

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE.



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA.

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département : Aéronautique.



Mémoire pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique.
Filière : construction et maintenance en aéronautique.

Spécialités : Structure.

THEME

application des CND dans l'évolution microstructurale de
l'alliage de titane soumis à des traitements thermiques.

PRESENTES PAR :

M^r : LAIB Moussa.

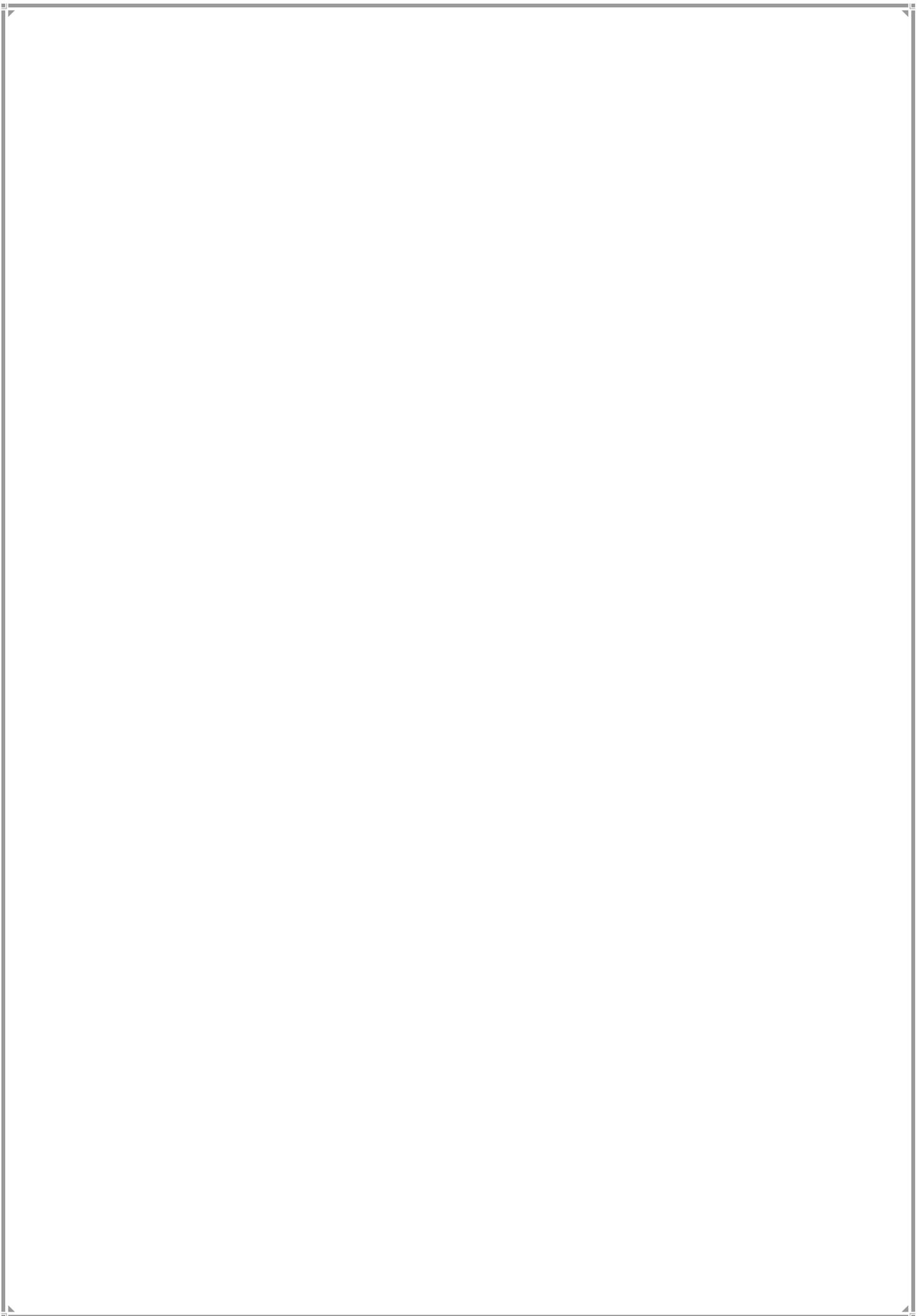
M^r : ZAMECHA Mohamed Ali.

ENCADRE PAR :

D^r : ZERGOUG Mourad

Mlle : MAKHLOUF Sarah

ANNEE UNIVERSITAIRE 2010 / 2011



RESUME

Notre travail à pour objectif d'étudier l'évolution microstructurale dans l'alliage de titane TA6V après un traitement thermique, par les méthodes du contrôle non destructif, et précisément les courants de Foucault.

SUMMARY

Our work with for objective studied the microstructural evolution in titanium TA6V alloy after a heat treatment, by the methods of the non destructive testing, and precisely the eddy currents.

2024 الألمنيوم
الداخلية
هو هذا الهدف من هذا
بتيار الائتلافية،
المرجعية مرضية عليها
" les courants de Foucault"
بتطبيق .

REMERCIEMENT

Nous prions et remercions ALLAH le tout puissant de nous

avoir donné la foi et le courage a fin de réaliser ce modeste ouvrage

sans que nous oublions nos très chères parents pour leurs aide très précieuse.

Nous tenons à remercier notre promoteur en premier lieu, le

Dr. ZERGOUG MOURADE, qui nous a aidés

*profondément par son suivi et ses conseils durant
notre projet,
pour toute sa confiance qu'il nous a témoigné en
nous proposant ce
sujet. Ses conseils éclairés et sa large expérience
scientifique ont
permis l'aboutissement de ce travail.
Ainsi que tous nos professeurs d'avoir efficacement
achevé ce
que de bon nos parents ont commencé.
Avec notre profonde gratitude à notre fidèle amie
et frère
Mr. OTMANI BELKACEM, magistère à l'Institut
Aéronautique
de Blida, pour tout son soutien et ses conseils
pour la réalisation
de ce projet.
Sans oublier nos remerciements à notre honorable
jury devant
lesquels nous venons d'exposer notre projet.
En fin, que tous ceux ou celles qui ont contribué de
près ou de
loin à la réalisation de ce long travail ; trouvant ici
l'expression de
nos remerciements les plus sincères.*

ACP Analyse en composantes principales
CF Courants de Foucault
CI Circuit imprimé
CND Contrôle non destructif
COR Caractéristique opérationnelle de résultat
DC Détection correcte
DSP Densité spectrale de puissance
ED Erreur de détection
EMCO Estimateur des moindres carrés ordinaires
FA Fausse alarme
NC Non détection correcte
PDC Probabilité de détection correcte
PFA Probabilité de fausse alarme
RSB Rapport signal sur bruit
TF Transformée de Fourier
TFD Transformée de Fourier discrète
AR Critère « aire du rectangle inscrit »
ASC Critère « aire sous la courbe »
DA Critère « distance au point antagoniste »
DO Critère « distance au point optimal »
MA Critère « moyenne des probabilités de DC et de NC »
MO Critère « moyenne des probabilités d'ED et de FA »

M L'aimantation magnétique
H Le champ d'excitation magnétique
 La susceptibilité magnétique
B L'induction magnétique
 μ_0 La perméabilité à vide
 μ_r La perméabilité relative
N Nombre d'atome
 Coefficient de déformation
 ΔL Variation de la longueur dans la direction de magnétisation
 E_{el} L'énergie élastique
 $\cos \theta_1$ Cosinus directeur de l'aimantation
 $\cos \theta_2$ Cosinus directeur de l'aimantation
 $\cos \theta_3$ Cosinus directeur de l'aimantation
 H_{ef} Le champ effectif
 H_a Champ magnétique appliqué
 H_d Champ démagnétisant
 a Paramètre de la maille
 c Paramètre de la maille
I L'intensité des courants de Foucault
 Le profondeur de pénétration standard
 j_0 Densité du courant de surface
 j_x Densité du courant a profondeur x
 La pulsation
 Le Déphasage des courants de Foucault

Z L'impédance
 R La partie active de l'impédance
 L La partie réactive de l'impédance
 B_r L'induction rémanente
 H_s Le champ coercitif
 B_s L'induction à coude de saturation
 La résistivité
 H_m Fini valeur du champ correspondant au maximum du pic;
 A_m Amplitude du pic
 S_{en} Surface sous la courbe
 L_m Largeur à mi-hauteur
 _s Coefficient de magnétostriktion à saturation
 H Le champ fictif
 BMM Le bruit magnétomécanique
 _x La longueur d'onde des rayons X
 d_{hkl} La distance interréticulaire d'une famille de plan (Mcl)
 L'angle d'incidence
 d₀ La distance interréticulaire
₂ La variation de position du pic
_{2 0} La variation de position du pic de référence
 _x La déformation de la maille
 A_x L'allongement rémanent
 F La charge unitaire appliqué
 S₀ La section initiale
 L₀ La longueur initiale entre les repères
 L_u La longueur entre repères après rupture de l'éprouvette
 A L'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture
 C_s Le coefficient de striction
 Z_u L'allongement de striction
 C_{su} Le coefficient de striction a la rupture
 R_m La résistance a la traction
 R_e La limite d'élasticité d'écoulement
 R_{eH} La limite supérieure d'écoulement
 R_{eL} La limite inférieure d'écoulement
 R_r La limite d'allongement rémanent
 R_P La limite conventionnelle d'élasticité
 R_{P0,2} La limite conventionnelle d'élasticité correspond un allongement non proportionnel égal à 0,2%
 A₀₂ L'allongement rationnel
 La contrainte mécanique
 I La contrainte résiduelle d'ordre I
 II La contrainte résiduelle d'ordre II
 III La contrainte résiduelle d'ordre III
 BN Le bruit de Barkhausen
 L_c La longueur calibrée
 L_t La longueur totale

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire d'électronique et d'électrotechnique du Centre de Recherches Scientifiques et Techniques en Soudage et Contrôle C.S.C.

Dans le cadre d'un projet de fin d'études, pour obtenir le diplôme *Ingénieur d'état en aéronautique * à l'université de Saad Dahleb Blida / département d'aéronautique Blida

Avant tout, nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. Et d'une façon toute particulière, on remercie nos chers parents pour leur patience et le bonheur qui nous ont apporté.

On tient à remercier notre promoteur le docteur, Mr : *ZERGOUG MOURAD* et notre Co promotrice Mlle : *MEKHLOUF Sarah* pour nous avoir fait travailler sur un projet aussi intéressant et riche. Nous leurs sommes reconnaissants tout particulièrement pour la confiance qu'ils nous ont témoignées et la liberté qui nous a laissé.

On tient à remercier tout le personnel du CSC pour leurs aides et leurs conseils, les employés de l'atelier NDT et STRUCTURE de l'établissement air Algérie.

Enfin, on souhaite exprimer toute notre gratitude à l'ensemble des personnes, qui bien en marge de ce travail, ont contribué largement à son aboutissement. Que ce soit depuis toujours, depuis plusieurs années ou quelques mois seulement, nombreux sont celles et ceux qui ont participé à notre épanouissement. On les remercie sincèrement.

Sans oublier nos remerciements à notre honorable jury devant lesquels nous venons d'exposer notre projet.



Sans votre savoir faire, votre disponibilité sans égale, votre amour, votre engagement à mes cotés sans faille, votre sacrifice tout au long de votre vie, je n'aurais pu avancer dans ce travail. Mes très chers parents : ma mère pour ton fort caractère, ta bonté, mon père pour ton courage, ta gentillesse j'ai pu m'inspirer pour la réalisation de ce travail.

A mes très chers frères.

A ma très chère petite sœur Malika.

A toute ma famille.

A mon binôme Ali et sa famille.

A tous mes amis du D.A.B et mes camarades BII.

A tous ce qu'ils ont aimé me voir ce jour là.

Moussa

Ali



Sommaire

REMERCIEMENT

DEDICACE

RESUME

ABREVIATION ET NOMENCLATURE

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : *Propriétés de titane et ses alliages*

I. introduction:.....	1
I.1 Rappels sur la métallurgie de titane et ses alliages :.....	1
I.1-1 Caractéristique mécanique du Titane :.....	3
I.2 Les alliages de titane:.....	3
I. 2-1 Effet des éléments d’addition :	3
I.2-1-1 Les éléments d’addition :	4
I.2-2 Les principales familles d’alliages :	5
I.2-2-1 propriétés des familles d’alliage de titane :.....	7
I. 3 Applications aéronautique de titane et ses alliages :.....	8

CHAPITRE II : *Généralités sur le CND*

II.introduction.....	9
II.1 Définition de CND :	10
II.1-1Techniques et symboles de contrôle non destructif :	10
II.1-2 Les objectifs du CND :.....	10
II.2 Les différentes techniques de CND:.....	11
II.2-1 Méthodes visuelles : Examen visuel, endoscopique ou télévisuel.....	12
II. 2-2 Contrôle par ressuage	13
II. 2-2-1 Les étapes à suivre	14

II. 2-2-2 Précautions	14
II. 2-3 Contrôle par radiographie.....	15
II. 2-4 Contrôle par magnétoscopie.....	18
II. 2-5 Emission acoustique.....	20
II. 2-6 La thermographie Infrarouge	23
II. 2-6-1 Définition	23
II.2-6-2 Principe	23
II.2-7 courants de Foucault.....	25
II.2-7-1 Principe	25
II.2-7-2 Différents modes d'excitations	26
II.2-7-3 Effet de peau	27
II.2-7-4 Différents types de capteurs.....	29
II.2-7-5 Diagramme d'impédance	31
II.2-7-6 Contrôle des surfaces planes :	33

CHAPITRE III: *Approche physique et expérimentale*

III. 1 l'approche physique des CF dans l'analyse microstructurale	35
III. 2 L'approche expérimentale.....	36
III. 2-1 Observation métallographique.....	36
III. 2-1-1 Micrographie	36
III. 2-2 Essai de dureté et de microdureté (Vickers)	37
III. 2-3 Réalisation des sondes	38
III. 2-4 Réalisations des échantillons	39
III. 2-4-1 Le matériau étudié	39
III. 2-4-2 Préparation des échantillons	40

CHAPITRE IV : *Résultats et interprétations*

IV. 1 l'alliage de titane TA6V	43
IV. 1-1 Les courants de Foucault	43
IV. 1-2 les diagrammes d'impédances pour les différents échantillons.....	43
IV. 2-1 Observation micrographique	48
IV. 3-1 Résultats de la microdureté.....	55

CONCLUSION GENERALE ET PRESPECTIVES

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES

ABBREVIATIONS ET NOMENCLATURE

ABBREVIATION

Abréviations	description
Ti	Titane
T	Température de transformation allotropique
CC	cubique centré
HC	Hexagonale compacte
	Phase alpha
	Phase beta
TT	Traitement thermique
TA6V	Alliage de titane 6% AL, 4% V
CND	Contrôle non destructif
END	Evaluation non destructive
CF	Courants de Foucault
DDP	Différence de potentiel
<i>f</i>	Fréquence d'excitation

NOMENCLATURE

Nom	Description
N	Numéro atomique
	Longueurs d'onde
I_{exc}	Courant d'excitation
\vec{B}	Induction magnétique
\vec{E}	Champ magnétique
\vec{D}	Induction électrique
\vec{H}	Champ électrique
J	Densité de courant
J(z)	Densité de courant a profondeur z
	conductivité électrique
	permittivité électrique
μ	perméabilité magnétique
δ	Profondeur du courant induit (épaisseur de peau)
L	Inductance en charge
L0	Inductance à vide
R	Resistance en charge
R0	Resistance à vide
	La pulsation
Z	L'impédance
F	La charge appliquée
D	Diamètre d'empreinte
H_v	Dureté Vickers
Rm	la résistance minimale à la traction
Rp0,2	la limite d'élasticité

LISTE DES ILLUSTRATIONS,

FIGURES ET TABLEAUX

Figure :

FIGURE	description
figure 1-1	: cristallographie du titane pur en fonction de la température
figure 1-2	: représentation schématique de la transformation allotropique
figure 1-3-	exemples de morphologies de TA6V
figure 1-4-	exemples d'emploi
figure 2-2	: orientation de l'angle de vue pour un contrôle visuel classique
figure 2-3	: endoscope à fibre optique
figure2-4	principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant
figure 2-5	: longueurs d'ondes
figure 2-6	principes de la radiographie
figure 2-7	principes de la magnétoscopie
figure 2-8	équipement d'analyse
figure 2-9	principes de contrôle par émission acoustique
figure 2-10	utilisation dans le domaine de construction
figure 2-11	principes du CND par courant de Foucault
figure 2-12	principes de la détection par courants de Foucault
figure.2-13	bobine à double fonction
figure.2-14	capteur à fonction séparé
figure.2-15	capteur différentiel à deux éléments
figure2-16	diagramme d'impédance normalisée
figure3-1	l'appareil de micrographie
figure3-2	dureté Vickers
figure3-3	l'appareil de test de microdureté

figure3-4 sonde utilisée en CF et sa caractérisation

figure3-5 diagramme de phase

figure3-6 matériau de base microscope optique (x 500) pseudo binaire du TA6V

figure3-7 échenillant non traitée

figure3-8 échenillant à l'état miroir

figure3-9 le four utilisé

figure3-10 échenillant traité a $750c^0$ pour 4h de maintient

figure4-1-1 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V non traité

figure4-1-2 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $550(c^0)$ 2h

figure4-1-3 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $550(c^0)$ 4h

figure4-1-4 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $750(c^0)$ 2h

figure4-1-5 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $750(c^0)$ 4h

figure4-1-6 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $950(c^0)$ 2h

figure4-1-7 diagramme d'impédance pour l'échantillon TA6V à $950(c^0)$ 4h

figure4-1-9 l'impédance $z1(\Omega)=f(t(c^0))$

figure4-1-8 l'impédance $z2(\Omega)=f(t(c^0))$

figure 4-1-10 l'impédance $z(\Omega)=f(t(c^0))$ comparaison

figure4-1-11 l'impédance $z1(\Omega)=f(t(c^0))$ pour $f=4,5khz$

figure4-1-12 l'impédance $z1(\Omega)=f(t(c^0))$ pour $f=5khz$

figure 4-1-13 l'impédance $z(\Omega)=f(t(c^0))$ comparaison

figure4-2-1 micrographie deTA6V non traité *500

figure4-2-2 micrographie deTA6V non traité *1000

figure4-2-3 micrographie deTA6V à $550c^0$ (2h) *500

figure4-2-4 micrographie deTA6V à $550c^0$ (2h) *1000

figure4-2-5 micrographie deTA6V à $550c^0$ (4h) *500

figure4-2-6 micrographie deTA6V à $550c^0$ (4h) *1000

figure4-2-7 micrographie deTA6V à $750c^0$ (2h) *500

figure4-2-8 micrographie deTA6V à $750c^0$ (2h) *1000

figure4-2-9 micrographie deTA6V à $750c^0$ (4h) *500

figure4-2-10 micrographie deTA6V à $750c^0$ (4h) *1000

figure4-2-11 micrographie deTA6V à 950c⁰ (2h) *500

figure4-2-12micrographie deTA6V à 950c⁰ (2h) *1000

figure4-2-13micrographie deTA6V à 950c⁰ (4h) *500

figure4-2-14micrographie deTA6V à 950c⁰ (4h) *1000

figure4-3-1effet de température sur la dimension d’empreinte pour les traitements à 2heurs

figure4-3-2effet de température sur la dimension d’empreinte pour les traitements à 4heurs

figure4-3-3comparaison de dimension d’empreinte pour les échantillons traités à 2h et à 4h

figure4-3-4effet de température sur la durezza pour les traitements à 2heurs

figure4-3-5effet de température sur la durezza pour les traitements à 4heurs

figure4-3-6comparaison de la durezza pour les échantillons traités à 2h et à 4h

Tableaux :

TABLEAU	description
---------	-------------

tableau1-1-	marché de titane
-------------	------------------

tableau1-2-	Caractéristique mécanique de Titane
-------------	-------------------------------------

Tableau 1-3-	Classification des éléments d’addition des alliages de titane
--------------	---

Tableau1-4-	propriétés des familles d’alliage de titane
-------------	---

Tableau2-1 :	les différents symboles des techniques de contrôle non destructif
--------------	---

Tableau4-3-1	resultats de la microdurezza
--------------	------------------------------

Introduction générale

La maîtrise du comportement des structures est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique, automobile, marin, transport pétrolier...etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement, permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adaptées à son utilisation.

