.

Dans le traitement à 950°C suivis par un refroidissement long au four (**Figure 5-1f**) on constate une augmentation de la taille des grains β et une diminution dans le nombre et la taille des grains α , en remarque aussi que les lamelles α' se réduit au joint des grains.

Dans le traitement à 950°C suivis par une trempe à eau (**Figure 5-1g**) on remarque presque la même structure que le non traité sauf que les tailles des grains augmentent dans les deux phases et on constate aussi l'absence total de la phase α' dans ce traitement.

Chapitre V : Résultats et interprétations

D'après ces remarques on peut conclure :

- La phase β favorise le traitement thermique de **550°C** suivi par un refroidissement long au four.
- La phase α favorise un traitement thermique de **550°C** suivi par une trempe à eau.
- La phase α' apparue dans le traitement de **750°C** équivalente avec la Figure 3-8 (Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V) et elle est importante dans le traitement qui suivi par une trempe.
- La taille des grains augmente avec l'augmentation de la température du traitement thermique alors le nombre de ces derniers est diminué.
- Le grossissement des grains dans le traitement de 950°C dirige vers une phase β .

V-2 Relation entre les valeurs de dureté de l'alliage de titane TA6V traité en HV:

Echantillon	NT	550 RF	550 TE	750 RF	750 TE	950 RF	950 TE
Dureté (HV)	393,97	396,33	387,67	335,67	338,00	398,33	420,67

Tableau 5-1 : Valeurs de dureté en fonction du traitement thermique

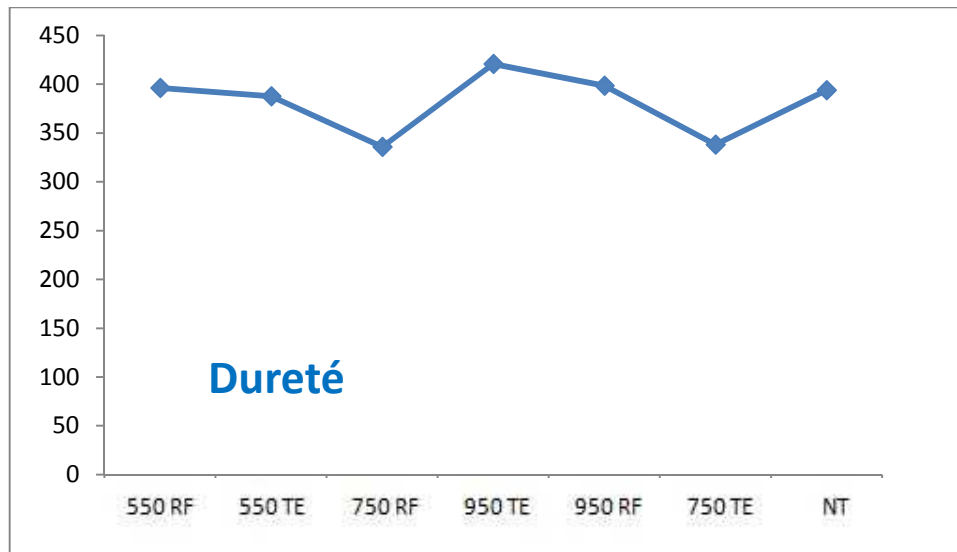


Figure 5.2 : Relation entre les valeurs de dureté en HV de l'alliage de titane TA6V traité

V-2-1 Discussion:

D'après La Figure 5-2, on constate que la valeur la plus basse de la dureté est pour l'échantillon traité à 750°C dans les deux modes de refroidissement, ça valeur est presque 335HV, cette diminution due à la nouvelle phase apparue α' , on remarque aussi et une petite augmentation de la dureté de 20HV dans l'échantillon traité à 950°C et suivi par une trempe à l'eau par rapport aux autres échantillons.

Chapitre V : Résultats et interprétations

Une déformation de 15 jusqu'à 20 HV on peut la négliger alors y'a pas de changement de dureté sauf que dans le traitement de 750°C.

On peut conclure que pour assurer une bonne dureté de TA6V, il est favorable d'éviter un traitement de 750°C.

V-3 Variation de la micro dureté dans la phase α et β :

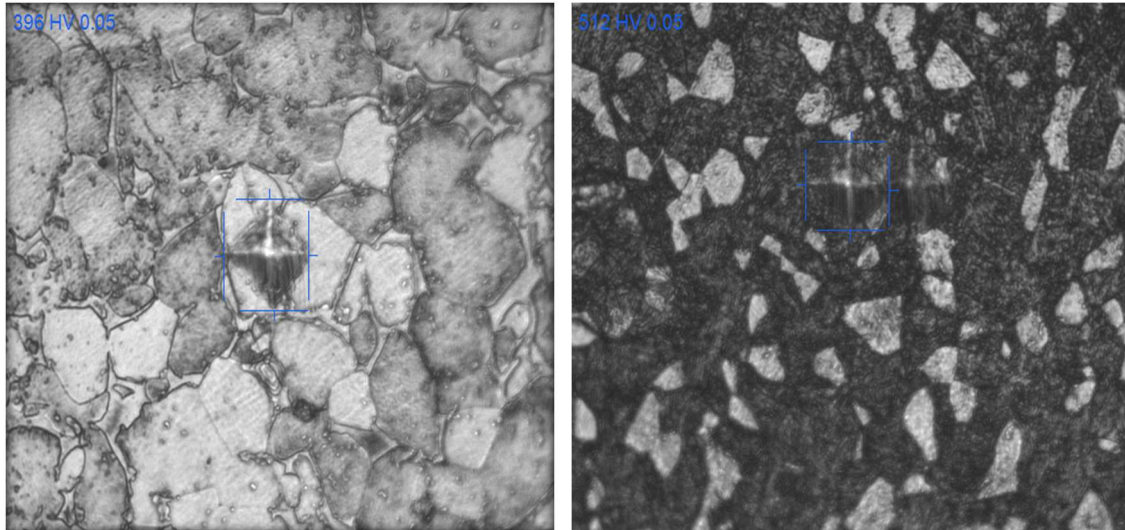


Figure 5.3 : L'application de la micro dureté sur les deux phases alfa et beta

Les valeurs de la micro dureté en HV de l'alliage de titane TA6V traité:

	NT	950 T	950 R	750 T	750 R	550 T	550 R
alpha	351	475	535	445	427	468	512
beta	173	423	452	412	354	425	452

Tableau 5-2 : Les valeurs de micro dureté

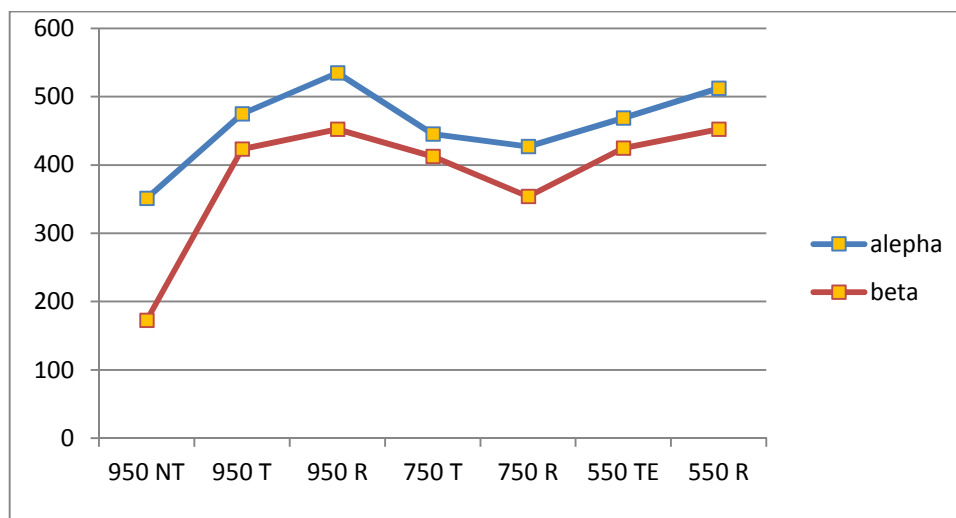


Figure 5.4: Relation entre les valeurs de la micro dureté en HV dans les phases α et β de l'alliage de titane TA6V traité

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-3-1 Discussion :

La Figure 5-4 montre deux graphes de la micro dureté en fonction du traitement thermique le graphe bleu représente la micro dureté dans la phase α et le rouge représente la micro dureté en phase β .

D'après la remarque dans la micro dureté de α on constate que la valeur la plus basse de la micro dureté est pour l'échantillon non traité, après les deux échantillons traités à 750°C.

En remarque que dans les traitements suivis par un refroidissement au four la micro dureté est supérieure que dans les traitements suivis par des trempes à eau.

En remarque aussi que la valeur de la micro dureté en phase α est plus grand que les valeurs de β .

