

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
MASTER EN AERONAUTIQUE.

OPTION: STRUCTURE

THEME

**DETERMINATION DES COMPORTEMENT D'ALUMINIUM, TITANE ET
DUPLEX DANS MILIEUX AGRESSIVE
PAR DES METHODES DE CONTROL NON DESTRUCTIF**

FAIT PAR :

MERZOUGUI OUSSAMA

MESSAOUDI SADDAM HOCINE

DIRIGE PAR :

Mr.ZERGOUG MORAD

M^{elle}.ZIOUCHE AICHA

Dr.BENKHEDA AMINA

DECEMBRE 2013

ملخص

في هذا عمل سندرس ثلاثة أنواع من المعادن المستعملة في صناعة الطائرات و هي ألومنيوم 2024، تيتانيوم TA6V والفولاذ المقاوم للصدأ 2205 وخصائصها، هذه المواد خضعت لمعالجة حرارية في 950°م، 1150°م باستخدام طريقتين للتبريد، ثم تم وضعها في محلولين من HCL ذو تركيزين 3% و5%. تم استخراج الخصائص بواسطة الطرق التقليدية والطرق غير المدمرة و تحديد، التيارات فوكولت، حلقة التباطؤ بواسطة مقياس التذبذب المغناطيسي. هذا العمل يمكن من تحديد خصائص المعادن وتوقع مدة صلاحيتها .

RESUME

Dans ce travail nous allons étudier trois types de matériaux utilisé en aéronautique à savoir, l'aluminium 2024, le titane TA6V et l'acier duplexe 2205 et leurs comportements, ces matériaux traités thermiquement à 950°C, 1150°C avec deux types de refroidissement et émergé dans deux solutions de HCL avec deux concentrations 3% et 5%. Leurs caractérisations se feraient par les méthodes classiques et par les méthodes de Contrôle non Destructives, et précisément les courants de foucault, le cycle d'hystérésis par le VSM (vibrating sample magnetometer) .Une synthèse de ce travail permettrait de déterminer le comportement des matériaux et de prévoir leurs durées de vie.

ABSTRACT

In this work we will study three types of materials used in aeronautics they are: aluminum 2024, titanium TA6V and stainless steel duplex 2205 and their behaviors, these materials treated thermally with 950°C, 1150°C with two type of cooling and emerged in two solution of HCl with two concentrations 3% and 5%. Their characterizations would be done by the traditional methods and the methods of Non destructive testing, and precisely the currents of Foucault, the hysteresis loop by the VSM (vibrating sample magnetometer). A synthesis of this work would make it possible to determine the behavior of materials and to envisage their lifespans.

Remerciements

Avant tout, louange à "Allah", notre créateur et maître de l'univers, de toutes ses beautés, qui nous a envoyé le prophète "Mohamed saws" qui est notre premier éducateur, puis de nous avoir donné tout le courage pour terminer ce travail.

Un très grand merci à:

- ✈ Notre promoteurs **Mr. Zergoug Morad** et **M^{elle}. zioueche Aicha**, pour nous avoir encadrés et orientés tout au long de ce travail.
- ✈ **Dr. Benkheda Amina** pour les encouragements et les conseils judicieux.
- ✈ Nos parents qui nous ont pleinement encouragé par leurs soutien morale et physique et sacrifier leurs vie pour notre réussite
- ✈ Nous remercions chaleureusement nos familles respectives pour toute l'aide, qu'elles nous ont apportées tout au long de nos études.
- ✈ Nous adressons nos remerciements chaleureuses à tous les professeurs qui nous ont enseignés au cours des études primaires jusqu'aux années du cursus universitaire pour l'obtention du diplôme de Master.
- ✈ Tous les ingénieurs et les techniciens du centre de soudage et contrôle de Cheraga (CSC) pour toute l'aide dans les différent division dont nous avons travaillés.
- ✈ Et bien sûr, merci à tous nos amis avec qui nous avons gardé des souvenirs très agréables et des bons moments vécus ensemble.
- ✈ En fin, no vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.
- ✈ Et pour finir, un dernier remerciement à toute la promotion 2012-2013 de l'institut d'aéronautique, tout en leurs souhaitons un avenir plein de réussite.