Ce travail qui nous a été proposé, s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'évolution microstructurale de l'alliage de titane TA6V soumis à des traitements thermiques, on utilisant des méthodes non destructives.

Les alliages de titane et particulièrement l'alliage TA6V ont récemment fait l'objet d'un nombre important d'études. D'excellentes propriétés mécaniques combinées à une densité relativement faible en font une classe d'alliages promise à un grand avenir dans une large gamme d'applications (aéronautique, implants chirurgicaux, automobile, etc..).

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes particulièrement intéressés au comportement mécanique et micro structural de TA6V résultant d'un traitement thermique imposé.

Pour mieux comprendre l'influence du traitement thermique sur notre alliage, nous avons soumis des échantillons de TA6V à un traitement thermique de type recuit pour des différentes températures et différents temps de maintien.

Analyser par la suite les changements de la microstructure et les propriétés mécaniques finales obtenues par les techniques de contrôle non destructif (CND).

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) ont vite pris le dessus, car elles permettent de tester une structure sans provoquer de modifications irréversibles. Elles représentent donc un enjeu industriel important du point de vue économique puisque les pièces testées peuvent être de nouveau utilisées lorsqu'aucun défaut n'a été révélé.

Présentation des différents chapitres:

- Le premier chapitre de ce document s'intéresse à un rappel métallurgique sur le titane et ses alliages, leurs caractéristiques mécaniques et les principales familles

d'alliages ses divers morphologies, finalisant par ses applications dans le domaine de l'industrie surtout en aéronautique.

- Dans le deuxième chapitre on met la lumière sur le contrôle non destructif (CND) ses objectifs et son importance pour l'industrie, citant aussi ses différentes techniques leurs principes et applications, on s'intéressant plus en plus sur la technique des courants de Foucault en donnant un élément théorique sur cette technique.
- Le troisième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées commençant par une approche physique des CF dans l'analyse microstructurale.

Parmi ses techniques qui sont introduites pour notre caractérisation (inspection par les CF, micrographie, microdureté Vickers) pour étudier les évolutions microstructurales de notre alliage au cours des traitements thermiques, bien sure tout cela après avoir une bonne préparation des échantillons (usinage, polissage, attaque chimique, traitement thermique), aussi comprit une réalisation et une caractérisation des sondes pour le contrôle par les CF.

- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats des différentes investigations effectuées.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale. Le manuscrit prend fin en évoquant quelques perspectives et éléments de continuation dans ce domaine de recherche.

Introduction

Les exigences sans cesse croissantes sur la qualité et la fiabilité des installations et des produits industriels notamment dans la métallurgie, l'aéronautique et le nucléaire ont conduit à l'apparition et au développement des méthodes dites : Evaluation non destructive (END) et contrôle non destructif (CND).

Tout comme leur nom l'indique ces méthodes ont pour buts d'évaluer l'état interne d'une structure, d'un matériau ou d'un quelconque assemblage sans porter atteinte à son intégrité. Ces contrôles peuvent intervenir aux différents stades de la vie du produit, c'est à dire au niveau de la fabrication (fonderie, métallurgie, ...) ou au cours de l'utilisation (pour déceler d'éventuels fatigue, corrosion...).

Le principe de ces méthodes est d'attaquer la pièce à contrôler avec un signal et de recueillir sa réponse qui va nous renseigner sur son état (paramètre physique, anomalie géométrique, hétérogénéité, ...).

Quelle que soit la méthode adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique suivant :

Les techniques utilisées dans le CND sont très variées, le choix d'une entre elle peut être conditionné par un certain nombre de paramètres dont les principaux sont :

- la nature du matériau à contrôler (propriétés physiques)
- l'information recherchée (détection, mesure, dimensionnement du défaut, ...).
- l'environnement du contrôle (nature des perturbations externes, ...).
- le type de contrôle à effectuer (pièce mobile, possibilité de contact ou non, ...).
- Contraintes économiques.

Dans un premiers temps on a utilisé les méthodes statistiques ou on a prélevé des échantillons sur les quels on a procédé à des essais destructifs pour avoir une idée sur la qualité des produits mais ces méthodes ne rendaient pas compte de la qualité réelle de tous les produits (sachant que le prélèvement est pratiqué sur un nombre d'échantillons relativement faible), mais le développement de l'électronique et les techniques de traitement de signal ont permis entre autre l'émergence des méthodes du « Contrôle Non Destructif » avec l'avantage de contrôler la totalité des produits.

2-1 Définition de CND :

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés, il est concerné exclusivement la "santé de la matière" et consiste à rechercher les défauts internes des structures, matériaux, pièces et assemblages.

Les mesures dimensionnelles et de formes n'entrent donc pas dans le champ d'application du CND, sauf lorsqu'elles constituent un moyen détourné de mettre en évidence un défaut interne.

Les techniques de CND sont utilisées en contrôle qualité pour s'assurer de la qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, la présence de corps étrangers, etc. [5]

2-1-1 Techniques et symboles de contrôle non destructif :

Méthode END	symbole
Emission acoustique	AT
Courants de Foucault	ET
Etanchéité	LT
Magnétoscopie	MT
Ressuage	PT
Radiographie	RT
Ultrasons	UT
Examen visuel	VT
Interférométrie de	ST
Thermographie	IT

Tableau1 : les différents symboles des techniques de contrôle non destructif

2-1-2 Les objectifs du CND :

Tout fabricant est amené à vérifier que ses produits satisfont à des normes de qualité, de tenue dans le temps et de sécurité. Le contrôle non destructif (CND) aide à améliorer la qualité par la

détection des défauts et constitue un élément majeur de soutien à l'exportation et à la compétitivité. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

✘ **la rapidité d'exécution**

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

✘ **le coût**

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

✘ **la reproductibilité**

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

✘ **la fiabilité**

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

✘ **la sensibilité**

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

✘ **la résolution**

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

2-2 Les différentes techniques de CND:

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

2-2-1 Méthodes visuelles : Examen visuel, endoscopique ou télévisuel (Visual examinations) :

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la moins chère à mettre en œuvre.

Le contrôle visuel nécessite néanmoins une compétence certaine pour reconnaître la nature des défauts observés.

Il est généralement toujours réalisé en premier et peut servir d'indicateur pour les autres méthodes de contrôle prévues. Il permet en effet de déceler les défauts débouchant (fissure, tapure, crique, arrachement...) ainsi que les désordres et dégradations causés par les conditions de service ou d'environnement (corrosion, bleuissement, fissure de fatigue...).

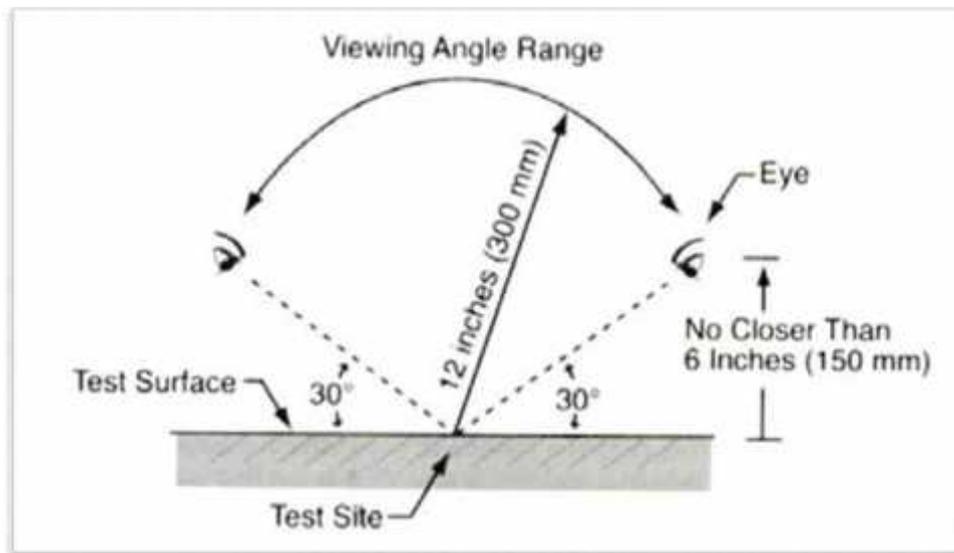


Figure 1-1 : Orientation de l'angle de vue pour un contrôle visuel classique.

Lors d'un contrôle visuel, une attention particulière devra être apportée à l'intensité de l'éclairage, ainsi qu'à son orientation (Figure 1-1). Distinction est faite entre le contrôle visuel direct (éventuellement aidé d'un miroir ou d'une lentille) et le contrôle visuel indirect (avec dispositifs d'aide du type endoscope, fibres optiques couplés à des caméras ou tout autre instrument approprié).

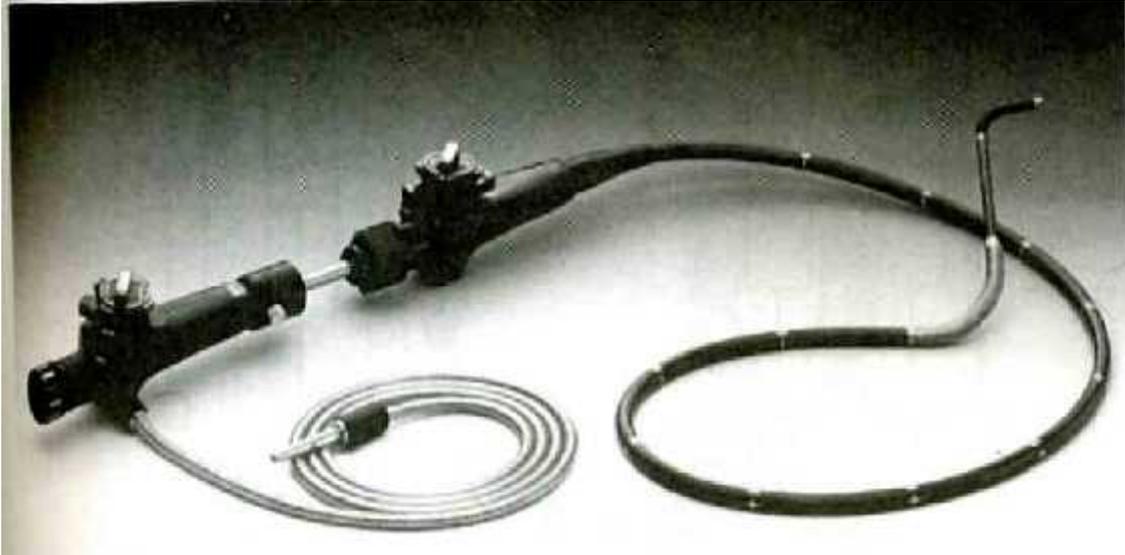


Figure 1-2 : Endoscope à fibre optique

Un des dispositifs les plus utilisés est l'endoscope pour les zones inaccessibles : comme en médecine humaine, c'est un système rigide ou souple qui permet d'inspecter des cavités internes (figure 1-2). Il comporte des dispositifs d'éclairage de la cavité, de génération de l'image, de transport de cette image (électronique, lentilles ou fibres optiques) et enfin de restitution de l'image afin de la rendre observable.

Applications :

- ♣ Vérification de l'état extérieur du spécimen d'essai.
- ♣ Vérification de l'alignement des surfaces de contact.
- ♣ Vérification de la forme du composant.
- ♣ Vérifiant l'évidence de la fuite.
- ♣ Vérifiant les défauts latéraux internes.

2-2-2 Contrôle par ressuage :

Est une méthode de contrôle non destructif cette méthode est exclusivement dédiée à la détection de défauts surfaciques (manque de matière, éraflure,...) cette technique très utilisée dans l'aéronautique, l'industrie de production d'énergie, les transports, les prothèses chirurgicales.

Principe :

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. L'imprégnation

d'une fissure par un liquide, conduit par l'intermédiaire d'un ressuage avant l'observation visuelle, à un moyen de recherche de défauts de surface qui est parmi les plus anciens, les plus simples et les plus largement utilisés de nos jours.

La figure (1-3) illustre le principe du ressuage qui permet de détecter les défauts débouchant en surface : replis, tapures, fissures...

Ce procédé est utilisable sur tous les matériaux, à condition qu'ils ne soient pas trop poreux.

2-2-2-1 Les étapes à suivre :

Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux trois phases illustrées comme suit :

- ♣ Après une préparation de surface très soignée, et appropriée au matériau à contrôler et aux polluants à éliminer de la surface, mais aussi de l'intérieur des éventuelles discontinuités, on enduit la pièce à contrôler de pénétrant, par pulvérisation électrostatique ou par immersion (parfois par pulvérisation de pénétrant en aérosol, notamment dans le cas de ressuage localisé sur une ou plusieurs zones désignées d'une pièce volumineuse),
- ♣ on lave la pièce pour éliminer le pénétrant qui est déposé en surface. Les conditions de lavage (pression, température, durée) sont déterminées par la gamme de ressuage, afin de laver soigneusement le produit en surface sans éliminer celui qui a pénétré dans les éventuels défauts débouchant de la pièce,
- ♣ on sèche la pièce à l'étuve, parfois à l'aide d'air comprimé (air sec) à très basse pression, ou de chiffons propres, secs et non pelucheux,
- ♣ on applique ensuite le révélateur, en poudre, en suspension ou en solution,
- ♣ et enfin, on examine la pièce, en lumière naturelle dans le cas de pénétrant coloré, sous éclairage UV (ultraviolet) dans le cas de pénétrant fluorescent, dans les délais impartis par la méthode de contrôle.

2-2-2-2 Précautions :

La sensibilité de détection des défauts est souvent déterminée par le mode de préparation des surfaces. C'est-à-dire que la rigueur apportée au nettoyage préliminaire favorise grandement les résultats de l'examen.

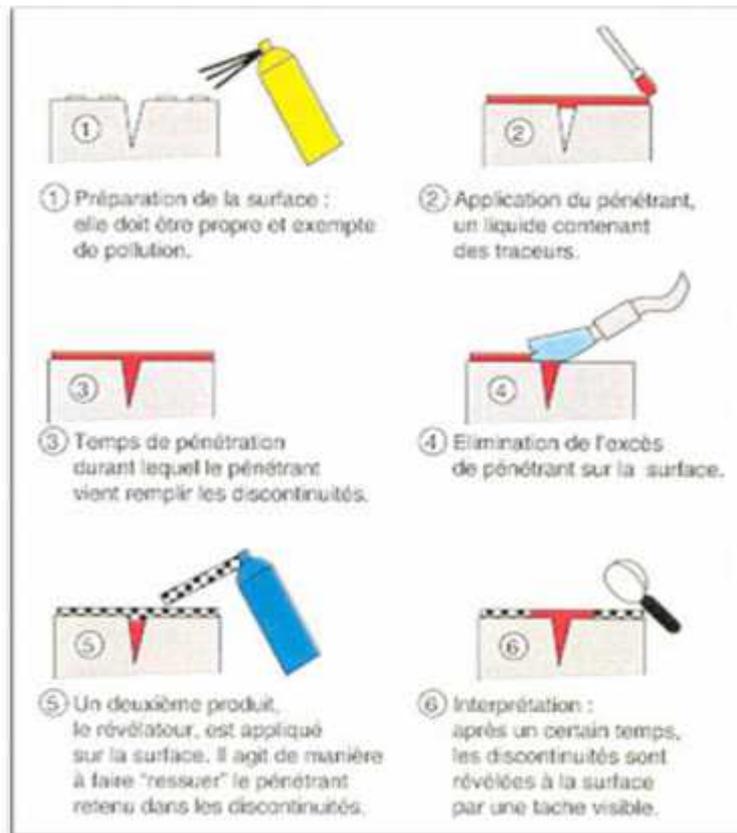


Fig.1-3 Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant

Applications :

Le ressuage est utilisé pour le contrôle : des pièces usinées, des pièces moulées, des pièces forgées, après rectification et/ou traitement thermique de pièces mécaniques, après traitement thermique, sur produits laminés ou étirés, en service

2-2-3 Contrôle par radiographie :

La radiographie est d'un emploi largement répandu dans l'industrie. Cette technique reste incontournable dans de nombreuses situations.