Alors, après ces commentaires on peut conclure :

- ❖ La micro dureté dans la phase α est meilleure que celle dans phase β .
- ❖ La micro dureté est meilleure dans les traitements thermiques suivis par des refroidissements longs au four.
- ❖ Pour assurer une bonne micro dureté il est favorable d'éviter un traitement de 750°C.

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-4 Résultats de courant de Foucault:

V-4-1 Diagrammes d'impédances obtenus:

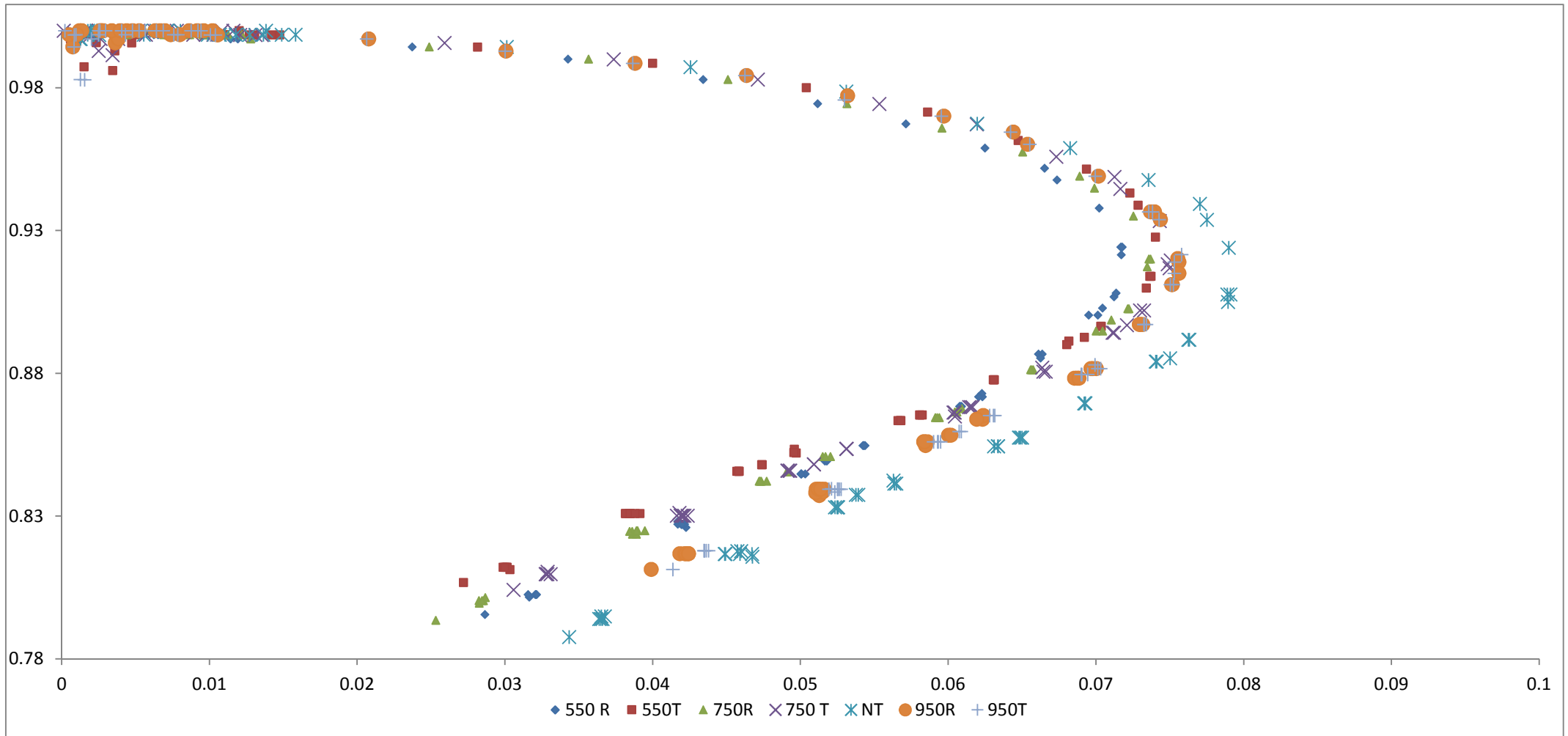


Figure 5.5 : Les diagrammes d'impédances de tous les échantillons

V-4-2 Diagrammes d'impédances obtenus pour la fréquence de 125 KHz:

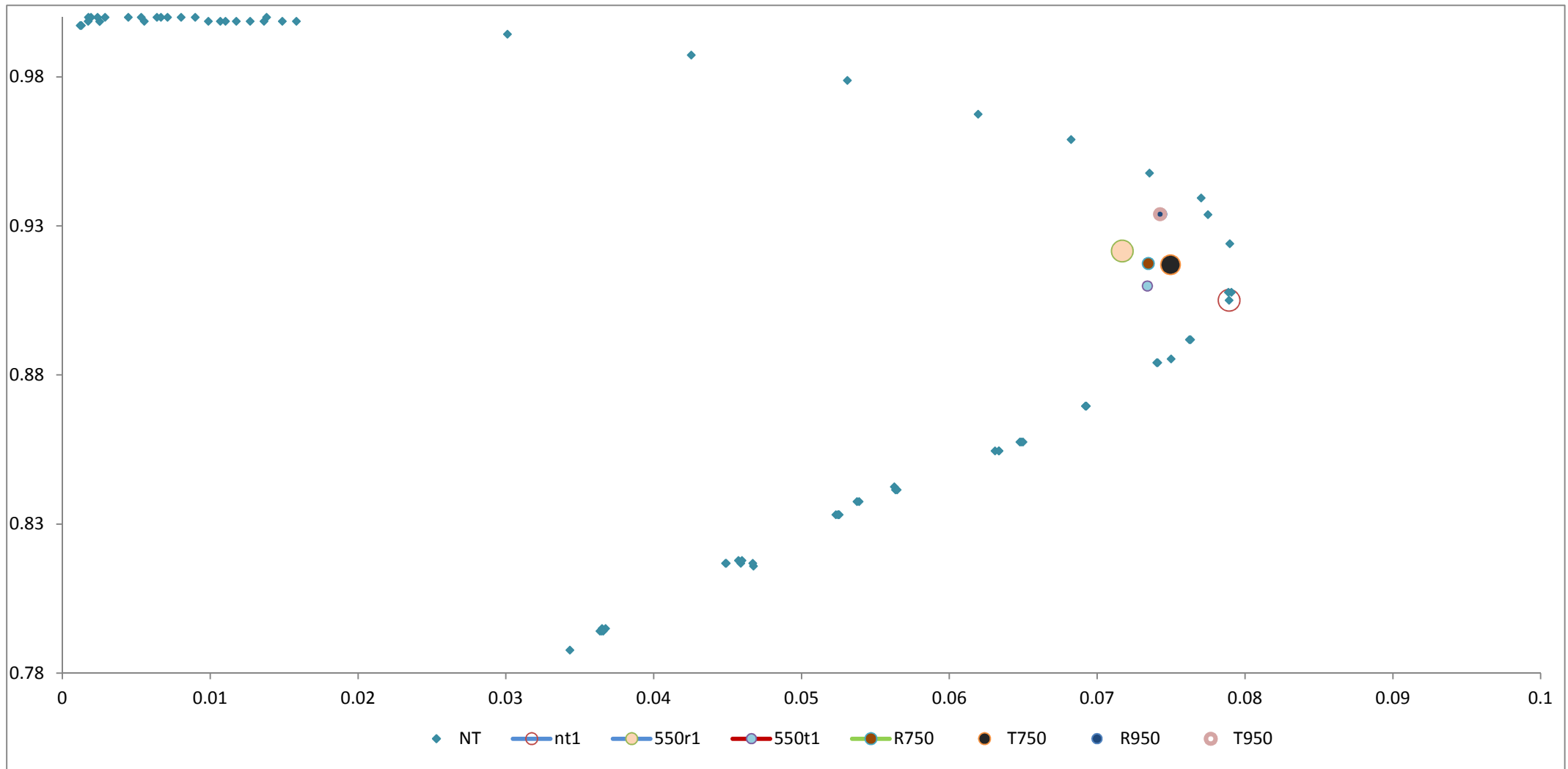


Figure 5.6 : Les diagrammes d'impédances obtenues pour la fréquence de 125 KHz

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-4-3 diagramme d'impédance Z en fonction de basses fréquences:

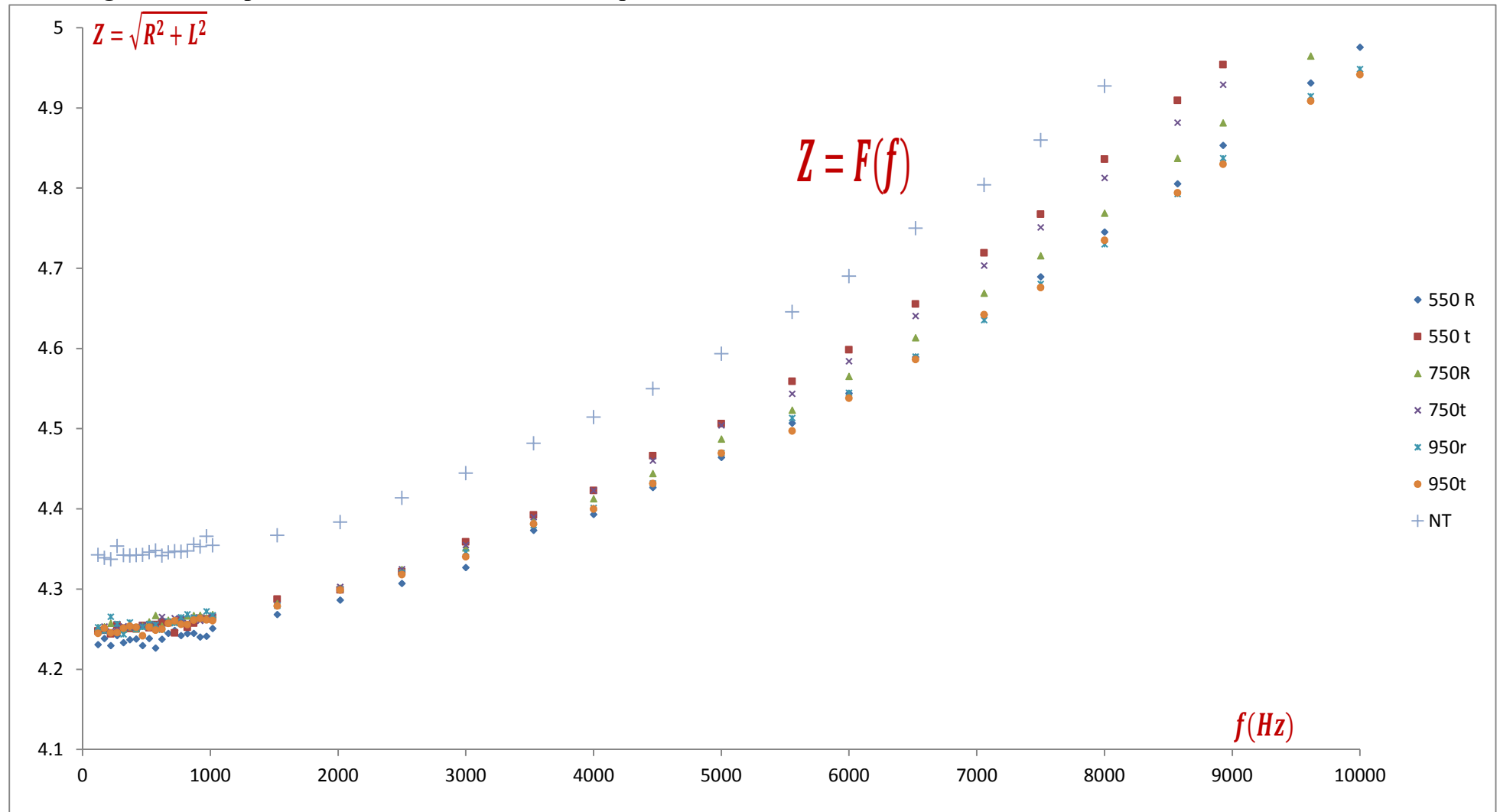


Figure5-7 : diagramme d'impédance en fonction de base fréquence

Chapitre V : Résultats et interprétations

V-4-4 Diagramme d'impédance Z en fonction de marge des fréquences(120 Hz à 500kHz) :

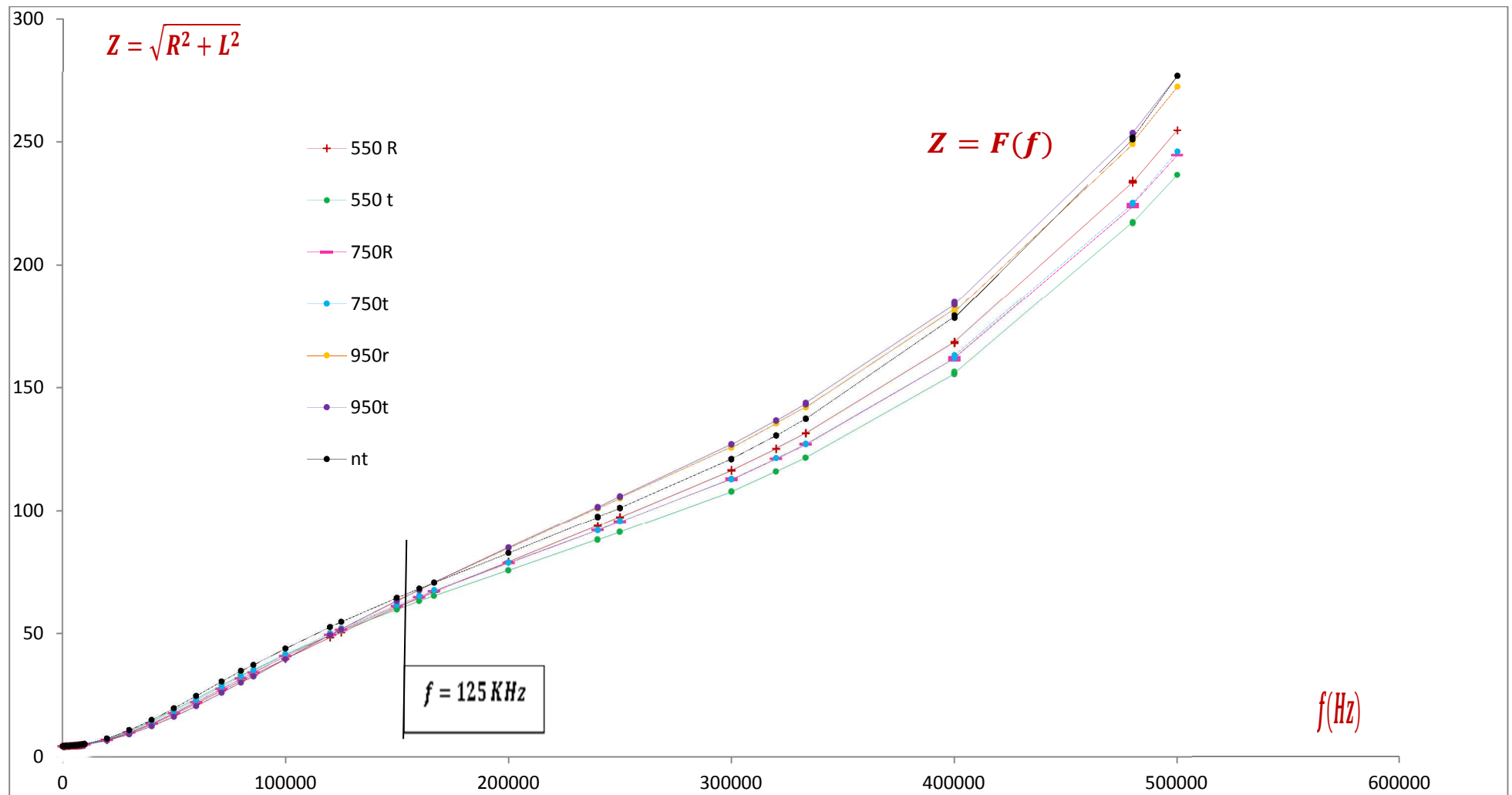


Figure5-8 : diagramme d'impédance en fonction de fréquences

V-4-5 Diagramme d'impédance dans la fréquence de 125 KHz :

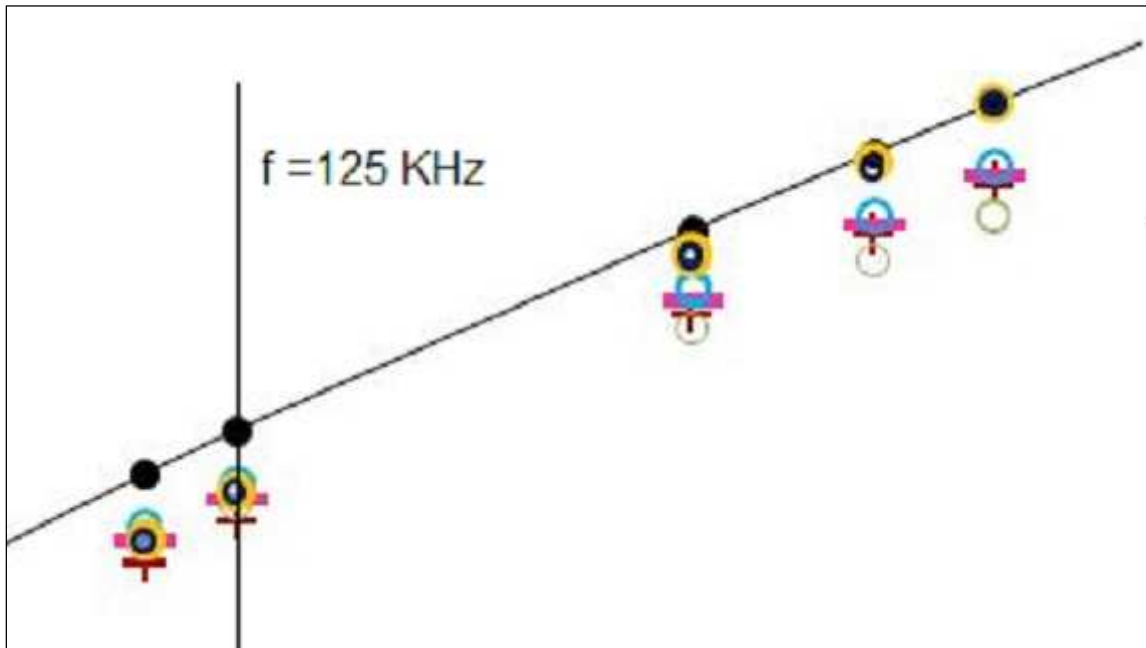


Figure 5-9 : Diagramme d'impédance dans la fréquence de 125 KHz

V-4-6 Discussion:

Les différents traitements thermiques mentionnés précédemment ont des modifications de la microstructure.