Saddam et Oussama

ABREVIATION ET NOMENCLATURE

Al : Aluminium

Ti : Titan

Dup : Duplex

HV : dureté Vickers

T : température

CND : Contrôle non destructif

CF : Courant de Foucault

Tr : refroidissement Trempé

Air : refroidissement à air

DI : Diagramme d'Impédance

H : l'intensité du champ magnétique

B : Champ d'induction magnétique

EA : Emission Acoustique

UV : Ultraviolet

σ : conductivité électrique

μ : une perméabilité magnétique

δ : la profondeur de pénétration

VSM : vibrating sample magnetometer

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	
DEDICACE	
RESUME	
ABREVIATION ET NOMENCLATURE	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURE	
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISE DANS LE DOMAINE AERONAUTIQUE ET INDUSTRIEL	
I.1. ALLIAGES D'ALUMINIUM :	5
I.1.1.GENERALITES SUR L'ALUMINIUM:.....	5
I.1.2.LES PRINCIPALES FAMILLES D'ALLIAGES :	6
I.1.3.CONSTITUTION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :.....	6
I.1.3.1.ELEMENT D'ALLIAGES :.....	6
I.1.3.2.ELEMENT D'ADDITION :.....	6
I.1.3.3.LES IMPURETES :.....	7
I.1.4.PROPRIETES :.....	7
I.1.5. DIAGRAMME D'EQUILIBRE :.....	7
I.1.6.APPLICATION :.....	8
I.2. ALLIAGES DE TITANE :.....	8
I.2.1.GENERALITE SUR LE TITANE :	8
I.2.2.CARACTERISTIQUE MECANIQUE DU TITANE :.....	9
I.2.3.LES ELEMENTS D'ADDITION :.....	9
I.2.4.LES PRINCIPALES FAMILLES D'ALLIAGES :	10
I.2.5.DIAGRAMME D'EQUILIBRE :	12
I.3. ALLIAGES DE L'ACIER INOXYDABLE :	13

I.3.1.GENERALITE SUR LES ACIERS INOXYDABLES :	13
I.3.2.LES ELEMENTS D'ADDITION :	13
I.3.3.LES PRINCIPALES FAMILLES D'ALLIAGES :	13
I.3.4.DIAGRAMME D'EQUILIBRE :	19

CHAPITRE II : CORROSION ET CONTROLE DESTRUCTIF

II.1.LA CORROSION :	21
II.1.1. DEFINITION :	21
II.1.2. PRINCIPALES FORMES DE CORROSION :	21
II.1.2.1.CORROSION GENERALISEE OU UNIFORME :	21
II.1.2.2 .CORROSION LOCALISEE :	22
II.1.3.TYPES DE CORROSION RENCONTREE SUR LE TITANE ET LES ACIERS INOXYDABLES ET LES ALLIAGES D'ALUMINIUM :	25
II.1.3.1. LES ACIERS INOXYDABLES :	25
II.1.3.2. LES ALLIAGES DE TITANE :	26
II.1.3.3. LES ALLIAGES D'ALUMINIUM :	26
II.1.4.LES PRINCIPAUX MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE :	26
II.2.TRAITEMENTS THERMIQUES :	27
II.2.1.DEFINITIONS ET PROCEDES DES TRAITEMENTS THERMIQUES :	28
II.2.2.CHAUFFAGE DES PIECES :	28
II.2.3.CONDITIONS DE CHAUFFAGE DES PIECES EN TRAITEMENTS THERMIQUES :	29
II.2.4.TYPES DE FOURS ET LEURS ATMOSPHERES :	30
II.2.5.REFROIDISSEMENT DES PIECES :	31
II.3.LE CONTROLE DESTRUCTIF :	32
II.3.1.MICROSCOPIE OPTIQUE :	32
II.3.2.LA MICRODURETE :	33
II.3.3.PREPARATION DES ECHANTILLONS :	34