Rayonnements de même nature mais d'origine différente, les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes (comprises entre environ 0,1 pm et 1 000 pm).

Principe :

Le principe de la radiographie industrielle est similaire à celui de la radiographie médicale.

Les 2 moyens industriels de contrôle radiologique les plus utilisés sont :

- Radiographie gamma, non dépendante d'une source d'énergie électrique

- Radiographie X, cette méthode permet le réglage de l'énergie de rayonnement et de son intensité

Le contrôle par radiographie est basé sur le principe de l'absorption différentielle de rayonnements électromagnétique X ou GAMMA dans la matière.

Le rayonnement transmis à travers l'objet est visualisé sur un récepteur pouvant être, soit un film photographique (radiographie), soit un écran fluorescent (radioscopie)

Les discontinuités se traduisent par des différences de noircissement sur le cliché développé.

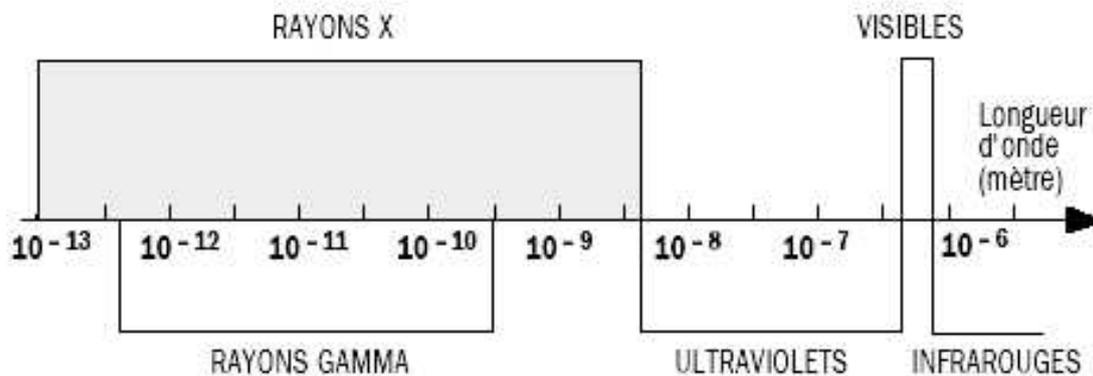


Figure 1-4 : longueurs d'ondes

Applications :

L'image radiographique captée par un écran fluorescent ou tout autre détecteur, conduisant à une image optique directement observable par l'opérateur.

Technique classique universellement utilisée dans le domaine médical, la radioscopie n'avait pas, jusqu'à récemment, connu un grand développement dans le monde industriel, alors que son emploi peut paraître extrêmement judicieux pour l'examen de pièces en grande série, des structures en mouvement, et aussi pour se donner la possibilité d'examiner des défauts présumés sous différents angles. La raison en était, d'une part, les faibles performances en rendement et en définition d'image des anciens écrans fluorescents, d'autre part le coût, la fragilité et la faible définition des récepteurs tels que le tube intensificateur de brillance couplé à une caméra de télévision.

Les choses sont en train d'évoluer avec le perfectionnement des matériels audiovisuels, mais surtout avec l'apparition des capteurs à détecteurs solides en barrettes.

On peut en effet obtenir un système performant en couplant ces détecteurs avec un système informatique ultra-rapide, capable d'exploiter en temps réel des algorithmes de traitement d'image susceptibles d'améliorer notablement la qualité du contrôle (contraste en particulier)

Soudures de raccordement, Vannes et corps de vannes, Recherche de corrosion, Pièce de fonderie.

Le domaine d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

Traditionnellement, les domaines de prédilection du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manques de pénétration.

Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce champ d'application hors des industries métallurgiques.

Dans la pratique, le choix entre radiographie X ou gammagraphie résulte de multiples considérations liées aux avantages et inconvénients de chacune de ces techniques, comme par exemple : taille et coût modeste des sources , forte pénétration de ces rayonnements mais durée d'exposition beaucoup plus longue qu'en radiographie X qui elle, par contre, nécessite la présence d'une source électrique mais offre l'avantage de pouvoir choisir plus aisément les paramètres de contrôle.

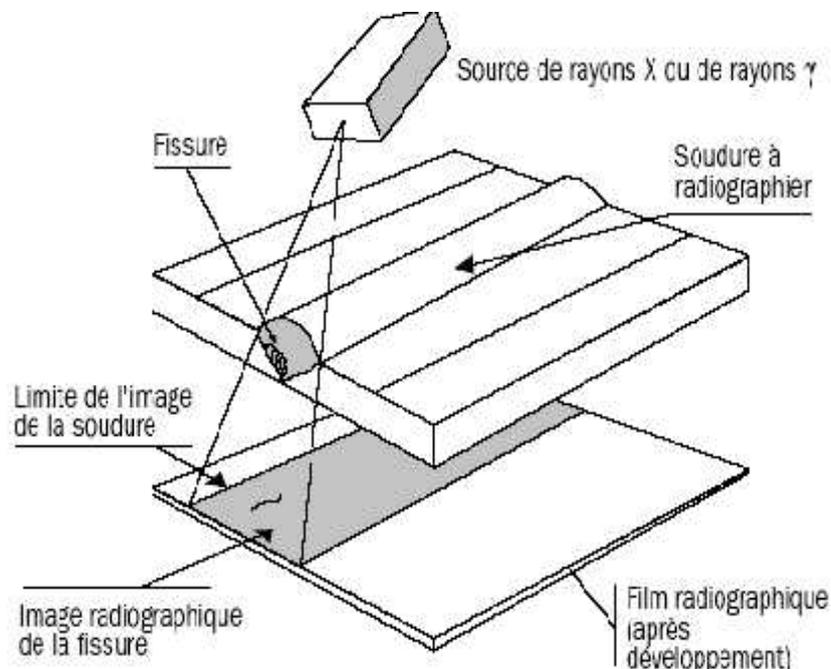


Figure 1-5 principe de la radiographie

2-2-4 Contrôle par magnétoscopie :

Recherche de défauts de surface (ou sous-jacents) dans des matériaux ferromagnétiques.

C'est une technique qui révèle les défauts de surface ou très proches de celle-ci, ou débouchant sur la surface. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte, alliages au chrome, etc.).

La détection visuelle des champs de fuite magnétique au droit des défauts peut s'effectuer en observant des accumulations de limaille de fer dues aux concentrations de flux sur la surface de la pièce à contrôler. En pratique, on utilise des révélateurs magnétiques spécialement adaptés, constitués d'une poudre ferromagnétique de granulométrie bien définie, et associés souvent à des traceurs colorants et généralement fluorescents sous lumière noire.

Principe :

La théorie des circuits magnétiques indique que la présence d'un entrefer correspond à un fort accroissement de la différence de potentiel magnétique (d.p.m.), constituant ainsi un obstacle au flux magnétique dont les lignes de force doivent alors s'épanouir latéralement selon un flux de fuite comme l'indique la (figure 1-6).

Cet effet de dispersion d'un flux magnétique hors d'une pièce ferromagnétique, au droit d'une fissure débouchante ou sous-cutanée (ou toute autre hétérogénéité non ferromagnétique se comportant comme un entrefer), est à la base d'une gamme de procédés magnétiques de détection des défauts de surface dans les aciers dont le plus connu et le plus employé est la magnétoscopie.

Ces procédés magnétiques diffèrent entre eux principalement par le mode de mise en évidence du flux de fuite magnétique correspondant à la dispersion de flux décrite ci-dessus. En magnétoscopie, on observe visuellement une accumulation de poudre de fer ou de magnétite colorée provoquée par le flux de fuite.

En Magnétographie, on recueille la trace magnétique du flux de fuite sur un film, une bande ou une pâte d'empreinte magnétisable ; les autres procédés sont regroupés sous le vocable **détecteur à flux de fuite** (*magnetic leakage flux testing*) ; il s'agit généralement d'appareils de contrôle automatique de barres et de tubes d'acier mettant en œuvre des détecteurs ponctuels de flux électromagnétiques.

Le principe consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique (continu ou alternatif) de valeur définie en fonction de la pièce (les champs doivent être assez suffisants pour saturer le voisinage du défaut). Des fuites magnétiques sont alors détectées sur les discontinuités

superficielles rendues visibles par des indicateurs (poudre d'oxyde de fer ou de fer) déposés préalablement sur la surface de la pièce.

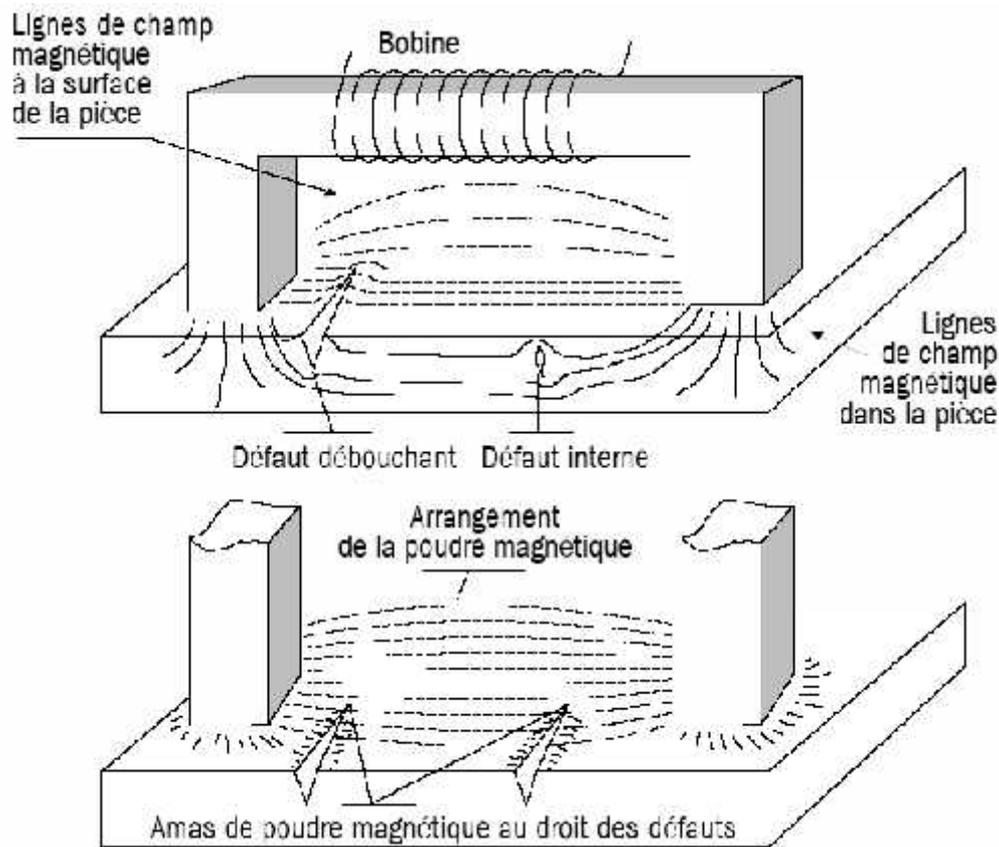


Figure 1-6 principe de la magnétoscopie

Applications :

Bien conduit, l'examen magnétoscopique se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface les plus ténus sur les pièces en acier et autres alliages ferromagnétiques.

Le procédé, grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, s'adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées.

La recherche par magnétoscopie des défauts est possible mais nettement ce contrôle ne peut malheureusement être effectué que sur des échantillons de faibles dimensions.

Une des faiblesses de la magnétoscopie est en effet sa relativement faible productivité liée à la durée des manutentions et de l'examen visuel des surfaces ; nous avons vu qu'une automatisation partielle ou totale était réalisable mais, en définitive, ce sont les procédés à mesure de flux de fuite qui ont permis d'envisager un contrôle à grand débit des produits métallurgiques longs de types barres, tubes ou fils. Ces procédés sont très performants,

puisque'ils permettent de détecter des criques et lignes de profondeur supérieure à 0,3 mm sur des barres brutes et de l'ordre de 0,1 mm ou parfois moins sur des produits filetés ou calibrés.

Le magnétoscopie est utilisé pour le contrôle :

- des soudures bout à bout ou d'angle,
- des pièces moulées (criques dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...),
- des pièces forgées (criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion...),

Cette méthode de contrôle peut intervenir :

- après traitement thermique,
- en service,
- avant soudage,
- pendant soudage entre passe,
- après soudage,

2-2-5 Emission acoustique :

L'émission acoustique est le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation (Norme AFNOR NFA 09350).

La méthode de contrôle par émission acoustique s'appuie sur une grande connaissance des matériaux (propriétés physiques, mécaniques, etc.) et sur l'expérience en émission acoustique acquise à travers de nombreux travaux de recherche en laboratoire et en partenariat avec l'industrie.

C'est la technique la mieux adaptée pour surveiller et étudier la cinétique de l'endommagement dans les matériaux et les structures. La puissance du contrôle par émission acoustique réside dans la diversité des paramètres du signal enregistré (amplitude, énergie, fréquence, etc.), et dans les moyens développés pour les traiter. C'est la combinaison de ces paramètres et l'exploitation des techniques de traitements statistiques de données tels que les réseaux de neurones qui conduisent à l'établissement d'un diagnostic précis sur l'état de l'endommagement.



Figure 1-7 Equipement d'analyse

L'émission acoustique peut être utilisée pour détecter un grand nombre de dégradations affectant les matériaux et structures:

- ✓ Propagation de fissures
- ✓ Déformation plastique
- ✓ Corrosion
- ✓ Fuites

Principe :

Lorsqu'une contrainte interne ou externe est appliquée à un matériau, l'énergie emmagasinée peut être brutalement réduite par un réarrangement de la structure interne du matériau. De même, une partie de l'énergie rayonnée se propage sous la forme d'ondes élastiques transitoires. Cette énergie rayonnée constitue l'émission acoustique.

Dans le domaine des contrôles non destructifs, l'émission acoustique s'avère une méthode qui permet de percevoir en temps réel l'apparition d'un signal résultant d'une décohésion dans un matériau. C'est également une méthode de contrôle à caractère volumique en raison de l'émission et de la propagation des ondes élastiques.

Cette technologie permet de traiter en priorité :

- ♣ La détection et la localisation de l'endommagement
- ♣ Le contrôle de la corrosion
- ♣ L'identification des défaillances
- ♣ L'auscultation des structures sous contraintes

- ♣ La surveillance dans le temps
- ♣ La détection des fuites et le contrôle d'étanchéité

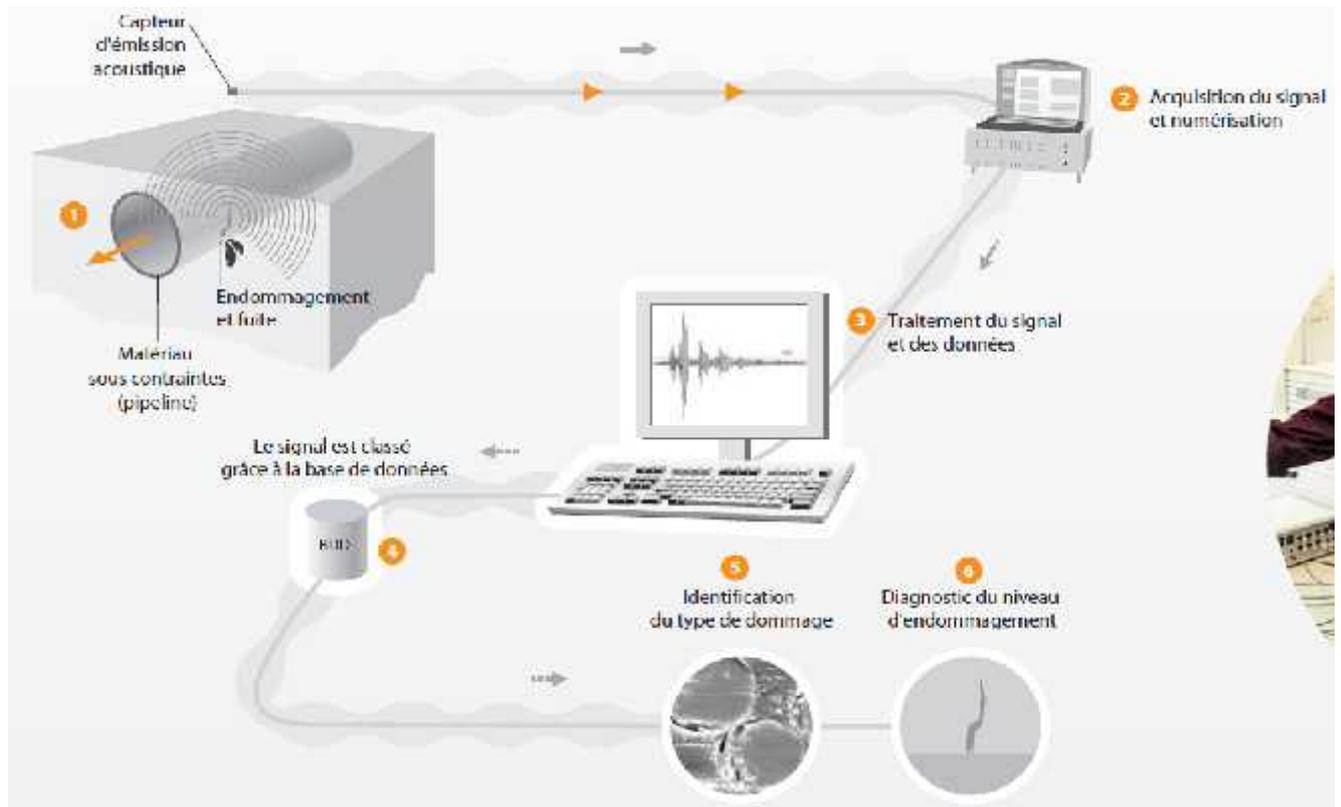


Figure 1-8 principes de contrôle par émission acoustique

Domaine d'application :

La principale application industrielle de l'émission acoustique est le contrôle des équipements métalliques sous pression et des réservoirs de stockage. Ces équipements sont, en général, des structures de taille importante pour lesquelles un suivi périodique est réglementé (décret du 13 décembre 1999 et arrêté modifié du 15 mars 2000). L'émission acoustique est aussi appliquée sur les matériaux composites.