L'analyse des diagrammes d'impédance de la Figure (5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9) montre une différence nette dans l'allure des courbes d'impédance des échantillons traités et celle de l'échantillon de référence Non Traité, soit dans la marge de fréquence utilisée (120Hz -500KHz) ou dans une mono fréquence prise 125KHz, c'est allures montre que les modifications dans les échantillons peuvent être détectées.

La variation d'impédance à la basse fréquence est particulièrement significative entre l'échantillon non traité et les échantillons qui sont subis à des traitements thermiques suivis par des refroidissements où des trempes à l'eau à cause de l'effet de pénétration par courants de Foucault.

Les valeurs d'impédances aux hautes fréquences ne sont pas très différentes à cause de l'effet que les changements de conductivité sont dans la direction de la fréquence.

V-5. Variation d'impédance Z et la dureté à 125 KHz:

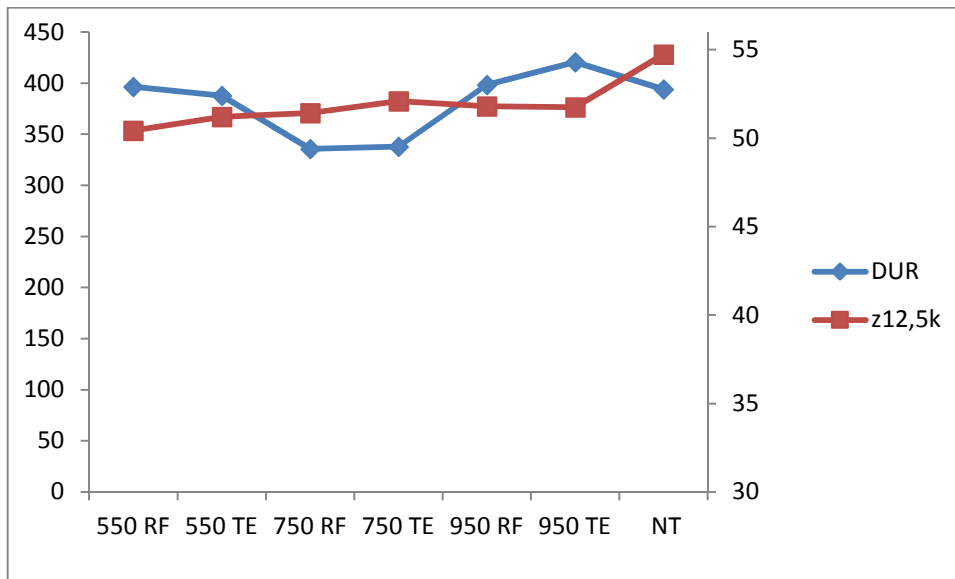


Figure 5-10 : Variation d'impédance Z à la fréquence 125 kilo hertz et la dureté

V-5- 1 Variation d'impédance Z et la dureté à 10 KHz:

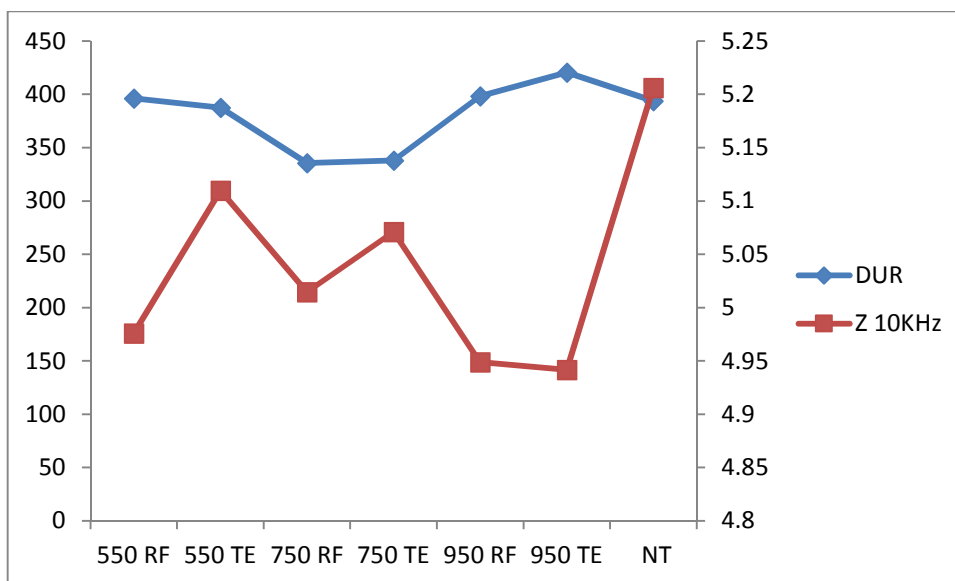


Figure 5 -11 : Variation d'impédance Z et la dureté à 10 KHz

V-5- 2. Discussion:

La Figure 5-8 montre la variation de l'impédance et la dureté correspond les fréquences 10 et 125 KHz, on constate que le comportement dureté-impédance est de façon inverse dans tous les échantillons traités sauf que dans l'échantillon traité à 750°C le comportement dureté-impédance est le même, en remarque aussi que les basses fréquences donnent un comportement similaire à la dureté.

D'après ces remarques en peut conclure :

Chapitre V : Résultats et interprétations

- le comportement dureté-impédance est inversement proportionnelle si le matériau ne contient que la phase α et β seulement.

- le comportement dureté-impédance est directement proportionnelle si le matériau contient une phase α' martensite.

-On peut connaître le changement de dureté de l'alliage TA6V que avec l'impédance et sans faire le test de dureté.

-On peut identifier les phases de l'alliage TA6V sans faire un test microscopique avec la connaissance du comportement d'impédance.

-Il faut utiliser des basses fréquences pour simuler le même comportement de dureté.