CHAPITRE III : CONTROLE NON DESTRUCTIF

III.1.PRINCIPALES METHODES DE CONTROLES NON DESTRUCTIFS :	37
---	----

III.1.1. LES METHODES DE SURFACES :.....	39
III.1.1.1. LE CONTROLE VISUEL :.....	39
III.1.1.2. LE RESSUAGE :.....	39
III.1.1.3.LA MAGNETOSCOPIE :.....	40
III.1.1.4. LES COURANTS DE FOUCAULT :.....	43
III.1.2. LES METHODES VOLUMIQUES :.....	48
III.1.2.1.RADIOGRAPHIE :	46
III.1.2.2. LES ULTRASONS :	48
III.1.2.3.LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE :	50
III.1.2.4.EMISSION ACOUSTIQUE :	51
III.2. EVALUATION NON DESTRUCTIVES :	53
III.2.1.BRUIT DE BARKHAUSEN :	53
III.2.2.CYCLE D'HYSTERESIS :	55
III.2.3.VSM (VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER):	56

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRITATIONS

IV.1.PROCEDURE EXPERIMENTALE :.....	59
IV.2.RESULTATS ET INTERPRETATIONS :.....	61
IV.2.1.RESULTATS DE LA MICRODURETE :	61
IV.2.2.RESULTATS DE LA MICROSCOPIE OPTIQUE (LA MICROSTRUCTURE) :.....	61
IV.2.3. RESULTATS D'ETUDES PAR COURANTS DE FOUCAULT :.....	72
IV.2.4. RESULTATS DE CYCLE D'HYSTERESIS PAR LE VSM :.....	81
CONCLUSION:.....	89

ANNEXE

REFERENCE

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

TABLEAU I-1 : CARACTERISTIQUE MECANIQUE DU TITANE	9
TABLEAU I-2 : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ACIER FERRITIQUE	14
TABLEAU I-3 : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ACIER MARTENSITIQUE.....	15
TABLEAU I-4 : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ACIER AUSTENITIQUE.....	16
TABLEAU I-5 : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ACIER DUPLEX.....	18

CHAPITRE III

TABLEAU III-1 : CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET PERMEABILITE MAGNETIQUE THEORIQUES DE MATERIAUX A CONTROLER DANS L'INDUSTRIE.	44
--	----

CHAPITRE VI

TABLEAU IV-1: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM, DE TITANE ET DE L'ACIER INOXYDABLE.	61
TABLEAU IV-2: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES DE TITANE ET DE L'ACIER INOXYDABLE TRAITE A 950°C.....	61
TABLEAU IV-3: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES DE TITAN TRAITE A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A EAU	62
TABLEAU IV-4: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES DE TITAN TRAITE A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR	62
TABLEAU IV-5: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES DE L'ACIER INOXYDABLE TRAITE A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A EAU.....	62
TABLEAU IV-6: RESULTATS DE LA MICRODURETE DES ALLIAGES DE L'ACIER INOXYDABLE TRAITE A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR	63

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

FIGURE I-1: DIAGRAMME DE PHASE DE L'ALLIAGE BINAIRE AL-CU A L'EQUILIBRE	7
FIGURE I-3: PIECES EN ALLIAGE DE TITAN 25%(MOTEUR CFM -56)	12
FIGURE I-2 : DIAGRAMME PSEUDO-BINAIRE, CLASSIFICATION DES ALLIAGES DE TITANE SELON LEUR COMPOSITION CHIMIQUE [C]	12
FIGURE I-4 : COUPE DU DIAGRAMME TERNAIRE FE-CR-NI POUR 68% DE FER.DE PETITES VARIATION DE LA TENEUR EN NICKEL ET EN CHROME ONT UNE INCIDENCE IMPORTANTE SUR LES QUANTITES D'AUSTENITE ET DE FERRITE DANS ACIERS DUPLEX.....	19
FIGURE I-5 : PIECES EN ACIER POUR L'AERONAUTIQUE.....	20