En effet, la requalification périodique ou la réception pour les équipements neufs, comporte une épreuve hydraulique souvent problématique (arrêt de production et maintenance, corrosion et surcharge pendant l'épreuve,...). Cette épreuve hydraulique peut être remplacée, dans certains cas, par d'autres types d'essais tels qu'une épreuve pneumatique couplée à des mesures complémentaires. Le contrôle par émission acoustique est particulièrement adapté pour satisfaire à ces exigences réglementaires.

Le contrôle peut être réalisé aussi bien durant une épreuve hydraulique que pneumatique. Une surpression de 10% par rapport à la pression de service vue par l'appareil au cours des 6 derniers mois, permet d'obtenir des résultats d'EA probants. Dans certains cas un suivi en service (ou lors des changements de procès) peut suffire à évaluer l'intégrité l'un appareil.

On peut aussi contrôler des structures munies d'un revêtement (calorifuge par exemple) ou des structures enterrées. Les capteurs EA classiques supportent des températures de l'ordre de 100°C. Si nécessaire l'utilisation de capteurs haute température permet de contrôler des structures jusqu'à quelques centaines de degrés.

2-2-6 La thermographie Infrarouge :

2-2-6-1 Définition :

La thermographie infrarouge est une technique d'imagerie qui permet de visualiser les différences de températures. Elle est essentiellement utilisée pour la maintenance des installations électriques.

La contribution de la thermographie en maintenance mécanique est de plus en plus répandue. Dès qu'il y a échauffement par un frottement devenu anormal (usure, manque de lubrification, déformation dynamique des pièces mécaniques...), la caméra thermique peut dénoncer les points défectueux, 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.

2-2-6-2 Principe :

La thermographie infrarouge est une technique qui permet à distance et sans contact d'observer une scène thermique et d'en calculer sa température.

Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement infrarouge.

La caméra de thermographie infrarouge reproduit cette puissance de rayonnement sous forme d'image thermique et permet l'intégration des températures sous la forme d'un thermogramme. La thermographie infrarouge, utilisée comme technique d'analyse, permet d'établir instantanément la carte thermique de tout objet observé.

La structure est sollicitée par un flux thermique qui la traverse une interruption dans la propagation de la chaleur engendre un écart de température t sur la surface opposée.

La caméra infrarouge découvre l'anomalie au sein de l'image thermique de la surface.

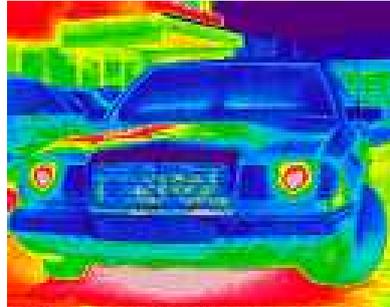


Figure 1-9 Utilisation dans le domaine de construction



Figure 1-10 Camera infrarouge

Application :

Contrôle électrique : armoires électriques, fusibles, transformateurs, moteurs, installations informatiques... Contrôle bâtiment : localisation de planchers chauffants, mise en évidence de ponts thermiques, détection d'infiltration d'humidité dans les façades et toitures, contrôles de chambres froides... Contrôle mécanique (outil de chaîne de production) : machines tournantes, vibrantes, générateurs, moteurs, pompes...

Contrôle "fluides" : détection de fuite de vapeur dans les conduites...

Contrôle de réfractaires : fours industriels, fours pétrochimiques, séchoirs...

2 2-7 courants de Foucault :

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND.

Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,...) pour mettre en évidence les défauts surfaciques ou sous-cutanés ou une quelconque variation des paramètres physiques du matériau à contrôler.

2-2-7-1 Principe :

Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler, la trajectoire de ces courants sera perturbée soit par la géométrie soit par les caractéristiques internes de la pièce.

Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) et le champ résultant sera fonction :

- Du signal d'excitation
- De la conductivité électrique
- De la perméabilité magnétique
- De la géométrie de la cible
- De la distance capteur-cible (lift-off)

Une mesure directe de ce champ ou d'une de ces grandeurs dérivées (FEM, impédance) permettra de caractériser la cible. La figure (1-11) donne un aperçu du principe. [7]

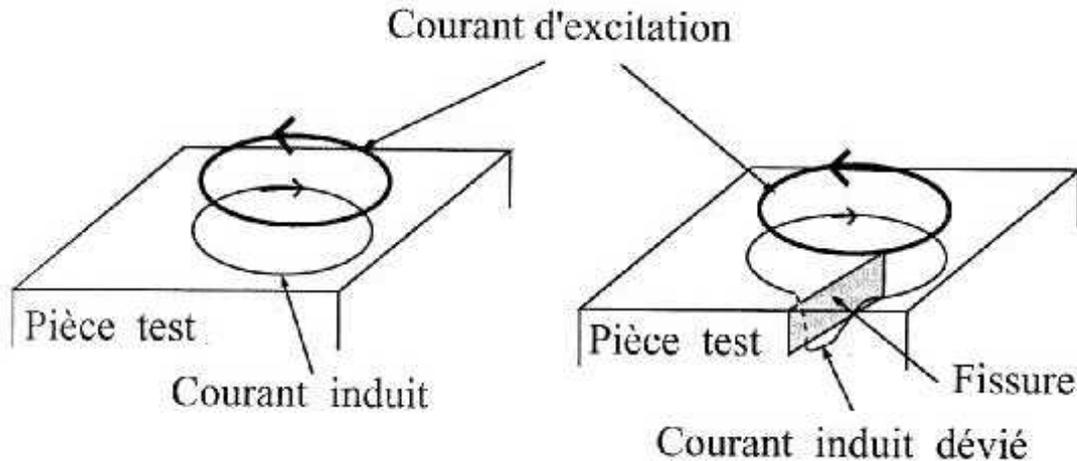


Figure 1-11 le principe du CND par courant de Foucault

2-2-7-2 Différents modes d'excitations :

Le mode d'excitation d'un capteur est un paramètre très important pour avoir la meilleure information sur la cible, on peut distinguer trois modes d'excitation :

- Excitation mono fréquence
- Excitation multifréquences
- Excitation pulsée

Excitation mono fréquence :

Les courants induits sont obtenus par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité des paramètres recherchés. Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable. En effet :

- ♣ Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants induits sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause du bruit
- ♣ Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter spires du capteur.

Cette méthode présente des limitations car elle permet difficilement de caractériser le défaut.

Excitation multifréquence :

La méthode multifréquence est sans doute celle qui est la plus utilisée dans le CND à courant de Foucault. En réalisant des mesures à plusieurs fréquences d'excitation, il est possible d'atténuer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices. La réduction de ces grandeurs n'est possible qu'à partir de signaux contenant suffisamment d'informations pour permettre une séparation des paramètres.

L'utilisation de n paramètre permet d'avoir $2n$ informations réelles et d'éliminer $2n-1$ perturbation.

Cette technique est très utilisée pour l'inversion de données fournies par le capteur en vue de déterminer les paramètres d'une cible malgré la présence de grandeurs perturbatrices.

L'excitation multifréquences peut être réalisée soit :

- ♣ En séquence : fréquence par fréquence en utilisant un dispositif de mesure classique (mono fréquence). L'inconvénient de cette méthode réside dans le temps d'acquisition important qui ralentit la mesure.
- ♣ Simultanément : les fréquences sont générées simultanément, cette méthode nécessite un dispositif de mesure compliqué est onéreux. En pratique, le nombre de fréquences dépasse rarement quatre du fait de la complexité et de la difficulté de réglage de tels appareils. [7]

Excitation pulsée :

Cette technique a vu le jour au milieu des années 50, avec pour application la mesure des revêtements métalliques, puis elle a été appliquée à la détection de défauts profonds. Cette méthode représente une alternative à l'excitation multifréquences, elle consiste à émettre un champ magnétique large bande en excitant le capteur avec un signal impulsionnel. Ce mode de fonctionnement est communément appelé contrôle par courant de Foucault pulsé.

La forme des signaux d'alimentation peut être : rectangulaire, triangulaire ou semi sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Dans ce type de contrôle, c'est l'évolution temporelle des signaux qui est utilisée. Une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courant de Foucault mono - fréquence ou multifréquences. Cependant, la quantité d'informations recueillies dans la pratique dépend fortement du traitement des signaux de bruit.

2-2-7-3 Effet de peau :

Ce phénomène d'origine électromagnétique apparaît dans tous matériaux conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps, dans le cas du contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce commencent à décroître d'une manière exponentielle à partir de la surface.

La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad 2-1$$

Une grandeur caractéristique correspondant à la distance au-delà de laquelle les courants induits ont perdu 63% de leur amplitude.

Cette longueur est appelée « profondeur de pénétration » ou « épaisseur de peau », et est essentielle dans la compréhension du fonctionnement du CND par CF.

Ou :

f : la fréquence d'alimentation.

\sim_r : la perméabilité magnétique relative du matériaux.

\sim_0 : la perméabilité magnétique du vide.

\dagger : La conductivité électrique.

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau.

Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante :

$$J(Z) = J_0 \cdot e^{-Z \sqrt{\mu \pi f \sigma}} = J_0 \cdot e^{-Z/\delta} \quad 2-2$$

Cette équation montre que l'amplitude de la densité des courants induits varie de façon exponentielle en fonction de la profondeur.

Ou :

Z : la profondeur considérée à l'intérieur de la cible

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

δ : profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

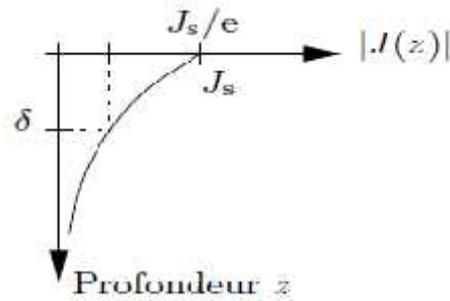


Figure 1-12 Distribution des courants de Foucault en fonction de la profondeur

L'équation (2-2) fait apparaître une décroissance exponentielle sur l'amplitude des courants : ceux-ci sont localisés à une faible profondeur. Ce phénomène, appelé effet de peau, a pour conséquence la difficulté voire l'impossibilité de détecter un défaut situé à une distance très supérieure à l'épaisseur de peau δ . En effet, les courants induits ont une amplitude inférieure à 95% de l'amplitude maximale au-delà d'une profondeur supérieure à 3δ .

2-2-7-4 Différents types de capteurs :

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas, il s'agit de mesurer une impédance représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue par l'intermédiaire d'une bobine (capteur). La structure du capteur s'impose en fonction de l'application visée.

Les capteurs sont des enroulements électriques qui génèrent un champ magnétique lorsqu'ils sont alimentés par un signal électrique; variable. On distingue en fonction de la géométrie du spécimen à contrôler trois types principaux d'élément de mesure :

Capteur à double fonction :

Ce type de capteurs est très utilisé dans les applications type courant de Foucault sinusoïdaux. C'est une seule bobine émettrice-réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement. Ce type de capteurs favorise la détection de grandeurs à évolution lente telles que l'épaisseur de revêtement et de conductivité.

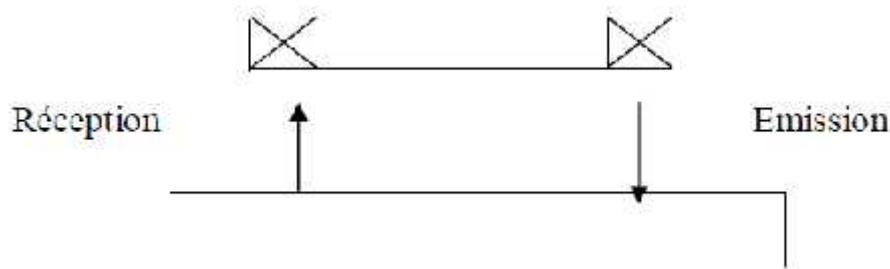


Figure 1-13 bobine à double fonction

Capteurs à fonctions séparés :

Le capteur à fonctions séparées, est constitué de 2 bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau. Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1\,000\text{ Hz}$).

La détection des défauts profonds favorise une augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cependant, cet accroissement de la taille de l'émetteur se fait au détriment de la résolution spatiale du capteur. Il est donc nécessaire d'établir un compromis sensibilité/résolution. Ce compromis est facilité par l'adoption de capteurs à fonctions séparées.

L'élément de mesure peut être une bobine plus petite aux bornes de laquelle on mesure la d.d.p ou la variation d'impédance.

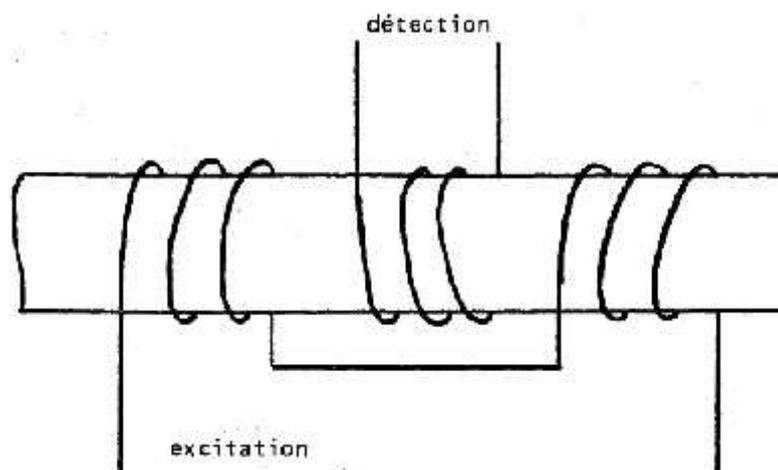


Figure 1-14 Capteur à fonction séparé

Capteurs différentiels :

Ils sont constitués d'au moins deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur. Dans le cas d'un capteur à deux éléments, la mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de capteur est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant des perturbations induites par une variation d'épaisseur ou de conductivité.

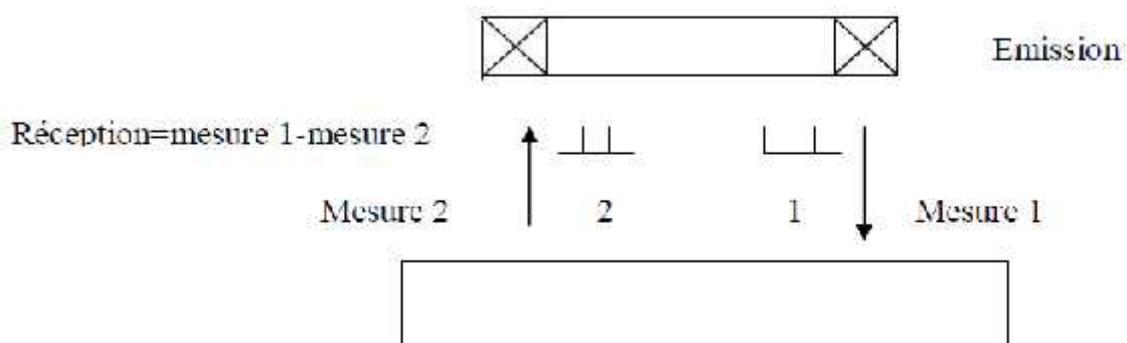


Figure 1-15 Capteur différentiel à deux éléments

2-2-7-5 Diagramme d'impédance:

Le diagramme d'impédance est une représentation de l'impédance de la bobine. Ses parties réelle et imaginaire dans un plan complexe sont en fonction de la variation d'un paramètre donné. L'ensemble des courbes représentant les paramètres influent dans le plan d'impédance peuvent être normalisé en courbe standard appelée diagramme d'impédance normaliser.

a) Influence de la conductivité électrique :

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

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

b) Influence de la fréquence :

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

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

Une augmentation de la fréquence à un déplacement le long de la courbe d'impédance à partir du haut.

c) Influence de la perméabilité :

A la différence de la conductivité électrique et de la fréquence, l'influence de la perméabilité se manifeste par un déplacement de la courbe d'impédance. Dès que celui-ci se trouve différent de l'unité, les résultats peuvent masquer la variation des autres paramètres. Pour remédier à cette influence la saturation du matériau est recommandée.

d) Influence de l'épaisseur :

De même que pour la perméabilité, l'épaisseur crée un déplacement de la courbe d'impédance, cette influence apparaît pour une variation du coefficient de remplissage ou à partir d'une certaine épaisseur dépendant de la constante de pénétration standard.

La variation d'impédance due à une variation d'épaisseur est intéressante pour une mesure de revêtement ou de l'épaisseur d'une couche isolant sur un matériau.

e) Influence des défauts :

Elle est caractérisée par la modification des lignes de courants de Foucault induits dans le matériau. Une anomalie dans sa structure physique affecte ces caractéristiques électriques ou magnétiques. La localisation d'un défaut est possible par la concentration des courants de Foucault. Le choix de la fréquence permet de dimensionner le défaut en question.