V-6. Variation de phase et la dureté pour les différentes fréquences

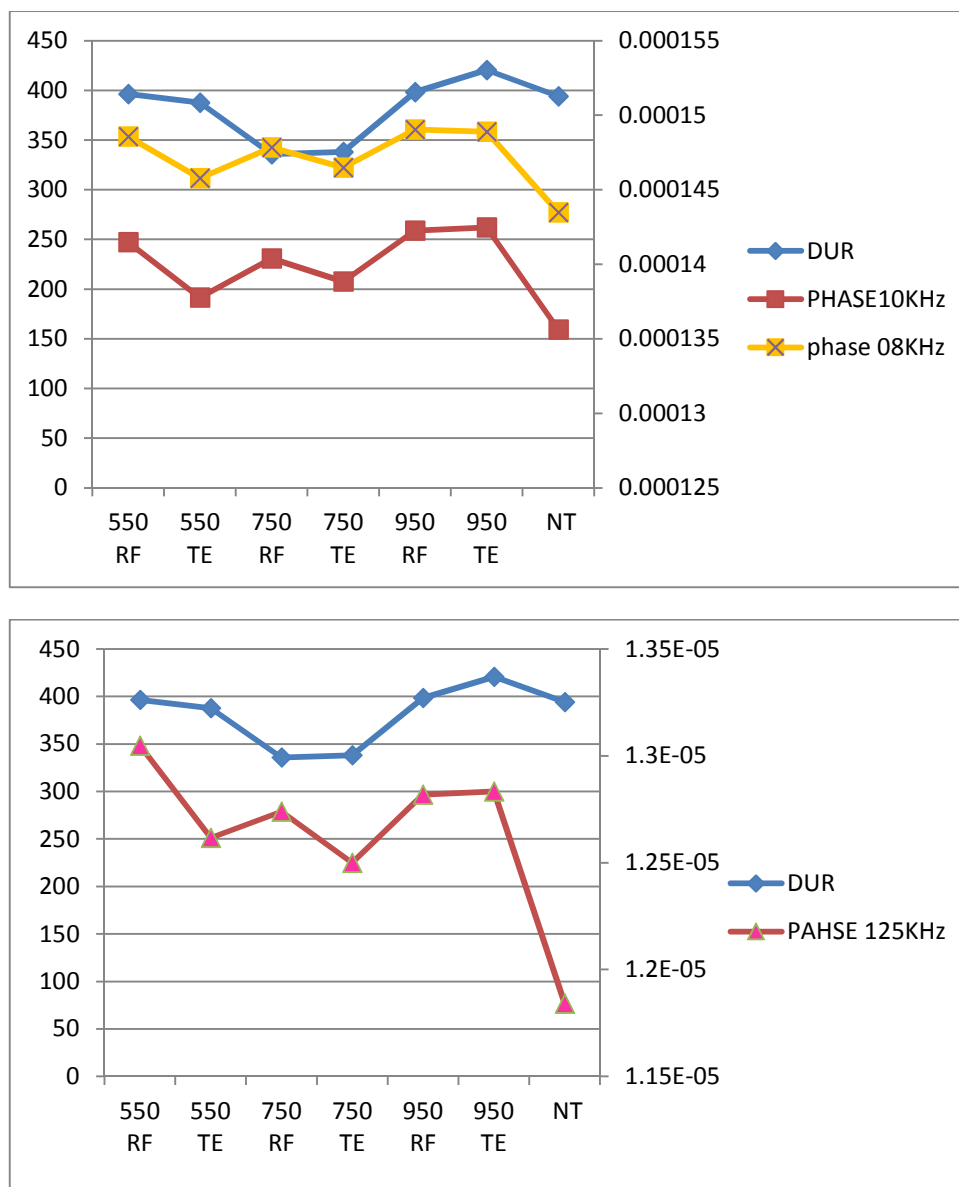


Figure5-12 : Variation de phase et la dureté pour des différentes fréquences

V-6-1. Discussion :

La Figure 5-12 montre la variation de la phase et la dureté correspond les fréquences 08 ,10 et 125, on constate que tous les échantillons traités partagent le même comportement Dureté-Phase sauf que dans l'échantillon traité à 750°C le comportement dureté-phase est de façon inverse, en remarque aussi que les basse fréquences donnent le comportement similaire à la dureté.

Depuis cette remarque on peut conclure :

-L'impédance est inversement proportionnelle à la phase et la dureté si le matériau contient que la phase α et β seulement..

- le comportement dureté-phase est inversement proportionnelle si le matériau contient une phase α' martensite.

-On peut connait le changement de la dureté de l'alliage TA6V que avec la phase et sans faire le test de dureté.

-On peut identifier les phases de l'alliage TA6V sans faire un test microscopique avec la connaissance du comportement de phase.

-Il faut utiliser des basses fréquences pour simulé le même comportement de dureté.

V-7. Variation de la dureté et le courant de Foucault pulsé :

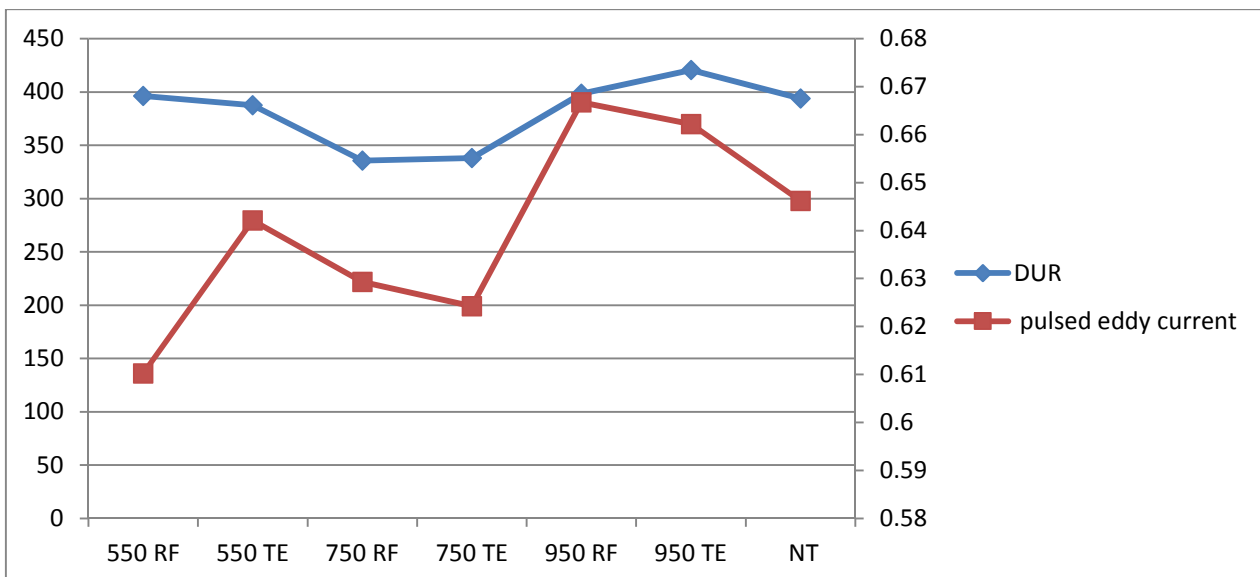


Figure5-13 Variation de la dureté et le courant de Foucault pulsé

V-7-1. Discussion :

D'après la Figure en remarque que le comportement dureté-courant de Foucault pulsé est le même dans les échantillons suivis par un refroidissement long (**550RF, 950 RF, 750 RF**), et l'inverse dans les échantillons suivis par une trempe (**550TE, 950 TE, 750 TE**).

- ❖ On peut conclure que les courants de Foucault pulsés peuvent déterminer le type du traitement.
- ❖ On peut déterminer le comportement de la dureté par les courants de Foucault pulsés.
- ❖

V-8. Variation de l'impédance et la micro dureté à 125 KHz :

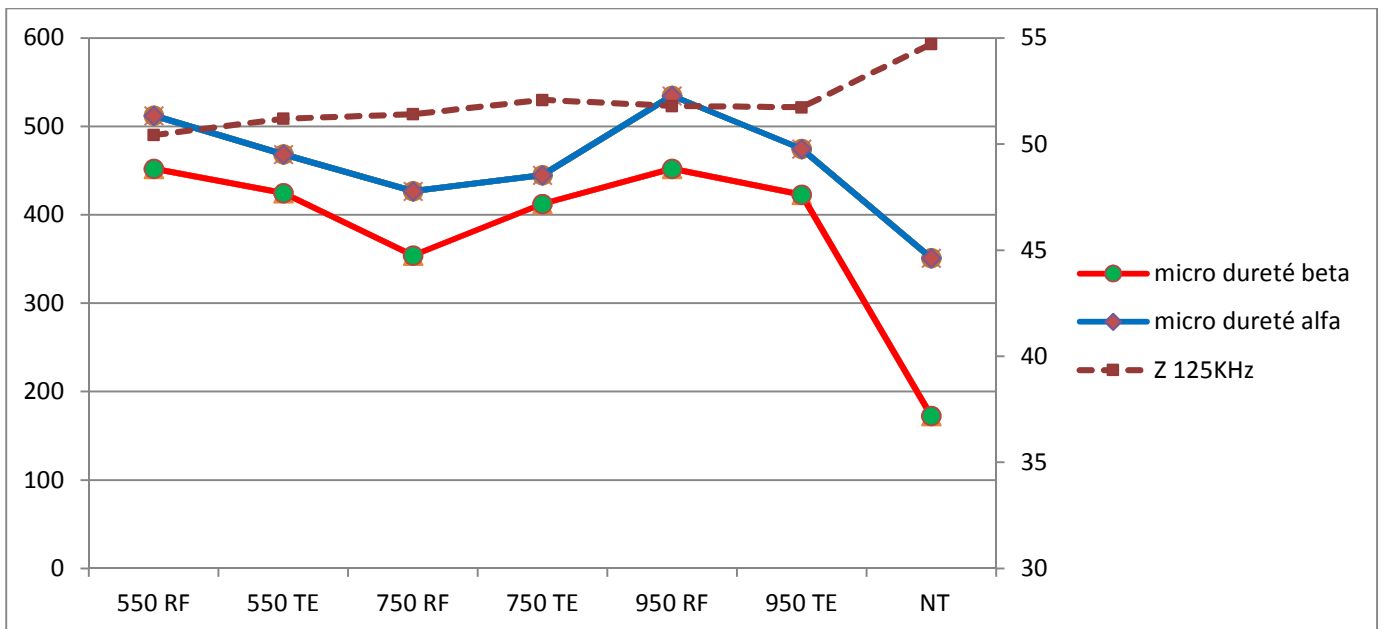


Figure5-14 : Variation de l'impédance et la micro dureté à 125 KHz

V-8-1 .Variation de l'impédance et la micro durté à 10 et 08 KHz (Basses fréquences) :