CHAPITRE II

FIGURE II-1: CORROSION GENERALISEE	21
FIGURE II-2 : CORROSION PAR PIQUES.....	22
FIGURE II-3 : CORROSION INTERGRANULAIRE.....	22
FIGURE II-4 : CORROSION CAVERNEUSE.....	23
FIGURE II-5: CORROSION GALVANISEE	23
FIGURE II-6 : SCHEMA DU PROCESSUS DE CORROSION GALVANIQUE	24
FIGURE II-8 : SCHEMA D'UN SYSTEME DE PROTECTION UTILISE DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE.....	27
FIGURE II-9 : LE PROCEDE DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	28
FIGURE II-10 : FOUR DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	31
FIGURE II-11 : MICROSCOPE OPTIQUE ZEISS AXIOPLAN.....	32
FIGURE II-12 : PRINCIPE DE DURETE DE VICKER.....	33
FIGURE II-13 : DURETEMETRE	34
FIGURE II-14 : POLISSEUSE	36

CHAPITRE III

FIGURE III-1 : METHODE DE RESSUAGE	40
FIGURE III-2 : SCHEMA DE PRINCIPE DU CONTROLE PAR MAGNETOSCOPIE	41
FIGURE III-3 : LIGNES DE CHAMP MAGNETIQUE	41
FIGURE III-4 : DETECTION DES DEFAUTS PAR PASSAGE DEFAUT MAGNETIQUE	42
FIGURE III-5 : DETECTION DES DEFAUTS PAR PASSAGE DE COURANT ELECTRIQUE.....	42
FIGURE III-6: REPRESENTATION DES VARIATIONS D'IMPEDANCE D'UNE BOBINE.....	45

FIGURE III-7 : DIAGRAMMES THEORIQUES DE L'IMPEDANCE NORMALISEE D'UNE BOBINE DE DIAMETRE D ENCERCLANT UNE BARRE METALLIQUE FERROMAGNETIQUE OU NON DE DIAMETRE D	46
FIGURE III-8 : SCHEMA DE PRINCIPE DU CONTROLE PAR RADIOGRAPHIE.	47
FIGURE III-9 : EMISSION D'UNE ONDE ELASTIQUE LONGITUDINALE	49
FIGURE III-11: LES DOMAINES DE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE	51
FIGURE III-11 : LA TECHNIQUE DE L'EMISSION ACOUSTIQUE.....	52
FIGURE III-12: EXPERIENCE DE BARKHAUSEN.....	54
FIGURE III-13: SCHEMA D'UN CYCLE D'HYSTERESIS.....	55
FIGURE III-15 : LE VSM	57

CHAPITRE VI

FIGURE IV-1 : MICROSTRUCTURE ALUMINIUM 2024 A L'ETAT PUR (AGRANDISSEMENT X500)	63
FIGURE IV-2 : MICROSTRUCTURE TA-6V A L'ETAT PUR (AGRANDISSEMENT X500).....	64
FIGURE IV-3: MICROSTRUCTURE ACIER DUPLEX 2205 A L'ETAT PUR.....	65
FIGURE IV-4: MICROSTRUCTURE TA-6V A SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (950°C) AVEC REFROIDISSEMENT A AIR, A: 2 HEURE ; B: 4 HEURE (AGRANDISSEMENT X500)	65
FIGURE IV-5: MICROSTRUCTURE TA-6V A SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (950°C) AVEC REFROIDISSEMENT A EAU, A: 2 HEURE ; B: 4 HEURE (AGRANDISSEMENT X500)	66
FIGURE IV-6: MICROSTRUCTURE TA6V SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (1150°C) AVEC REFROIDISSEMENT A AIR	67
FIGURE IV-7 :MICROSTRUCTURE TA6V SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (1150°C) AVEC REFROIDISSEMENT A EAU	68
FIGURE IV-8: MICROSTRUCTURE DUPLEX 2205 SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (950°C) AVEC REFROIDISSEMENT A AIR, A : 2 HEURE ;B :4 HEURE (AGRANDISSEMENT X500).....	69
FIGURE IV-9 : MICROSTRUCTURE DUPLEX 2205 SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (950°C) AVEC REFROIDISSEMENT A EAU, A : 2 HEURE ;B :4 HEURE (AGRANDISSEMENT X500)	69
FIGURE IV-10: MICROSTRUCTURE DUPLEX 2205 SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (1150°C) AVEC REFROIDISSEMENT A AIR	70
FIGURE IV-11: MICROSTRUCTURE DUPLEX 2205 SUBIT A UN TRAITEMENT THERMIQUE (1150°C) AVEC REFROIDISSEMENT A EAU	71
FIGURE IV-12: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE ALUMINIUM 2024 PUR ET EMERGE DAN HCL 3% ET 5%	72