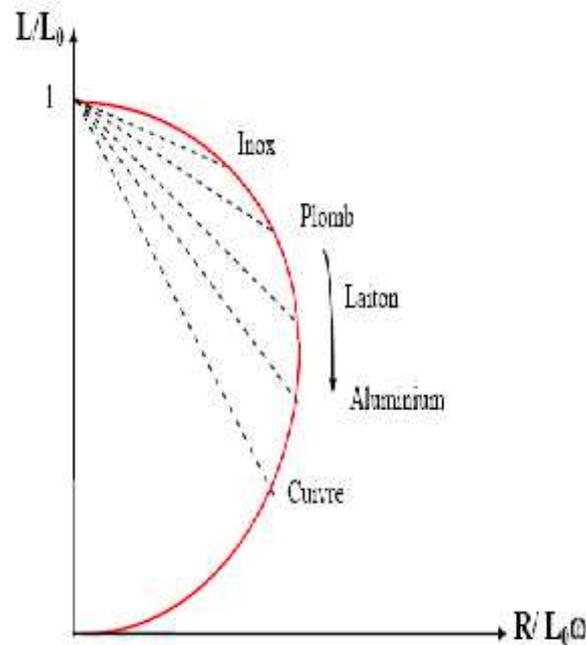


Figure2-5 : diagramme d'impédance normalisée

2-2-7-6 Contrôle des surfaces planes :

Le contrôle des surfaces planes, en ce qui concerne la recherche de petites criques, fissures ou hétérogénéités locales, peut être réalisé à l'aide d'un capteur que l'on glisse avec ou sans contact, qui comporte une bobine plate souvent associée à un noyau ferromagnétique destiné à concentrer et bien définir la zone sensible de la sonde. De très fins défauts peuvent être ainsi détectés sur tout produit conducteur ; toutefois, le caractère ponctuel de la zone sensible oriente plus volontiers l'usage du procédé vers le contrôle de petites surfaces correspondant aux zones critiques dans la dégradation d'une pièce mécanique plutôt que vers l'examen systématique de grandes surfaces comme les tôles.

C'est ainsi que les courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique. Le contrôle peut être manuel mais, dans certains cas de contrôle en série, on pourra aisément automatiser le procédé en utilisant un bras manipulateur pour déplacer la sonde et un système de traitement de l'information conduisant à une cartographie et à un archivage des résultats du contrôle.

Conclusion :

La complexité grandissante des processus industriels et des pièces fabriquées, les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces conduisent à mettre en place des contrôles de qualité de plus en plus poussés.

L'utilisation des courants de Foucault (CF) permet un contrôle non destructif (CND) fiable, rapide et peu coûteux.

Sa simplicité, sa robustesse d'utilisation, et son caractère électromagnétique « sans contact » en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Introduction

L'utilisation du titane est en relation avec ses différentes structures, propriétés mécaniques, ses propriétés chimiques, ses propriétés physiques. Un de leurs domaines d'application privilégiés est le secteur aéronautique et spatial (disques de moteurs d'avion, train d'atterrissage, carter, éléments de voilure...) 70 % du marché consiste en des produits longs destinés à être matricés ; les 30 % restants sont surtout des produits plats pour l'emboutissage ou le gonflage superplastique.

Avec une température de fusion de l'ordre de 1670°C et une masse volumique de l'ordre de 4,6 g/cm³, le titane et ses nombreux alliages forment une classe de matériaux à haute résistance mécanique spécifique. Les recherches entreprises sur ces matériaux ont constamment permis d'adapter leurs propriétés aux exigences spécifiques de certaines applications, dans le domaine de l'aérospatiale et de l'aéronautique, et plus récemment dans ceux de la chimie et de l'automobile. Cette adaptation fonctionnelle est généralement obtenue en faisant varier la composition chimique initiale des alliages et en modifiant les paramètres du procédé d'élaboration des semi-produits. Il est ainsi possible de contrôler la proportion et la morphologie des phases en présence et d'obtenir des états métallurgiques répondant à des besoins spécifiques.

Deux qualités technologiques remarquables :

- ♣ Résistance mécanique spécifique élevée (exprimée selon le quotient résistance à la traction / masse volumique)
- ♣ Résistance à la corrosion très grande dans différents environnements agressifs (corrosion chimique, résistance à l'oxydation jusque 600°C).

1-1-Rappels sur la métallurgie de titane et ses alliages :

Au-dessus de 882 °C, et jusqu'à sa température de fusion (1 670 °C), le titane pur présente la structure stable à haute température, cubique centrée (0,332 nm de paramètre cristallin), qui est appelée phase β (figure 1-1). Au-dessous de 882 °C et donc au voisinage de l'ambiante, il a une structure hexagonale pseudo-compacte (appelée phase α).

La température de transition est appelée transus (T_s).

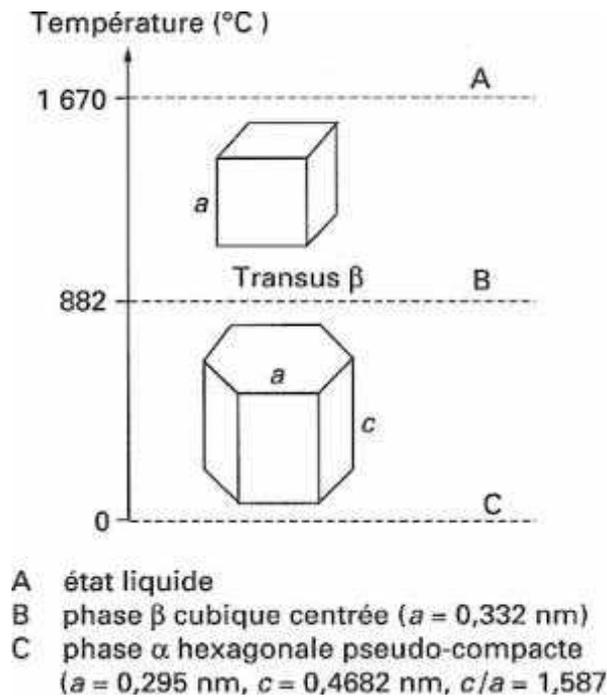


Figure 1-1 : Cristallographie du titane pur en fonction de la température

Le titane pur est un métal qui présente deux structures cristallographiques différentes stables à basse et à haute température (Figure 1-1) : la phase α et la phase β .

• **La phase α** est stable à température ambiante. Elle se caractérise par un réseau hexagonal compact de paramètres de maille à 25°C :

$$a = 2,950 \text{ \AA}$$

$$c = 4,680 \text{ \AA}$$

Avec un rapport $c/a = 1.587$

Ce rapport est inférieur à 1.633 qui représente le rapport théorique de compacité idéale du système hexagonal, ce qui induit un certain nombre de propriétés ; ainsi, dans le cas des alliages de titane, le plan de base perd son privilège de plan atomique de haute densité au profit des faces du prisme et des plans pyramidaux.

• **La phase β** est la phase stable à haute température, elle présente une structure cubique centrée de paramètre de maille :

$$a = 3,320 \text{ \AA}$$

Les deux structures ainsi définies sont représentées schématiquement ci dessous. La température de transition $\alpha \rightarrow \beta$ est appelée transus (T_s) est de 882°C dans le cas du titane pur.[1]

1-1-1 Caractéristique mécanique du Titane :

Propriété	Valeur	Unité
Numéro atomique	22	-
Masse atomique	47,9	g
Masse volumique	4,51	g.cm^{-3}
Température de transf. allotropique	882	°C
Température de fusion	1670	°C
Température d'ébullition	3287	°C
Capacité thermique massique	522	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	16,7	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Résistivité électrique à 20°C	$47,8 \cdot 10^{-8}$	$\Omega.m$
Coefficient de dilatation linéaire à 20°C	$8,5 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Susceptibilité magnétique	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$
Module d'élasticité	110000	MPa
Coefficient de Poisson	0,33	-

tableau1-2-Caractéristique mécanique de Titane [1]

1-2 Les alliages de titane:

1-2-1 Effet des éléments d'addition :

Dans le domaine de composition qui est habituellement utilisé pour les alliages de titane, les modifications apportées par les éléments d'addition se limitent, dans la majorité des cas, à un simple déplacement des domaines d'existence des deux phases précédemment décrites, ainsi qu'à une légère modification des paramètres des réseaux. Il est intéressant de rappeler l'utilité des diagrammes de phases et la classification traditionnelle qui en découle. De plus, nous décrirons rapidement quatre phases qui peuvent apparaître dans les alliages de titane dans des conditions particulières. [4]

1-2-1-1 Les éléments d'addition :

Les éléments d'addition vont stabiliser β ou α en plus ou moindre grande quantité à la température ambiante. On peut classer les différents alliages de titane en trois grandes familles selon leur proportion de phase β et α retenue à la température ambiante.

Les éléments d'addition stabilisent soit la phase β (élément β -gène), soit la phase α (élément α -gène). Les éléments β -gènes augmentent la valeur de T_c ; les éléments α -gène diminuent cette dernière. [1]

Éléments alphagènes :

- stabilisent la phase β , augmentent la température T_c , étendent le domaine de phase β .
sont l'aluminium (**Al**), l'oxygène (**O**), le carbone (**C**) et l'azote (**N**).

Éléments bêtagènes :

- les éléments β isomorphes, miscibles en toutes proportions dans la phase β :
- les éléments β eutectoïde, pouvant former des précipités

On distingue :

- ♣ les éléments **isomorphes**, miscibles en toutes proportions dans la phase β , qui sont l'hydrogène (**H**), le molybdène (**Mo**), le vanadium (**V**) et le niobium (**Nb**) ;
- ♣ les éléments **eutectoïdes**, pouvant former des précipités, tels que le manganèse (**Mn**), le fer (**Fe**), le chrome (**Cr**), le silicium (**Si**), le nickel (**Ni**) et le cuivre (**Cu**).

Éléments neutres :

- ayant peu d'effet sur la position des points de transformation.

Tels que le zirconium (**Zr**) et l'étain (**Sn**).

Éléments	Diagramme d'équilibre	Éléments en insertion	Éléments en substitution
Alphagènes		O, N, B, C	Al
Bêtagènes	<p>Isomorphes</p>		Mo, V Nb, Ta
	<p>Eutectoïdes</p>	H	Mn, Fe, Cr W, Ni, Cu, Ag, Si, Co Au
Neutres			Sn, Zr

Tableau 1-3- Classification des éléments d'addition des alliages de titane

1-2-2 Les principales familles d'alliages :

Il est usuel de classer les alliages de titane suivant leur composition et les phases dominantes à température ambiante.

On peut dire que les effets des éléments d'alliage sur la stabilité respective des phases α et β sont, en première approximation, additifs.

Les alliages obtenus sont affiliés aux classes suivantes selon la nature des phases présentes à la température ambiante à l'état d'utilisation :

Selon la nature des phases présentes à la température ambiante à l'état d'utilisation :

- **Alliages** : constitués de 100 % de phase ;

Ex Ti 40 Ti 0.2Fe ou TA5E (Ti5%Al 2,5%Sn)

- **Alliages** + : possédant des proportions éminemment variables de phase et ;

- **Alliages** : contenant, 100 % de phase .

On se rend compte que la classe des alliages + est extrêmement vaste. On a donc créé des sous-classes qui sont les suivantes :

- **Alliages quasi** : alliages possédant de la phase à une teneur de quelques pour-cent (< 5 %);

Ex Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zn2Mo) ou IMI 685(TA6Zr5D Ti6Al5Zr0.5Mo0.2Si)

- **Alliages** + : alliages dont la teneur en phase est comprise entre 5 et 20 % ;

Ex TA6V4 (Ti6Al4V) Ti6246 (Ti6Al2Sn4Zr6Mo)

- **Alliages riches** : alliages susceptibles de retenir une phase métastable à la température ambiante par refroidissement très rapide (' ou m qui se transformera, par traitement thermique, en phases et avec des teneurs de phase à l'équilibre voisines de 20 à 25 % ;

Ex : Ti 17 (Ti5Al2Sn2Zr4Mo4Cr) et b-Cez (Ti 5Al2Sn4Zr4Mo2Cr1Fe)

— **Alliages métastables** (m) : alliages susceptibles de retenir de la phase métastable à l'ambiante par refroidissement moyennement rapide, cette dernière se transformant en phases et stable avec 25 à 35 % de phase .

Ex : LCB Timet (Ti1.5Al6.8Mo4.5Fe) b 21S (Ti 0.2Al 15Mo2.8Nb) Ti 10-2-3 (Ti3Al10V2Fe)

1-2-2-1 propriétés des familles d'alliage de titane :

Type d'alliage	Avantages	Inconvénients
quasi	<p>Bonne stabilité sous contrainte à chaud</p> <p>Bonne tenue au fluage jusque vers 650°C</p> <p>Emploi aux températures cryogéniques (nuances ELI)</p> <p>Bonne soudabilité</p>	<p>Ductilité au pliage inférieure à celle des alliages + et considérablement plus faible que celle des alliages</p> <p>Transformation à chaud demandant plus de puissance mécanique</p> <p>Peu de réponses aux TT</p>
+	<p>Caractéristiques mécaniques élevées par TT</p> <p>Assez bonne ductilité, y compris au pliage</p> <p>Bonne stabilité sous contrainte à chaud jusque vers 500°C</p> <p>Assez bonne résistance à l'oxydation</p>	<p>Soudabilité fonction de la nuance et des procédés</p> <p>Ductilité des soudures inférieures à celles des alliages</p> <p>Trempabilité limitée</p> <p>Ductilité au pliage inférieure à celle des alliages riches</p> <p>Fin de laminage ou de forgeage dans le domaine +</p>
riche - métastable	<p>Excellente ductilité et résistance moyenne à l'état trempé</p> <p>Possibilité d'obtention de très hautes résistances, à l'ambiante, éventuellement après conformation à froid</p> <p>Trempabilité élevée</p>	<p>Moins bonne tenue à l'oxydation et au fluage</p> <p>Faible stabilité à chaud sous contrainte</p> <p>Température maximale d'emploi 350 à 450°C suivant les alliages</p>

tableau1-4- propriétés des familles d'alliage de titane

1-3 Applications aéronautique de titane et ses alliages :

Les domaines de l'aéronautique et de l'aérospatial constituent la première des applications historiques du titane et ses alliages ; 80 % des compositions ont été conçues pour ces applications. Dans ce secteur, on utilise totalement ses excellentes propriétés spécifiques.

De nos jours, le titane constitue 6 à 9 % de la masse des avions.

On en trouve tout d'abord sous forme de pièces forgées, dont la plus impressionnante est sans nul doute le train d'atterrissage du B777, mais aussi sous forme de boulons.



Figure 1-2-exemples d'emploi

Il ne faut pas oublier les éléments de moteur, à savoir les étages basse et moyenne température : aubes fan, aubes courtes, disques de turbine, carté... ; la température maximale d'utilisation étant limitée à 600 °c.

Conclusion :

Les propriétés du titane et ses alliages sont extrêmement variées. Cela est dû au nombre élevé de compositions chimiques et de morphologies de microstructure.

Aussi les excellentes propriétés mécaniques (résistance, ductilité, ténacité, fatigue, fluage...) qui permettent de concevoir des pièces plus fines et légères, Cet gamme attractif de propriétés explique le développement des applications dans les domaines aéronautique, aérospatial et chimique. Cependant, de plus en plus, on en trouve pour des applications courantes, car l'ingénieur devient plus familier avec cette classe de matériaux.

3-1- l'approche physique des CF dans l'analyse microstructurale :

La recherche dans ce domaine étant très concurrentiel, les techniques des courants de Foucault NDT peut donner par leurs sensibilités un endroit significatif pour résoudre des problèmes mécaniques et métallurgiques complexes dans l'industrie et l'espace en particulier.

La simplicité de cette technique et les divers avantages qu'elles offrent dans la détermination des propriétés intrinsèques des matériaux permettent l'évaluation du matériel.

Les résultats de l'analyse NDT confirment que les oscillations obtenues par le courant de Foucault dû aux contraintes dans le matériel dans le temps réel provoqué par l'effort de tension.

Ces processus trouvent une application significative dans mécanique et détermination métallurgique des paramètres de matériaux ; effectuant analyse des efforts de résiduel subis dans le matériel par des courants de Foucault comme méthode d'essai non destructive.

Des mesures par des sondes de courant de Foucault ont été prises dans les zones critiques, l'interprétation du signal est le plus sensible et difficile dans la direction ou elle est toujours difficile de relier le signal à un événement mécanique ou métallurgique, Dans certains métaux, comme le titane, il se produit de très grands écarts de température qui provoquent des contraintes durant le refroidissement.

Le travail de thèse proposé vise à étudier l'effet des microstructures sur les courants de Foucault dans le matériau de titane. Cette méthode assemble les grandeurs élastiques (contraintes, déformations) entre elles et aux grandeurs électriques (champs et déplacements électriques).

Les microstructures engendrent une modification du caractère magnétique, Ce caractère permet de quantifier la microstructure et également de suivre son apparition. Pour cela, différentes techniques de mesures magnétiques existent.

Le dispositif de mesure de Courant de Foucault qui a été utilisée a permis de détecter l'évolution de l'apparition de la contrainte après la sollicitation sur les nuances de l'alliage de titane TA6V.

3-2 L'approche expérimentale :

3-2-1 Observation métallographique :

3-2-1-1 Micrographie :

La connaissance des propriétés du matériau passe par la détermination des phases qui le compose, quand à leurs formes, leurs distributions et leurs qualités. L'observation métallographique au microscope optique est une méthode de base pour l'étude des transformations structurales. L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement à l'attaque chimique. La préparation des échantillons doit être effectuée de sorte à éviter tout échauffement ou écrouissage du matériau, ces derniers peuvent entraîner une modification structurale.

La connaissance des propriétés d'un matériau passe par la détermination de la structure qui la compose. Cette structure dépend de l'échelle à laquelle on l'observe.

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon. Pour cela, on procède à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

Une opération de micrographie comprend :

- un prélèvement de l'échantillon
- un polissage
- une attaque au réactif approprié
- un examen microscopique (de 50 à 600 fois)



Figure3-1 L'appareil de micrographie

3-2-2 Essai de dureté et de microdureté (Vickers) :

La dureté se définit comme la résistance d'un matériau à l'empreinte d'un corps en matériau plus dur. Conformément à cela, la plupart des tests de dureté conventionnels impliquent l'utilisation d'un pénétrateur dur (par exemple, en diamant) qui est pressé à la verticale dans la surface de l'échantillon.