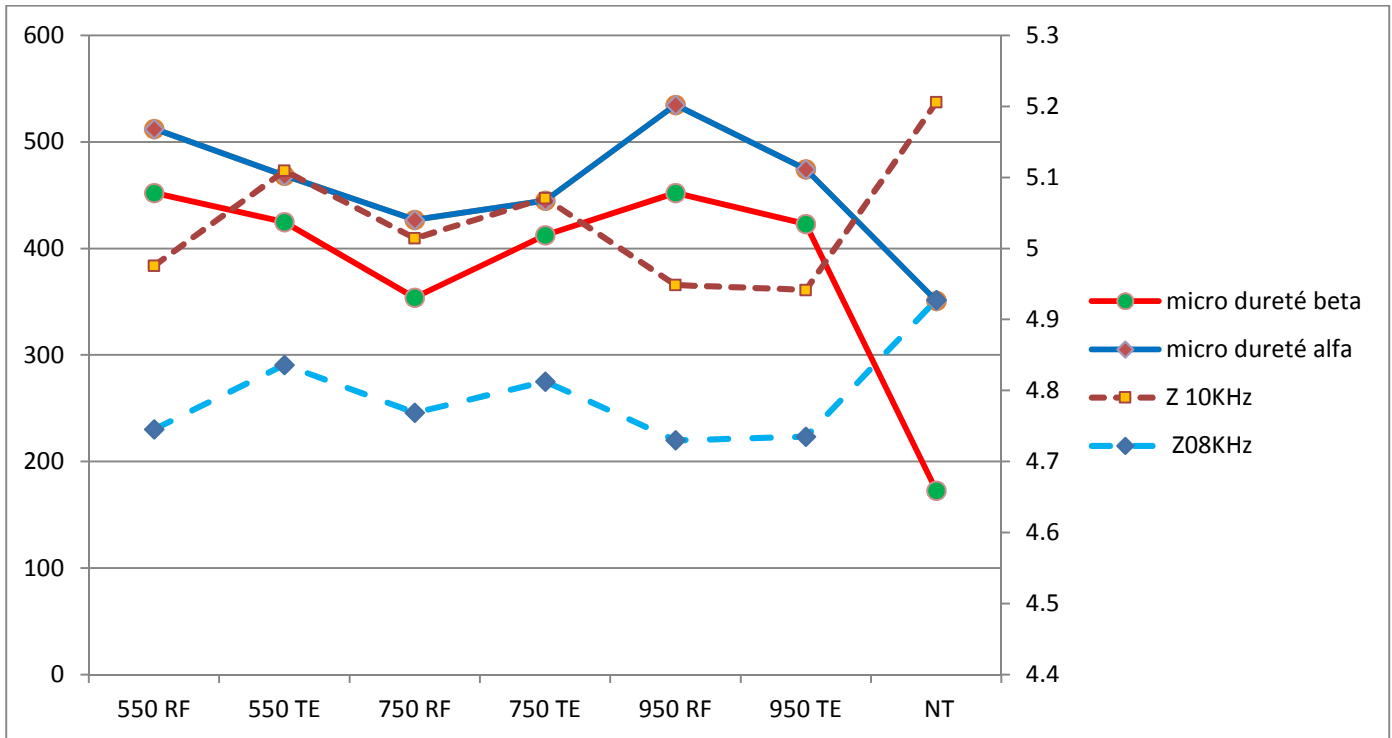


Figure5-15 : Variation de l'impédance et la micro durté à 10 et 08 KHz (Basses fréquences)

V-8- 2 Discussion:

Les Figures 5-14 et 5-15 montrent la variation de l'impédance et la micro durté correspond les fréquences 08, 10 et 125KHz, on constate que le comportement micro durté-impédance est de façon inverse dans tous les échantillons traités sauf que dans l'échantillon traité à 750°c le comportement micro durté-impédance est d'une façon similaire, en remarque aussi que les basse fréquences donnent un comportement similaire à la micro durté.

D'après ces remarques en peut conclure :

- le comportement micro durté-impédance est inversement proportionnelle si le matériau contient que la phase α et β seulement.

- le comportement micro durté-impédance est directement proportionnelle si le matériau contient une phase α' martensite.

-On peut connait le changement de la micro durté de l'alliage TA6V si on a les diagrammes l'impédance et sans faire le test de micro durté.

Chapitre V : Résultats et interprétations

-On peut identifier les phases de l'alliage TA6V sans faire un test microscopique avec la connaissance du diagramme d'impédance.

-Il faut utiliser des basses fréquences pour simulé le comportement de la micro dreté.

V-9-Variation de la phase et la micro dreté pour des basses fréquences :

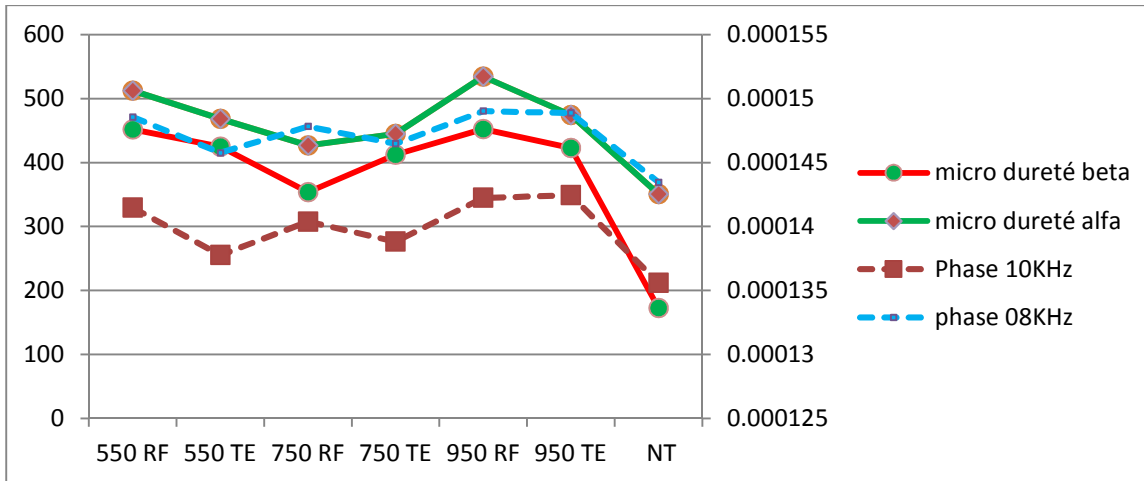


Figure5-16 : Variation de la phase et la micro dreté pour des basses fréquences

V-9-1.Variation de la phase et la micro dreté pour 125KHz :

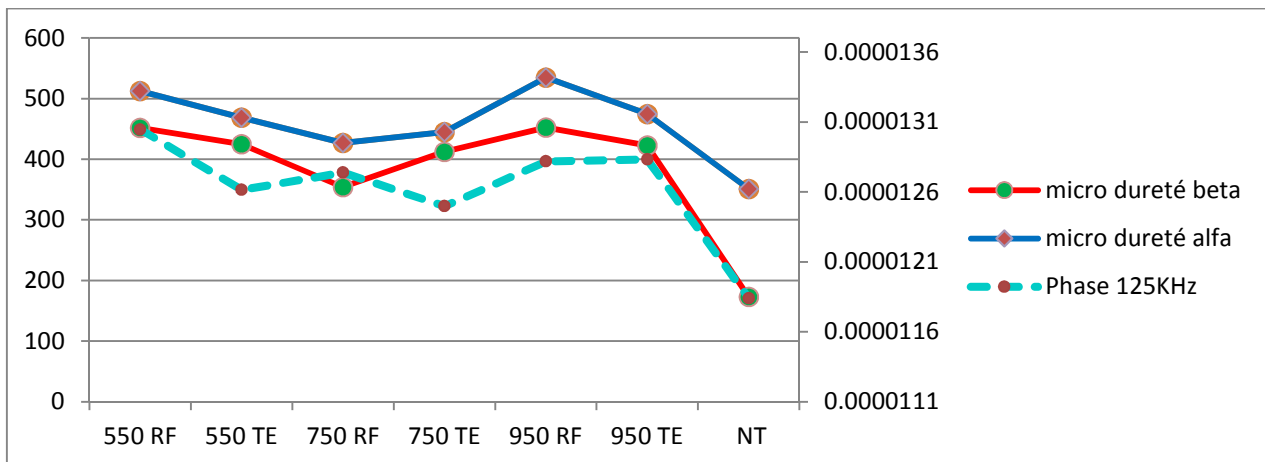


Figure5-17 : Variation de la phase et la micro dreté pour 125KHz

V-9- 2. Discussion:

Les Figures 5-16 et 5-17 montrent la variation de la phase et la micro dreté correspond les fréquences 08, 10 et 125KHz, on constate que le comportement micro dreté-phase est de façon similaire dans tous les échantillons traités sauf que dans l'échantillon traité à 750°C le comportement phase-micro dreté est inversement proportionnelle, en remarque aussi que les basse fréquences donnent un comportement similaire à la micro dreté.