La méthode la plus communément utilisée dans les laboratoires de tests est le test de dureté Vickers, Le pénétrateur utilisé dans cette technique est un diamant pyramidal à base carrée comprenant des angles à facettes de 136°.

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre, l'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau.

Les essais de dureté consistent à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide (Vickers) et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée considérée comme une pyramide droite et on relie cette information à la charge appliquée par la formule :

$$H_v = 0,189 * \frac{F}{d^2}$$

Ou ; F : Niveau de la charge appliquée.

d : Diamètre de l'empreinte.

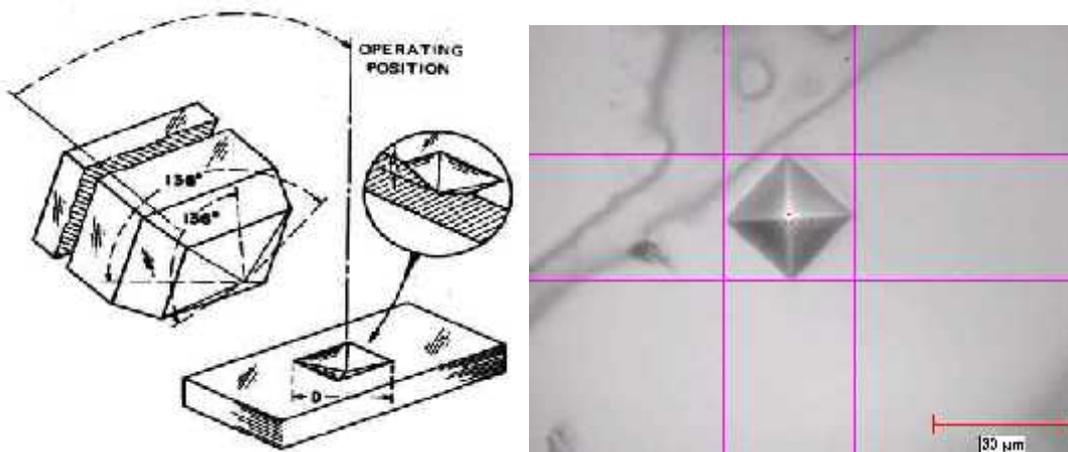


Figure3-2 Dureté Vickers



Figure3-3 L'appareil de test de microdureté

3-2-3 Réalisation des sondes :

Les sondes utilisées dans les CF sont caractérisées comme suit :

- De diamètre de 2,5 mm, diminuer la surface du contact pour focaliser le champ magnétique.
- D'une longueur de 100mm,
- Un nombre de spires (200) et de (2) couches bien déterminé pour avoir un champ magnétique suffisant pour notre caractérisation, Le diamètre du fil est 0,13mm, avec un noyau en ferrite à section circulaire, qui a une très large bande de fréquence,

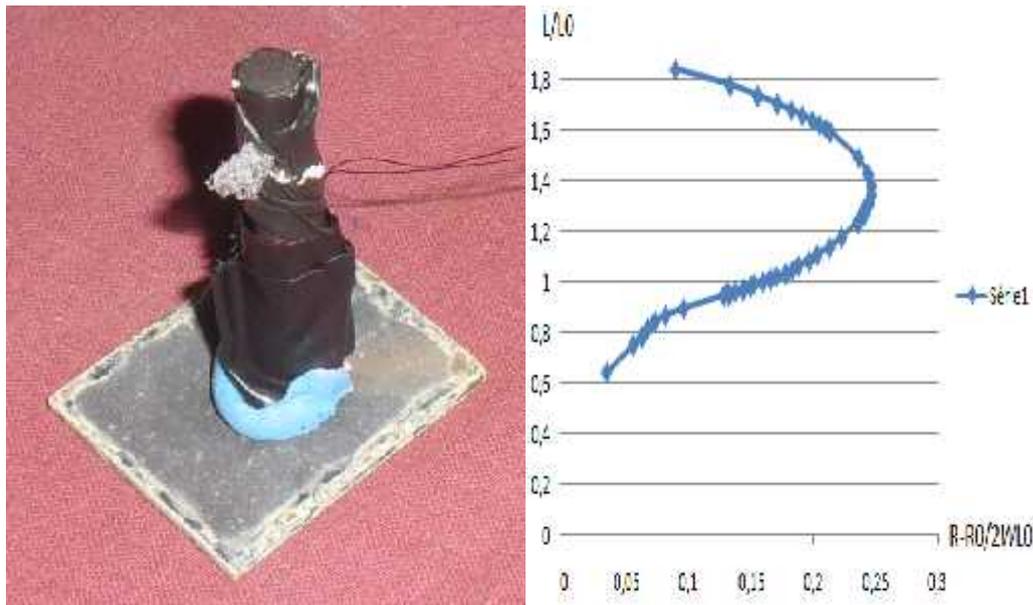


Figure3-4 sonde utilisée en CF et sa caractérisation

3-2-4 Réalisations des échantillons :

3-2-4-1 Le matériau étudié :

Le matériau utilisé dans notre étude est l'alliage de Titane TA6V qui est disponible au niveau de l'atelier d'AIR Algérie.

(Alliage représentant à lui seul plus de 90 % du tonnage des alliages de titane coulés pour les applications aéronautiques) sont utilisées à l'état brut ou recuit, avec une **structure biphasée alpha + bêta**, et une température de transus bêta 1000⁰c.

Il a les caractéristiques mécaniques suivantes :

Nuance	Éléments d'addition (% masse)	État d'utilisation	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)	Propriétés
TA6V	Al : 5,5 à 6,75 V : 3,5 à 4,5	recuit	880	780	8	bonnes propriétés mécaniques

R_m(MPa) : la résistance minimale à la traction,

R_{p0,2}(MPa) : la limite d'élasticité,

A(%) : l'allongement à la rupture,

Nota : rappelons que la structure alpha est du type hexagonal compact et donne au matériau ses propriétés de résistance. La phase bêta, du type cubique centré, est beaucoup plus ductile.

3-2-4-2 Préparation des échantillons :

Les échantillons ont été réalisés à partir d'une plaque d'alliage TA6V d'épaisseur 2mm, ils ont été découpés sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une guillotine électrique, et ont été usinés au centre de recherche (CSC) à l'aide d'une fraiseuse sous formes des rectangles (3cm*2,5cm).



Figure 3-5 échantillon non traité

Un polissage mécanique réalisé avec une vitesse 300 tours/min.

Les différents disques de polissage utilisés sont :

- Disques abrasifs de granulométrie 600, 800, 1000, 1200, avec lubrification à l'eau.
- Disque en feutre, lubrifiant alumine 5 μ m, afin d'obtenir un état de surface miroir.



Figure 3-6 échantillon à l'état miroir

Traitement thermique appliqués :

Nos échantillons ont subi un traitement de recuit, qui consiste généralement en un maintien à température élevée, suivi d'un refroidissement relativement lent à l'air, de manière à obtenir une structure pratiquement stable.

Les traitements sont faits de la manière suivante :

- 2 échantillons à une température de 550°C pendant 2h et 4h ;
- 2 échantillons à une température de 750°C pendant 2h et 4h ;
- 2 échantillons à une température de 950°C pendant 2h et 4h ;



Figure3-7 le four utilisé



Figure3-8 échantillon traité à 750°C pour 4h de maintien

Après traitement thermique on a fait le polissage de finition pour nettoyer la surface.

Les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler la morphologie des différentes phases présentes ainsi que les joints de grains.

Le réactif d'attaque chimique le plus commun pour le titane est le réactif de Kroll:

- ♣ 100 ml d'eau
- ♣ 1-3 ml d'acide hydrofluorique
- ♣ 2-6 ml d'acide nitrique

La concentration peut varier selon l'alliage et peut être ajustée individuellement. Cela colore la phase (en marron foncé.).

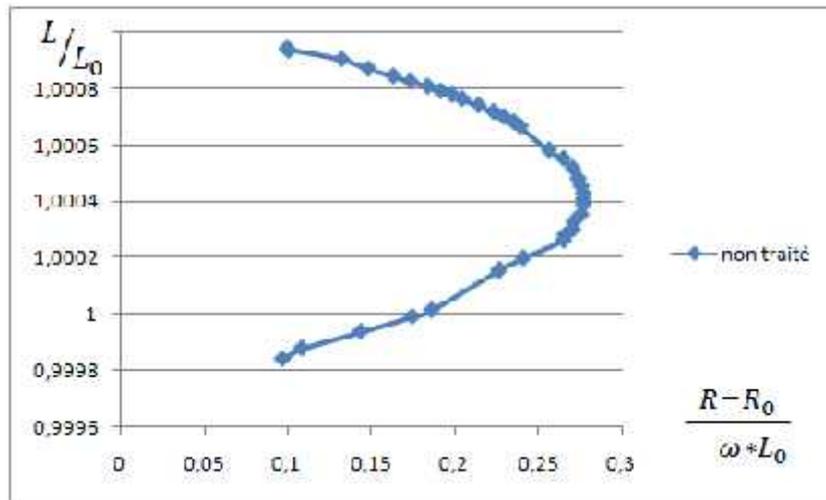
Le temps d'attaque étant d'environ 40 secondes.

4-11'alliage de titane TA6V :

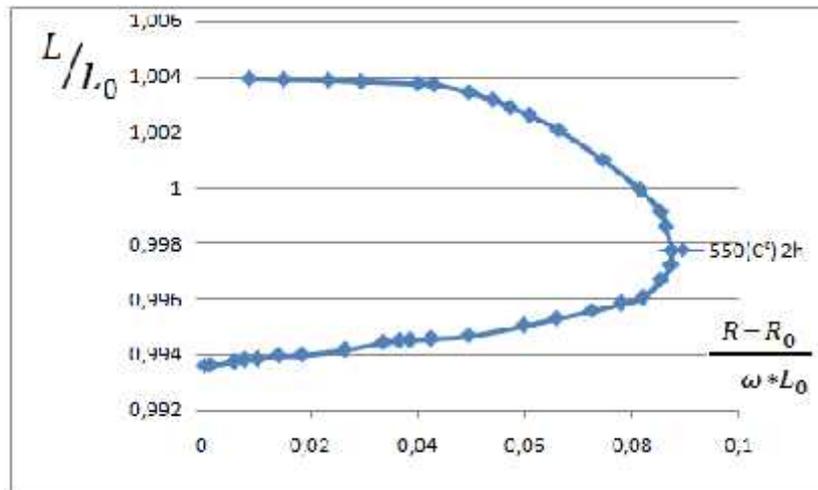
4-1-1 Les courants de Foucault :

4-1-2 les diagrammes d'impédances normalisé pour les différents échantillons :

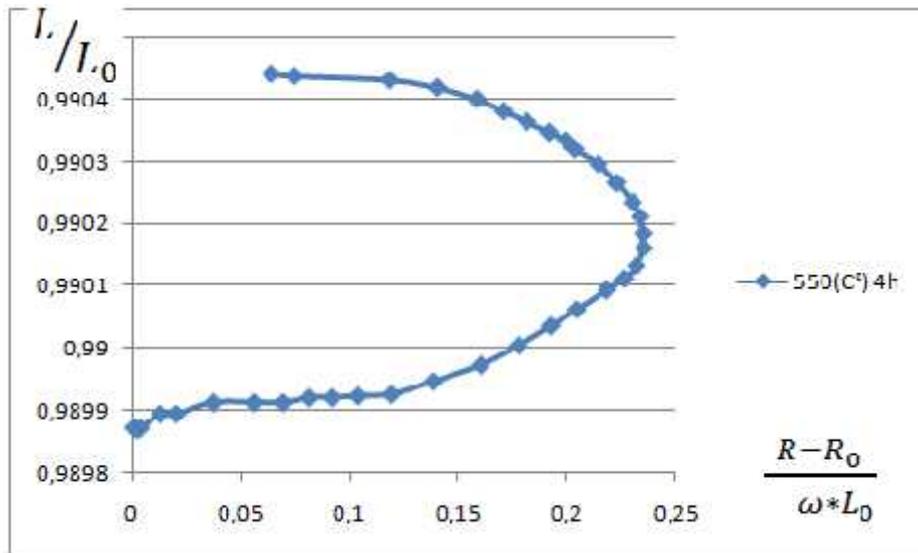
en fait varier la gamme de fréquence entre 100Hz et 300000Hz



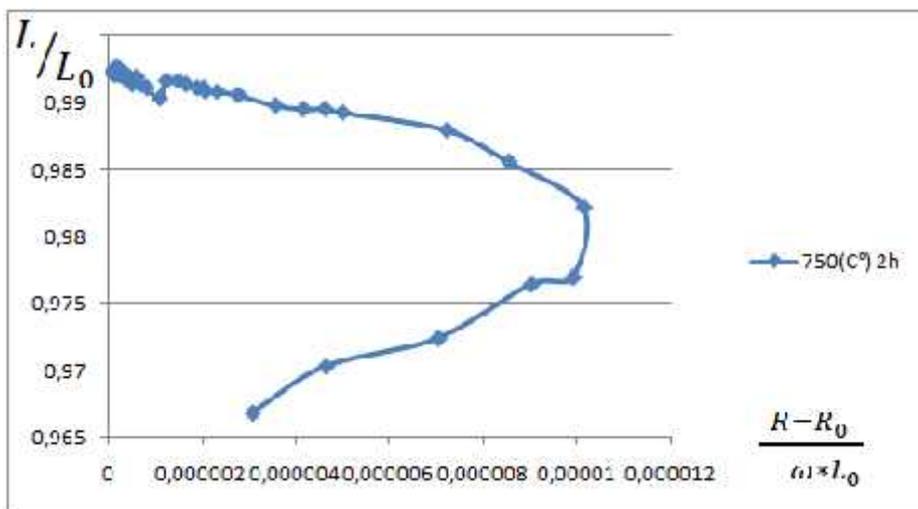
figue4-1-1diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V non traité



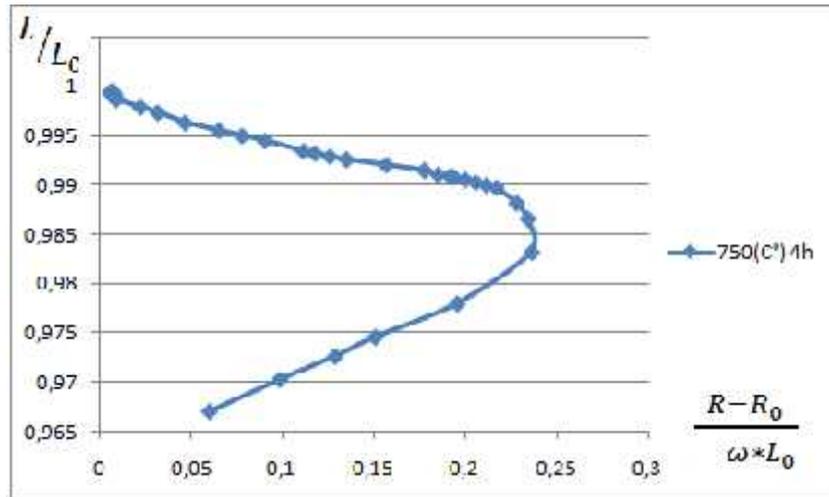
figue4-1-2diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 550(c°) 2h



figue4-1-3diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 550(c°) 4h



figue4-1-4diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 750(c°) 2h



figue4-1-5diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 750(c°) 4h

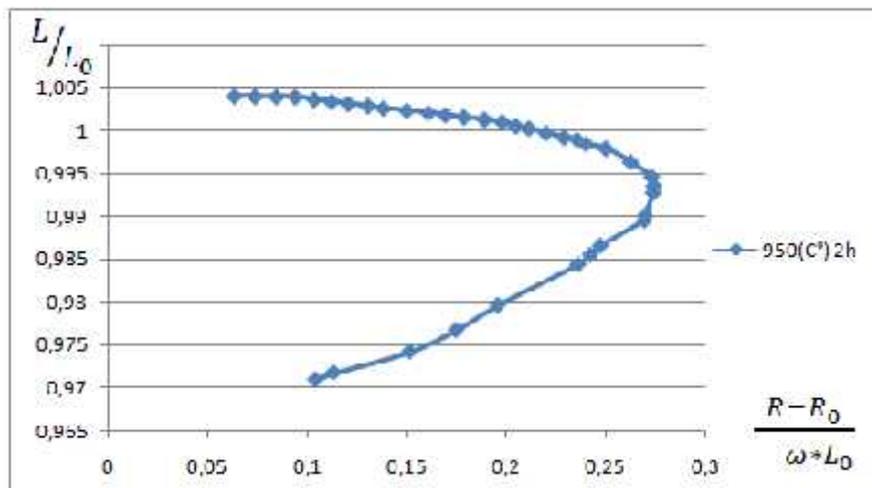


Figure 4-1-6diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 950(c°) 2h

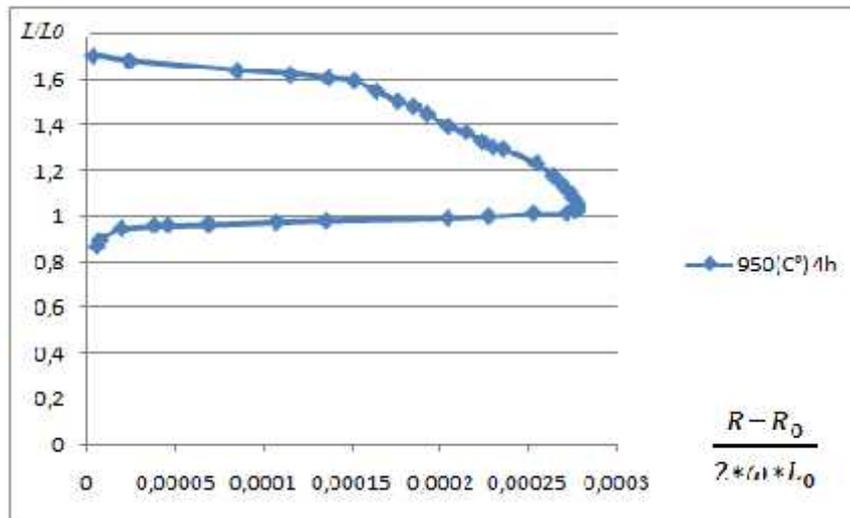


Figure 4-1-6 diagramme d'impédance normalisé pour l'échantillon TA6V à 950(c°) 4h

Nous remarquons que les différents diagrammes d'impédance (figure 4-1-1 jusqu'à la figure 4-1-6) que leurs trajectoires sont bien alignées et que très peu de fluctuation sont à noter et cela quelque soit la fréquence.

Cela montre que le matériau n'a pas subi de grande variation microstructurale et que une homogénéité est à considérer.

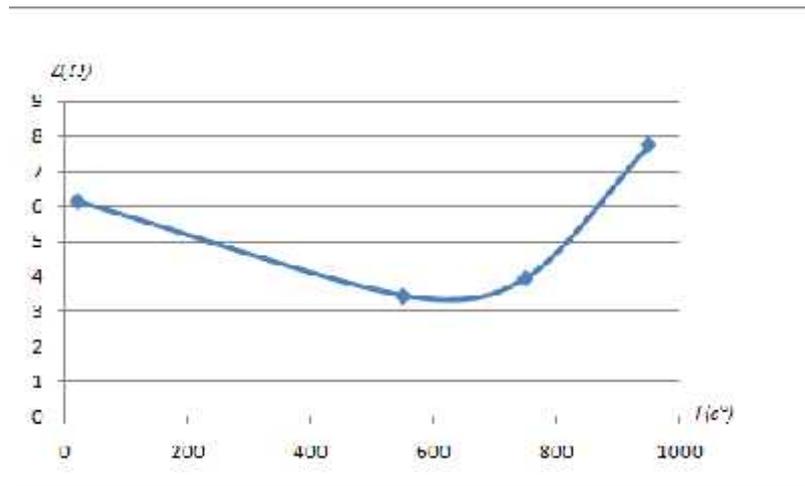


Figure 4-1-7 variation de l'impédance en fonction de la température de chauffage

(Pour les fréquences : Non traité : 4500(Hz) ; à 550(C°) : 1500(Hz)

à 750(C°) : 30000(Hz) ; à 950(C°) : 7000(Hz))

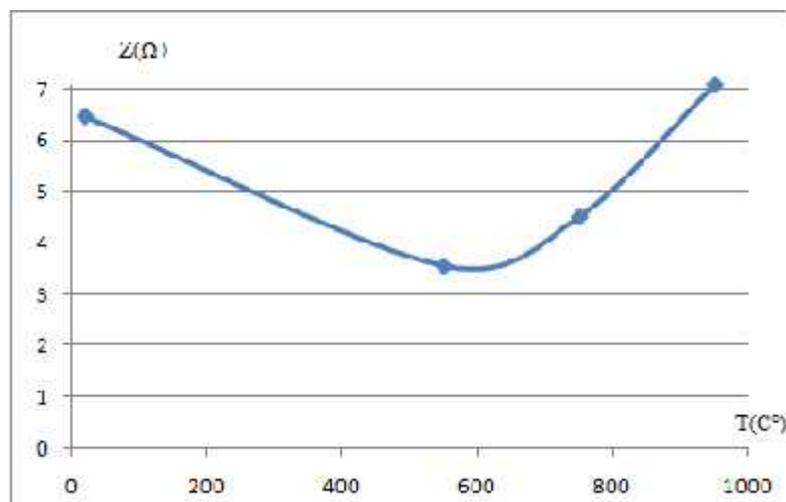


Figure 4-1-8 variation de l'impédance en fonction de la température de chauffage

(Pour les fréquences : Non traité : 5000(Hz) ; à 550(C°) : 2000(Hz)

à 750(C°) : 50000(Hz) ; à 950(C°) : 6000(Hz))

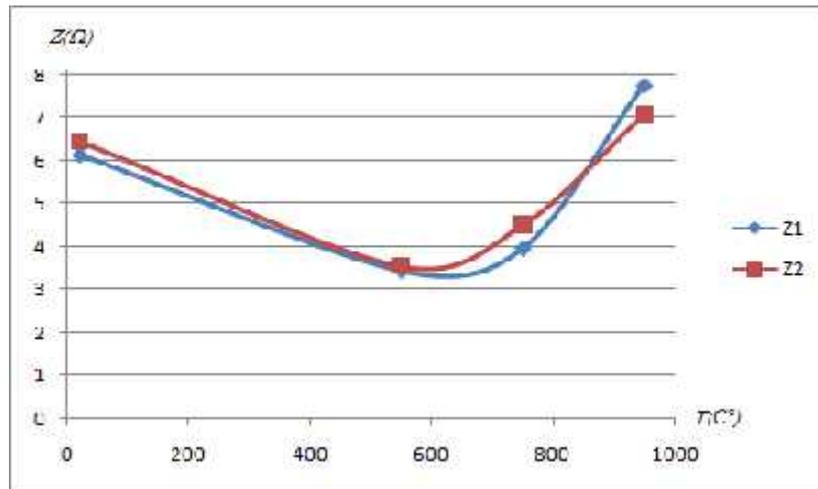


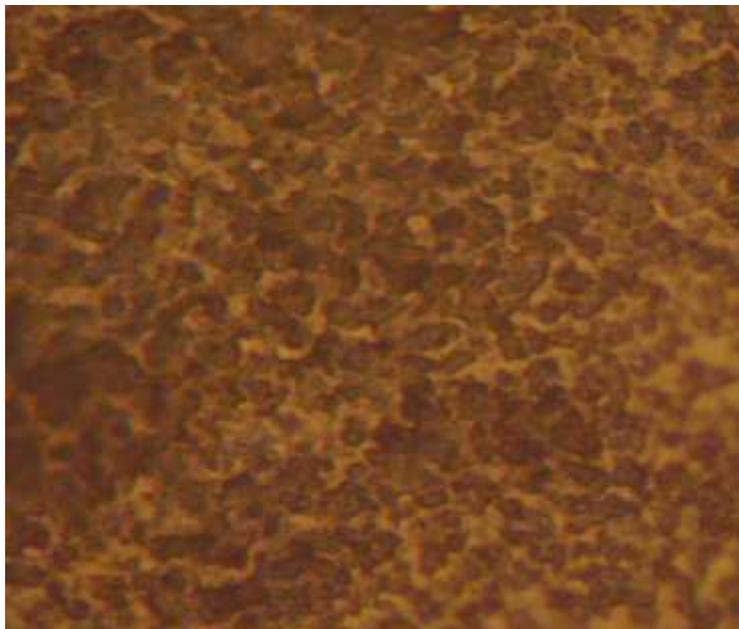
Figure 4-1-9 variation de l'impédance en fonction de la température de chauffage

(Comparaison entre deux valeurs d'impédance à deux fréquences différentes pour chaque échantillon)

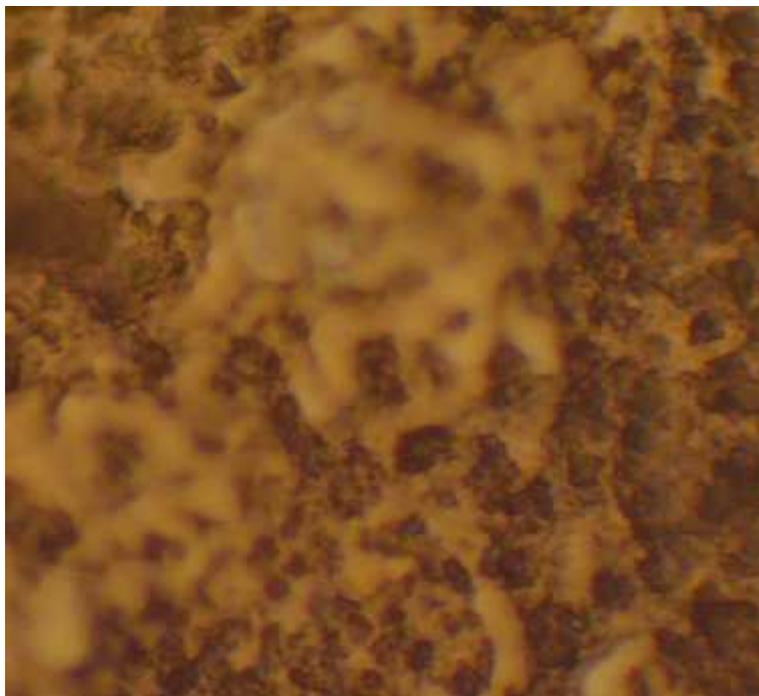
Les figures 4.1.7 et 4.1.8 montre le comportement de l'impédance à des fréquences bien déterminées qui correspondent a un échange d'énergie maximale. Nous remarquons que cet échange est obtenu pour des températures entre 700-800°C. Une remarque est à considérer et qui consiste dans le décalage de la fréquence optimale en fonction du traitement thermique. Une analyse de la figure 4-1-9 montre que pour les temps de maintien le matériau s'est comporté de la même manière.

4-2-1 Observation micrographique :

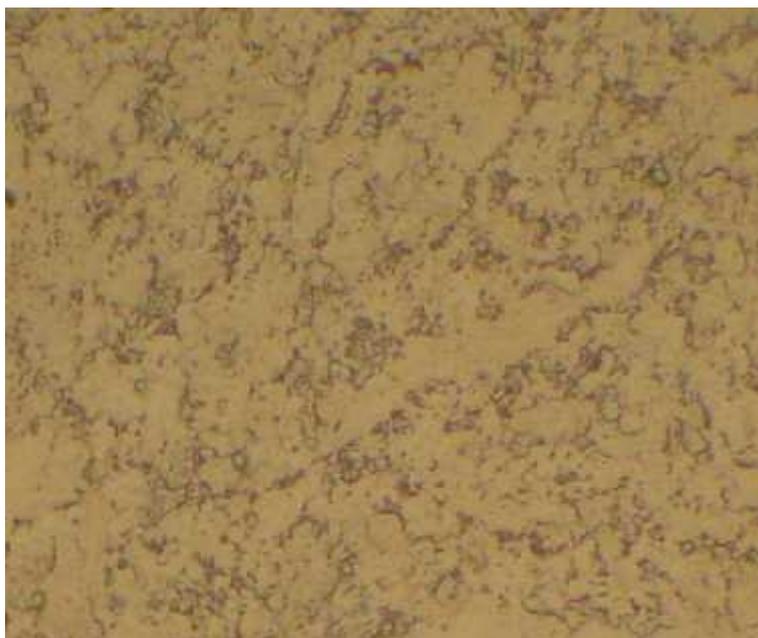
l'observation microscopique nous a permit d'avoir ses figures :



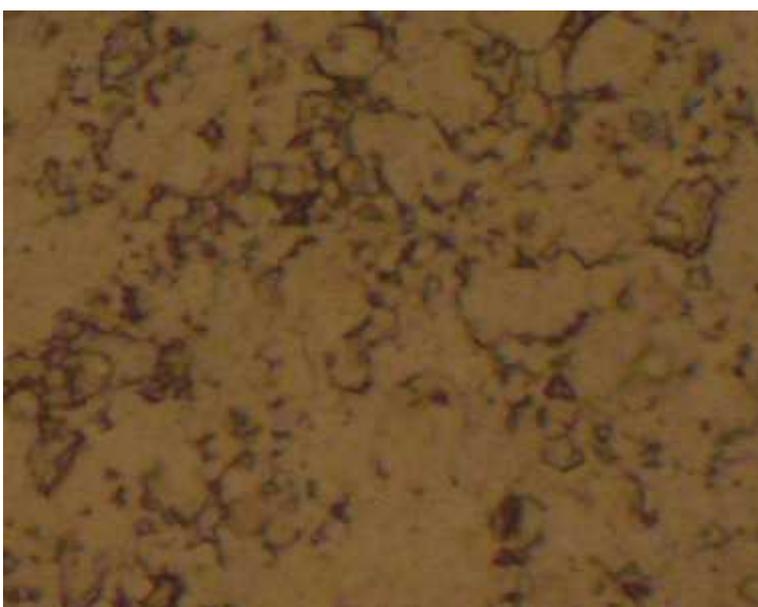
*figure4-2-1 Micrographie deTA6V non traité *500*