D'après ces remarques en peut conclure :

Chapitre V : Résultats et interprétations

- le comportement micro dureté-phase est directement proportionnelle si le matériau contient que la phase α et β seulement.
- le comportement micro dureté-phase est inversement proportionnelle si le matériau contient une phase α' martensite.
- On peut connait le changement de la micro dureté de l'alliage TA6V si on a les diagrammes de phase et sans faire le test de micro dureté.
- On peut identifier les phases de l'alliage TA6V sans faire un test microscopique avec la connaissance du comportement de phase.
- Il faut utiliser des basses fréquences pour simulé le comportement de la micro dureté.

V-10. Variation de la micro dureté et le courant de Foucault pulsé :

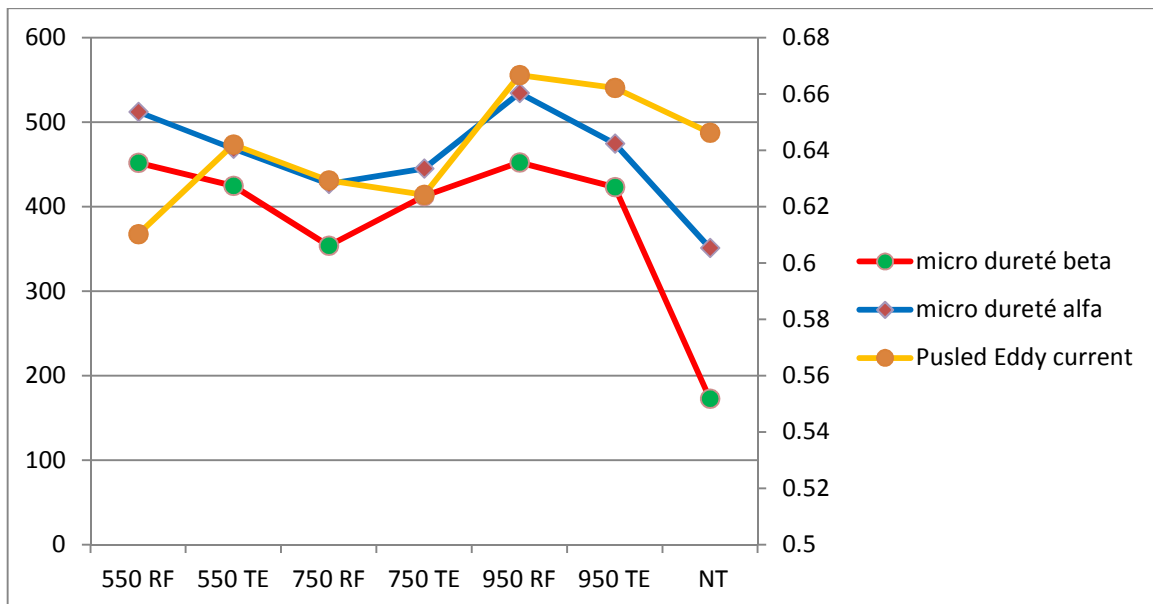


Figure 5-18 : Variation de la micro dureté et le courant de Foucault pulsé

V-10-1. Discussion :

D'après la Figure en remarque que le comportement micro dureté-courant de Foucault pulsé est le même dans les échantillons suivis par un refroidissement long (**550RF, 950 RF, 750 RF**), et l'inverse dans les échantillons suivis par une trempe (**550TE, 950 TE, 750 TE**).

On peut conclure que les courants de Foucault pulsés peuvent déterminer le type du traitement.

On peut déterminer mais pas à le comportement de la micro dureté par les courant de Foucault pulsés.

Conclusion :

Le control par courant de Foucault montrer une grande sensibilité pour la caractérisation des matériaux, la méthode de ce control peut déterminer l'état de la micro structure, le TA6V que nous avons examiné est un alliage biphasé α - β , le traitement thermique qui nous avons fait est influencé sur la microstructure par une diminution et une augmentation de pourcentage de chaque phase dans chaque traitement, une phase martensite α' apparaitre dans le traitement de 750°C, est cette phase influencé complètement sur le comportement des courbes dureté, micro dureté, impédance et phase.

On a déterminé la relation entre les paramètres du test de CF (impédance, phase) et les paramètres caractérisant l'alliage (dureté, micro dureté), dans ces points suivants on a mentionné les principaux résultats de cette étude:

- ❖ Le traitement thermique influencé sur la microstructure du matériau.
- ❖ La taille des grains augmente avec l'augmentation de la température du traitement thermique.
- ❖ La phase β du Titane TA6V est favorise un traitement suivi par un refroidissement au four.
- ❖ La phase α du Titane TA6V est favorise un traitement suivi par une trempe à eau.
- ❖ Le control de courant de Foucault parmi de connait le comportement de dureté et de micro dureté juste avec la connaissance du diagramme d'impédance ou le comportement de la phase.
- ❖ On peut déterminer les phases de l'alliage TA6V avec les courants de Foucault et sans faire une visualisation microscopique.
- ❖ Les basses fréquences est utile pour la caractérisation de l'alliage du titane TA6V.
- ❖ Le comportement de l'impédance est inversement proportionnel à la dureté, micro dureté et phase dans les phases α et β seulement.
- ❖ Le comportement de l'impédance est directement proportionnel à la dureté, micro dureté quand l'alliage TA6V contient la phase α' .
- ❖ On peut déterminer par les courants de Foucault pulsé la nature du traitement thermique.
- ❖ On peut déterminer par les courants de Foucault pulsé le comportement de la dureté et la micro dureté.

LISTE DES FIGURES :

- Figure 1.1 : Les défauts de surface
Figure 1.2: Les défauts interne
Figure 1.3 : Principe de détection d'un défaut
Figure 1.4 : Principe du contrôle non destructif
Figure 1.5: exemple de l'examen visuel
Figure 1.6 :Principe de ressuage
Figure 1.7: Principe de control d'étanchéité par test global d'hélium
Figure 1.8 : principe de la magnétoscopie
Figure 1.9 : Principe de la thermographie infrarouge
Figure 1.10: Principe de control par courant de Foucault
Figure I.11 : Principe de la tomographie X
Figure 1.12 : Principe de l'analyse vibratoire
Figure 1.13 :Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique
Figure 1.14–Principe des ultrasons
Figure 2.1 – Principe de contrôle par courant de Foucault
Figure 2.2: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur
Figure 2.3: La variation de la profondeur de peau conventionnelle δ en fonction de la fréquence pour différents matériaux
Figure 2.4: Capteur à double fonctions
Figure 2.5 : Capteur à fonction séparée
Figure 2.6 : Bobine encerclante
Figure 2.7: Palpeur
Figure 2.8 : Sonde
Figure 2.9: Bobines réelles
Figure 2-10: Appareillage utilisé pour les courants pulsés
Figure 2-11: Réponses pulsés pour différentes valeurs de l'entrefer
Figure 2-12: Points particuliers d'un signal pulsé
Figure 3.1 : Exemple de l'utilisation du titane en aéronautique
Figure 3.2 – Passage de la phase α à la phase β à 882°C
Figure 3.3: Classification des alliages de titane en fonction de la teneur en éléments alphas et bêtagènes.
Figure 3.4 - Influence des éléments d'alliage sur un alliage de titane
Figure 3.5: Evolution de la fraction volumique de phase β dans le TA6V en fonction de la température (a) et à l'issue d'une trempe depuis le domaine β , évolution de la fraction volumique en phase β dans le TA6V en fonction de la durée de maintien à la température T(b)
Figure 3-6 : Diagramme schématique pseudo-binaire du TA6V
Figure 3-7: Images optiques montrant les principaux types de microstructures du Ti-6Al-4V (a) structure bimodale, (b) structure lamellaire et (c) structure martensitique
Figure 4.1 : Machine de découpage (PRESI Mecatoms T300) et échantillons coupés
Figure 4.2 : Machine d'enrobage (Struers LaboPress-1) et l'échantillon enrobé
Figure 4.3 : le processus de polissage de L'échantillon
Figure 4.4 : l'échantillon prêt pour l'attaque chimique
Figure 4.5 : Appareillages de l'observation de la microstructure des matériaux
Figure 4.6 : four thermique utilisé (Nabertherm B180)

Figure 4.7 : Appareille de dureté

Figure 4.8 : Appareille de micro dureté (WILSON VH3300)

Figure 4.9: étape de fabrication de sonde

Figure 4.10 : sonde 100 spire, $D_{fil} = 0.132$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

Figure 4.11 : sonde 100 spire, $D_{fil} = 0.20\text{mm}$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