*figure4-2-2Micrographie deTA6V non traité *1000*



*figure4-2-3Micrographie deTA6V à 550c⁰ (2h) *500*



*figure4-2-4Micrographie deTA6V à 550c⁰ (2h) *1000*



figure4-2-5 Micrographie de TA6V à 550c⁰ (4h) *500



figure4-2-6 Micrographie de TA6V à 550c⁰ (4h) *1000



figure4-2-7 Micrographie deTA6V à 750c⁰ (2h) *500



figure4-2-8 Micrographie deTA6V à 750c⁰ (2h) *1000



figure4-2-9 Micrographie de TA6V à 750c⁰ (4h) *500

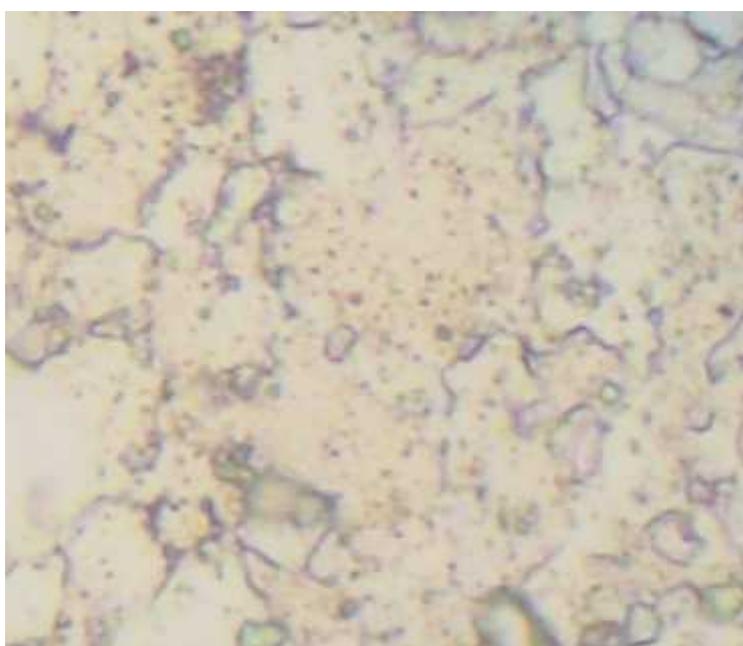


figure4-2-10 Micrographie de TA6V à 750c⁰ (4h) *1000

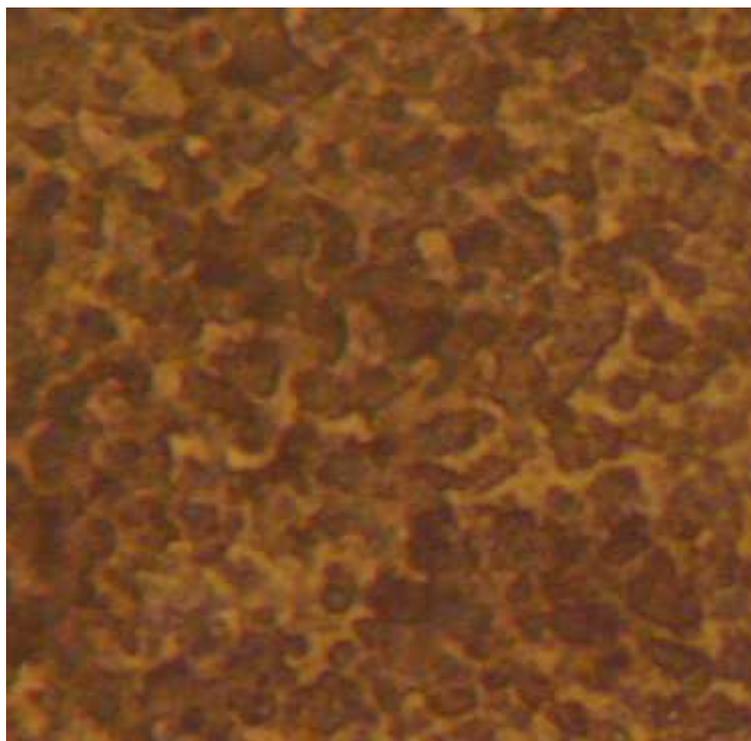


figure4-2-11 Micrographie de TA6V à 950c⁰ (2h) *500

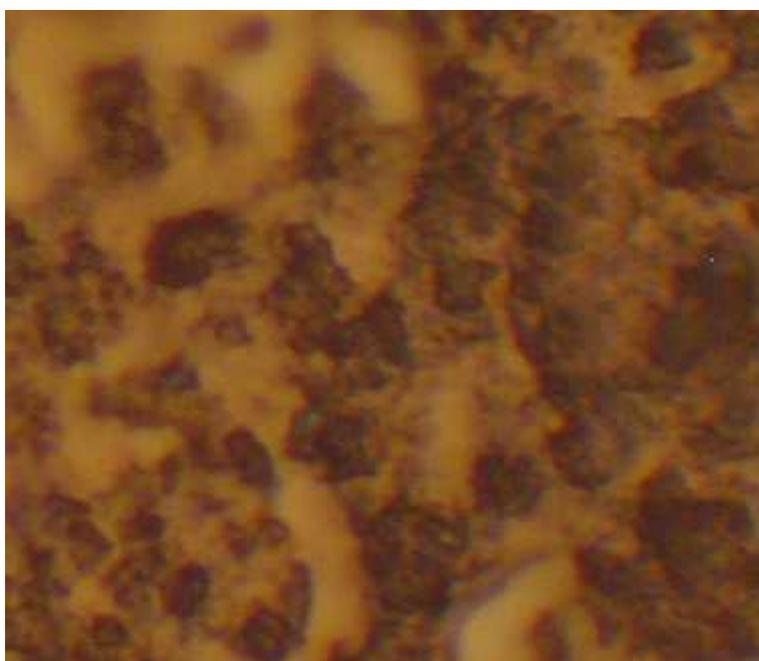


figure4-2-12 Micrographie de TA6V à 950c⁰ (2h) *1000

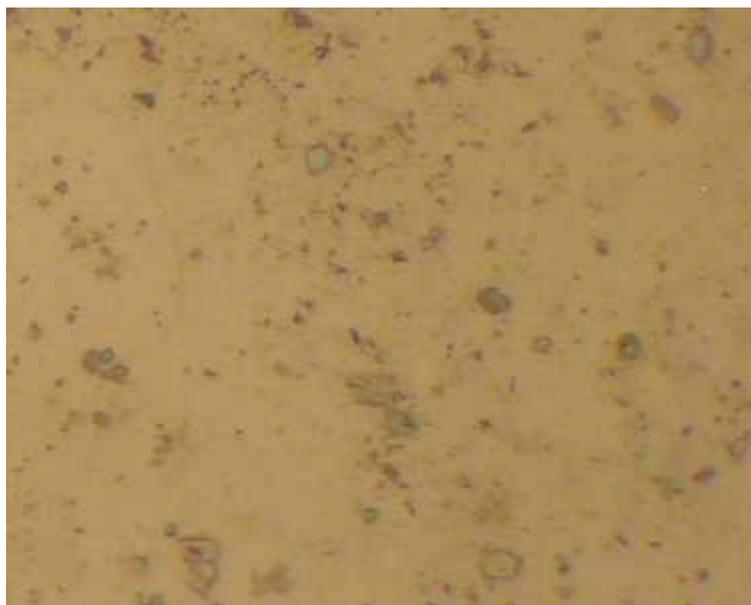


figure4-2-13 Micrographie de TA6V à 950c⁰ (4h) *500

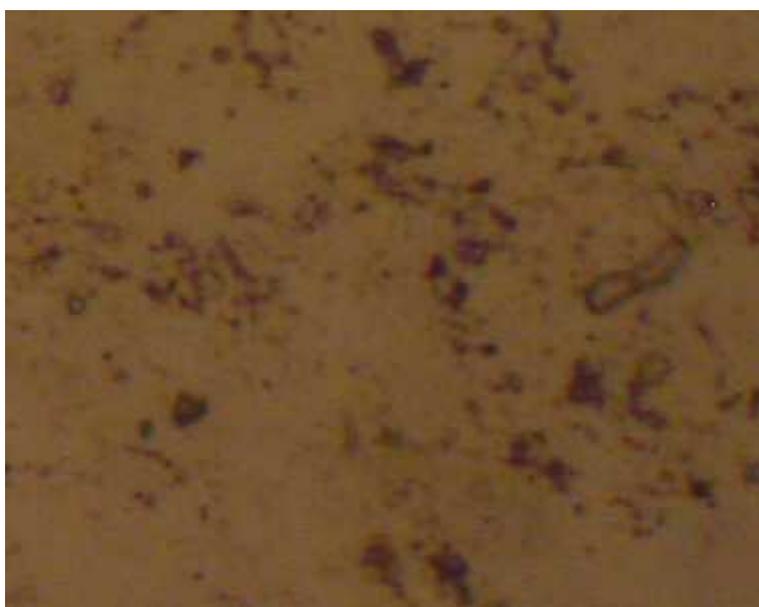


figure4-2-14 Micrographie de TA6V à 950c⁰ (4h) *1000

D'après les figures précédentes, on observe deux phases, la première phase est claire (phase alpha) et la deuxième phase est foncée (phase beta).

On remarque une diminution de phase beta et une augmentation de phase alpha il est dû à la décomposition de la phase beta en structure lamellaire alpha+beta transformée suite à un refroidissement lent.

Il a été prouvé que les alliages à base de TiAl de structure lamellaire présentent les meilleurs compromis entre propriété mécanique à chaud et à froid, donc leur ductilité est très faible à température ambiante.

La phase β est souvent admise qu'elle est plus dure que la phase α , Pour les températures 550°C, 750°C, 950°C, notre alliage contient les phases α et β mais le pourcentage est différent, $\%_{550^\circ} > \%_{750^\circ} > \%_{950^\circ}$ Par contre $\%_{550^\circ} < \%_{750^\circ} < \%_{950^\circ}$. Pour cela la dureté à 550°C est plus grande que 750°C et 950°C.

4-3-1 Résultats de la microdureté :

Échenillant (condition)	Dimension d'empreinte (μm)	microdureté Vickers (Hv)
Non traité	300.3	323
A 550°C pour 2h	310.8	293
A 550°C pour 4h	320.2	286
A 750°C pour 2h	320.5	281
A 750°C pour 4h	320.6	279
A 950°C pour 2h	330.4	266
A 950°C pour 4h	330.9	258

Tableau 4-3-1 Résultats de la microdureté

Le temps de maintien (durée de chauffage) a une influence sur la taille des grains, plus il est grand, plus la taille des grains est grande, d'où la dureté de l'alliage diminue.

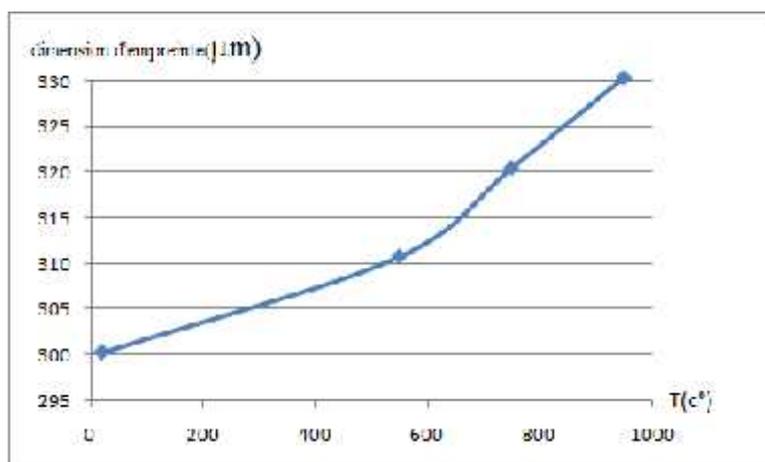


figure4-3-1 effet de la température sur la dimension d'empreinte

Pour les traitements thermiques à 2heurs

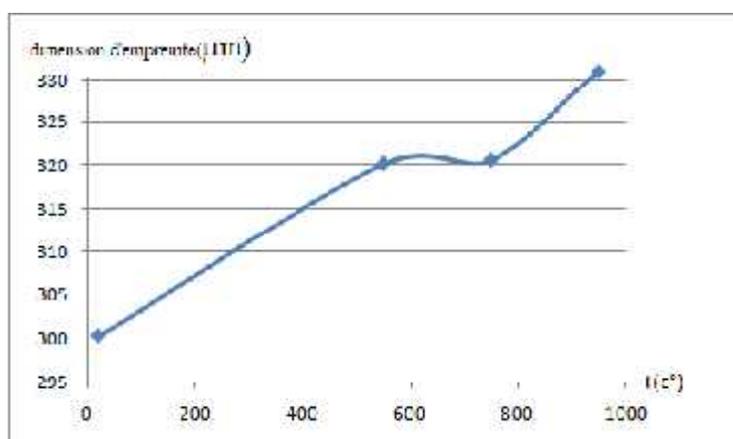


figure4-3-2 effet de la température sur la dimension d'empreinte

Pour les traitements thermiques à 4heurs

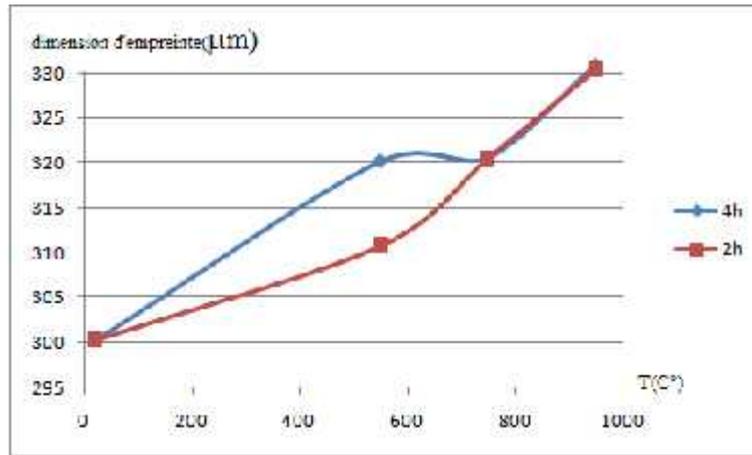


figure4-3-3 comparaison entre la dimension d’empreinte pour les échantillons traités thermiquement à 2h et à 4h

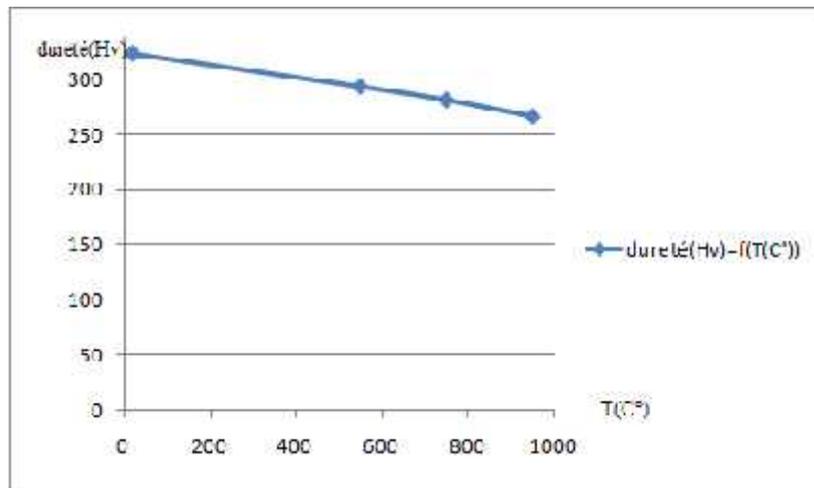


figure4-3-4 effet de température sur la dureté

Pour les traitements thermiques à 2heurs

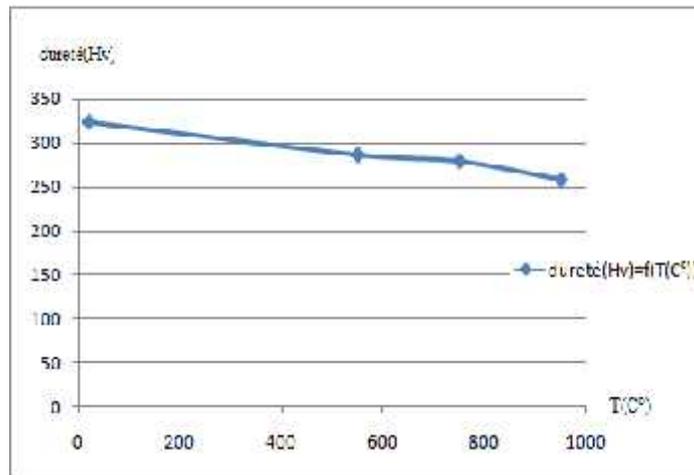


figure4-3-5 effet de température sur la dureté

Pour les traitements thermiques à 4heurs

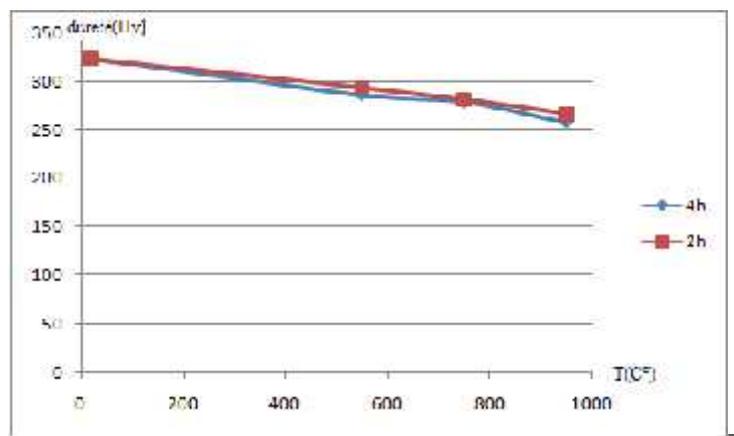


figure4-3-6 comparaison de la dureté pour les échantillons traités à 2h et à 4h

Le titane et ses alliages possèdent deux phases allotropiques : la phase de structure cristallographique hexagonale compacte est stable à basse température, alors que la phase cubique centrée est stable à haute température. La température de transus entre ces deux phases dépend fortement des éléments d'alliage. Elle est de 995 °C pour le Ti-6Al-4V.

Notre alliage est biphasé à la température ambiante. Cela est rendu possible par l'addition d'éléments d'alliage beta gènes qui stabilisent la phase à basse température.

Dans le Ti-6Al-4V, c'est le vanadium qui joue ce rôle. L'aluminium et les interstitiels (oxygène, azote et carbone) sont quant à eux alpha gènes et stabilisent la phase ce qui a pour effet d'augmenter la température du transus.

A température ambiante, les alliages Ti-6Al-4V sont donc globalement biphasés β/α , La phase α étant majoritaire et la phase β minoritaire. Mais d'autres phases peuvent aussi être présentes en plus petites quantités. Les principales sont :

- deux martensites généralement de forme aciculaire qui peuvent se former à partir de la Phase β : une phase β' de structure hexagonale compacte et une phase β'' de structure Orthorhombique,

- une phase β de structure hexagonale qui précipite dans les grains α sous forme de Précipités de taille nanométrique. Cette phase a un effet durcissant important. Elle est dite athermique si elle est obtenue après une trempe depuis le domaine β ou isotherme si elle est obtenue lors d'un revenu,

- une phase β_2 (Ti₃Al) ordonnée qui peut précipiter dans la phase α lors de revenus.

Il a été prouvé que les alliages à base de TiAl de structure lamellaire présentent les meilleurs compromis entre propriété mécanique à chaud et à froid, donc leur ductilité est très faible à température ambiante.

La phase β est souvent admets qu'elle est plus dure que la phase α , Pour les températures 550°C, 750°C, 950°C, notre alliage contient les phases β' et β'' mais le pourcentage est différent, % β' 550° > % β' 750° > % β' 950° > Par contre % β'' 550° < % β'' 750° < % β'' 950°.

Pour cela la dureté à 550° est plus grande que 750° et 950°.

Lors d'un traitement au dessus de T_c, les grains de phase β grossissent quand la durée augmente, et ce d'autant plus que la température est élevée, donc la dureté diminue.

Conclusion générale

La complexité grandissante des processus industriels et des pièces fabriquées, les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces conduisent à mettre en place des contrôles de qualité de plus en plus poussés. L'utilisation des courants de Foucault (CF) permet un contrôle non destructif (CND) fiable, rapide et peu coûteux.

Sa simplicité, sa robustesse d'utilisation, et son caractère électromagnétique « sans contact » en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'influence du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. A cet effet, des échantillons traités thermiquement.

Des techniques d'investigation telles que :

Les courants de Foucault, l'analyse micrographique, les profils de micro dureté ; ont été utilisées pour suivre l'évolution de la microstructure et le changement des caractéristiques mécaniques.

Les conclusions générales que nous pouvons tirer de ce travail de recherche peuvent se résumer comme suit :

Les résultats des CF et après les comparées avec l'échantillon non traité ont montré que notre matériau a subi de légères modifications microstructurales suite au traitement thermique, par contre les profils de microdureté ont présenté une baisse de microdureté relative au temps et à la température de maintien, c'est due à une baisse de la fraction volumique de phase à l'approche de la température du transus .

L'interprétation de nos résultats est très délicate car les paramètres opératoires définissent le comportement de l'alliage de titane, au cours des traitements thermiques il existe des légères modifications dans le domaine de température 550°C-950°C.

Cette conclusion est importante dans le sens où les méthodes de CND pourraient à l'avenir remplacer les méthodes destructives qui demandent des moyens matériels très élevés, en plus de l'arrêt de l'installation.

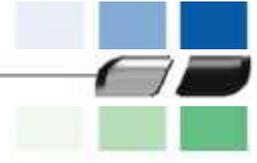
Perspectives futures :

Comme perspectives, nous suggérons à l'avenir de :

- Analyser les échantillons par d'autres méthodes non destructives.
- Analyser d'autres nuances.
- Appliquer d'autres types de traitements thermiques pour optimiser cette recherche.



BIBLIOGRAPHIE



Techniques de l'Ingénieur : «Propriétés du titane et de ses alliages» Yves

COMBRES.[1]



Techniques de l'Ingénieur : «traitement thermique des alliages de titane» Yves

COMBRES et Bernard CHAMPIN.[2]



Christoph Leynes and Manfred Peters : «titanium and titanium alloys Fundamentals and Applications».[3]



rédéric PRIMA (THESE) Thème: «Etude métallurgique d'un nouvel alliage de titane -métastable». [4]



Techniques de l'Ingénieur : «contrôle non destructif(CND)» Jacques DUMONT-

FILLON. [5]



[G.PEIX], [1988] INSA de Lyon : «principes physiques du contrôle par courant de Foucault». [6]



KHEBBAB Mohamed (Mémoire) : «Etude et Modélisation de Capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif». [7]



Bernard Chalmond (CMLA1999) « Diagnostic et évaluation des systèmes de production : Contrôle Non-Destructif». [8]



OULBANI SAID (mémoire) «Influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier inoxydable austénitique

[316L]». [9]



X. Maldague «Introduction to NDT by Active Infrared Thermography». [10]



Techniques de l'Ingénieur : «Thermographie Principes et mesure» **Dominique pajani.**

[11]



Marc Blétry (2006-2007) : «Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux».

[12]

CHAPITRE

I

Propriétés de titane et ses alliages

1



CHAPITRE

II

Généralités sur le CND

2



CHAPITRE

III

Approche physique et expérimentale

3



CHAPITRE

IV

Résultats et interprétations

4