Figure 4.12 : sonde 200 spire, $D_{fil} = 0.132$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

Figure 4.13 : sonde 400 spire, $D_{fil} = 0.132$ et $D_{ferrite} = 0.4\text{mm}$

Figure 4.14 : application de CF classique par les différentes sondes réalisés

Figure 4.16 : Control d'un échantillon TA6V par courant de Foucault pulsé

Figure 5-1 : Changement de microstructures avec les six types du traitement thermique Figure 5.2 : Relation entre les valeurs de dureté en HV de l'alliage de titane TA6V traité

Figure 5.3 : L'application de la micro dureté sur les deux phases alfa et beta Figure

Figure 5.4: Relation entre les valeurs de la micro dureté en HV dans les phases α et β de l'alliage de titane TA6V traité

Figure 5.5 : Les diagrammes d'impédances de tous les échantillons

Figure 5.6 : Les diagrammes d'impédances obtenues pour la fréquence de 125 KHz

Figure 5-7 : diagramme d'impédance en fonction de base fréquence

Figure 5-8 : diagramme d'impédance en fonction de fréquences

Figure 5-9 : Diagramme d'impédance dans la fréquence de 125 KHz

Figure 5-10 : Variation d'impédance Z à la fréquence 125KHz et la dureté

Figure 5 -11 : Variation d'impédance Z et la dureté à 10 KHz

Figure 5-12 : Variation de phase et la dureté pour des différentes fréquences

Figure 5-13 Variation de la dureté et le courant de Foucault pulsé

Figure 5-14 : Variation de l'impédance et la micro dureté à 125 KHz

Figure 5-15 : Variation de l'impédance et la micro dureté à 10 et 08 KHz (Basses fréquences)

Figure 5-16 : Variation de la phase et la micro dureté pour des basses fréquences

Figure 5-17 : Variation de la phase et la micro dureté pour 125KHz

Figure 5-18 : Variation de la micro dureté et le courant de Foucault pulsé

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.1: Conductivité électrique et perméabilité magnétique théoriques de matériaux à contrôler dans l'industrie.

Tableau 3.1: Propriétés physiques du titane

Tableau 3.2 - Propriétés physique du titane

Tableau 3-3 : Propriétés physiques du titane et d'autres matériaux

Tableau 3.4: Propriétés mécaniques du titane

Tableau 3-5: Composition chimique du titane Ti-6Al-4V d'après la norme ASTM F2924

Tableau 3-6: Propriétés du titane Ti-6Al-4V

Tableau 4.1 : échantillons découpés

Tableau 4.2 : traitement thermique appliqué

Tableau 4.3 : caractéristique des sondes

Tableau 5-1 : Valeurs de dureté en fonction du traitement thermique

Tableau 5-2 : Les valeurs de micro dureté

Références

- [1] Jacques DUMONT-FILLON, « Contrôle non destructif (CND) », R1400 version1, 10 janv. 1996,p2-3 .
- [2] RABHI Mouldi, « CONTROLE NON DESTRUCTIF CND », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA, 2016, p, 3-5.
- [3] <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/contrôle/Chapitre-1/Section-1-1.html>.
- [4] El-kahina Sari, ‘ « caractérisation des contraintes résiduelles par les méthodes de contrôle non destructif des structures aéronautiques fissurées », thèse de doctorat en science, spécialité : aéronautique, Blida, juillet 2017, p24,
- [5] SAFER Omar Adib, « étude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif CND », UNIVERSITE DE M’SILA, 2013/2014, p6.p9
- [6] <http://www.alliance-concept.com/-Controle-d-etancheite->
- [7] https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110679/fr/magnetoscopie-mt
- [8] Cyril Ravat, « Design of eddy current microsensor arrays and signals inversion for non destructive testing applications », december 2008.
- [9] Aggab Mohamed El Amine, « Etude du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis», mémoire de master, 2015/2016, p4.
- [10] Jean luc Bodnar, « Le contrôle des matériaux par méthodes optiques infrarouges », novembre 2009, article publier sur la plateforme researchgate.
- [11] <https://elearning.univ-bejaia.dz/mod/resource/view.php?id=72107>
- [12] HAMEL Meziane, « Etude et réalisation d’un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », Mémoire de Magister, Soutenu le : 18/10/2012, p8.
- [13] Eric KUHN, « contrôle non destructif d'un matériau excité par une onde acoustique ou thermique. observation par thermographie », thèse de doctorat université de paris ouest, Soutenu le 6 décembre 2013,p14.p15
- [14] Cécile Capdessus, « Traitement du signal pour l ’analyse vibratoire », LESI, Séminaire du 17 novembre 2005 .
- [15] Mohamed KHEBBAB, « Contribution `a l’étude du CND par Courants de Foucault de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d’éléments finis », THÈSE DE DOCTORAT, Constantine, le 03 nov 2016, p 15.

[16] BOUALI Ferroudja, « Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri. Tizi-ouzou, Soutenu le : 27.01.2010, P11, P16, P19

[17] Chiara Zorni, « contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction », thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en sciences de l'université paris-sud 11, soutenue le 28 février 2012

[18] Latifa Oukhellou. « Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault ». PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 1997.

[19] ZEMOURI Nassima, « étude et réalisation d'un système multi capteurs destiné au diagnostic des matériaux conducteurs ». mémoire de fin d'étude de magister, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 21/07 /2016.

[40] P. Weber, « Application des courants de Foucault pulsés au contrôle non destructif Approches expérimentales et théoriques ». Thèse de Doctorat, INSA. Lyon, 1990.

[20] Renaud Julien, « Comportement thermomécanique et évolution microstructurale d'un alliage Ti-6Al-4V forgé $\alpha + \beta$, durant la trempe : expérimentations, analyses et modélisation », 11 Jul 2017.

[21] <https://www.siaabrasives.com/fr/fr/abrasifs-applications/secteurs-industriels/turbines/turbines-d-avions/>

[22] Guénin G. « Alliages à mémoire de forme. Technique e l ingénieur, traité matériaux métalliques », M530:1-15.

[23] US Army, « Handbook titanium », 1974.

[24] S. Banerjee, P. Mukhopadhyay, « Phase Transformations Examples from Titanium and Zirconium Alloys », 2007.

[25] Yannick Robert, « Simulation numérique du soudage du ta6v par laser YAG impulsionnel: caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécanique associées à ce procédé », thèse de doctorat Présentée et soutenue dans l'école des Mines de Paris le 17 septembre 2007

[26] http://www.metonorm.com/content/fr/Dossiers/85/LE_TITANE/ .

[27] Ani Zhecheva, Wei Sha, Savko Malinov, Adrian Long, « Enhancing the microstructure and properties of titanium alloy through nitriding and other surface engineering methods », Article scientifique publié dans sciencedirect.com le 6 November 2004.

[28] Benjamin CHARTREL , « Analyse et optimisation des procédés de formage de pièces en alliage de Titane », thèse de doctorat Soutenue le 2 mars 2016, p22.

[29] Y. Combres « Propriétés du titane et de ses alliages », Techniques de l'Ingénieur, volM 557, 2012.

[30] P. Quinquis, C Batifouye-Chelhay, J. Colat-Parros. « Le Titane un matériau de choix? Journal de biomatériaux dentaires », 1993 .

[31] docplayer.pdf ,cour sur internet ,
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjK4N6S-b7kAhVjAWMBHZmtATEQFjADegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Fdocplayer.fr%2F13882846-Le-titane-et-ses-alliages.html&usg=AOvVaw1_DXZ-5ilkHGLvmzSPS6lY

[32] Christophe Buirette, « Etude des mécanismes de propagation de fissure dans l'alliage de titane TA6V soudé par faisceau d'électrons » thèse de doctorat Présentée et soutenue dans l'université de Toulouse Le 7 décembre 2011.

[33] <http://asm.matweb.com/search/GetReference.asp?bassnum=MTP641>

[34] <https://www.keysight.com/en/pd-1000000874:epsg:pro-pn-4284A/precision-lcr-meter-20-hz-to-1-mhz?&cc=DZ&lc=eng#>

نبذة مختصرة:

تستخدم سبائك التيتانيوم على نطاق واسع في صناعة الطيران لخصائصها الميكانيكية الجيدة، والهدف من هذا العمل هو تقييم التعديلات الهيكلية الناجمة عن العلاجات الحرارية على سبائك التيتانيوم من النوع TA6V بواسطة التيارات الدوارة الكلاسيكية والنبضية.

Abstract :

Titanium alloys are widely used in aeronautics for their good mechanical properties, the aim of this work is to evaluate the structural modifications caused by thermal treatments on Titanium TA6V by the classical and Pulsed eddy currents.

Résumé :

Les alliages de Titanes sont largement utilisés en aéronautique pour leurs bonnes propriétés mécaniques, le but de ce travail est d'évaluer les modifications structurales causés par des traitements thermiques sur du Titane TA6V par les courants de Foucault classique et Pulsé.