FIGURE IV-13: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE TITANE TA6V TRAITE THERMIQUEMENT A 950°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR.....	73
FIGURE IV-14: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE TITANE TA6V TRAITE THERMIQUEMENT A 950°C AVEC REFROIDISSEMENT A EAU.....	74
FIGURE IV-15: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE TITANE TA6V TRAITE THERMIQUEMENT A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR.....	75
FIGURE IV-16: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE TITANE TA6V TRAITE THERMIQUEMENT A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR.....	75
FIGURE IV-17: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE TITANE TA6V PUR ET EMERGE DANS HCL 3% ET 5%	76
FIGURE IV-18: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE DUPLEX 2205 PUR ET EMERGE DANS HCL 3% ET 5%	76
FIGURE IV-19: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE DUPLEX TRAITE THERMIQUEMENT A 950°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR.....	77
FIGURE IV-20: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE DUPLEX TRAITE THERMIQUEMENT A 950°C AVEC REFROIDISSEMENT A EAU.....	78
FIGURE IV-21: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE DUPLEX 2205 TRAITE THERMIQUEMENT A 950°C AVEC REFROIDISSEMENT A AIR ET TROMPE AVEC TEMPS DE MAINTIEN 2H ET 4H	79
FIGURE IV-23: SUPERPOSITION DE DIAGRAMME D'IMPEDANCE DUPLEX 2205 TRAITE THERMIQUEMENT A 1150°C AVEC REFROIDISSEMENT A EAU	80
FIGURE IV-24: SUPERPOSITION DES CYCLES D'HYSTERESIS DUPLEX BRUTE ET APRES L'EMERSION DANS HCL 3%	81
FIGURE IV-25: SUPERPOSITION DES CYCLES D'HYSTERESIS DUPLEX BRUTE ET APRES LE TRAITEMENT THERMIQUE DANS 950°C PENDANT 4H AVEC L'EMERGEE DANS HCL 3% ET 5%.....	82
FIGURE IV-26: SUPERPOSITION DES CYCLES D'HYSTERESIS DUPLEX BRUTE ET APRES LE TRAITEMENT THERMIQUE DANS 950°C PENDANT 4H ET 2H AVEC L'EMERGEE DANS HCL 3% ET 5%	83
FIGURE IV-27: SUPERPOSITION DES CYCLES D'HYSTERESIS DUPLEX 1150 TREMPE CHAQUE 30 MN PENDANT 4 HEURS	84
FIGURE IV-28: SUPERPOSITION DES CYCLES D'HYSTERESIS DUPLEX BRUTE ET AVEC TRAITEMENT THERMIQUE 1150 °C REFROIDIE A AIR DE DEFERANT TEMPS DE MAINTIEN	85

INTRODUCTION

Le développement et la conception d'avions dont la teneur en matériaux composites dépasse les 50% apparaissent comme des enjeux majeurs pour les industriels de l'aéronautique, il n'est pas déraisonnable de continuer à faire progresser la connaissance sur les matériaux métalliques ne serait-ce que parce qu'ils sont présents en forte proportion sur les avions des flottes actuelles. Parmi ces matériaux, les alliages d'aluminium sont très couramment employés compte tenu de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur légèreté. Cependant ces alliages sont sensibles aux phénomènes de corrosion localisée dans les environnements dans lesquels ils évoluent.

Les alliages de titane sont largement utilisés dans l'industrie, à cause de deux propriétés importantes recherchées : une résistance à la corrosion et des propriétés mécaniques élevées. La bonne résistance à la corrosion est due au développement d'une couche protectrice de quelques centaines de nanomètres à la surface du titane et de ses alliages.

Il existe aussi les alliages de l'acier inoxydable. Tous ne conviennent pas aux applications de construction, en particulier lorsqu'on envisage le soudage. Les aciers inoxydables duplex sont en général les plus utilisés pour les applications de construction puisqu'ils possèdent une grande résistance, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes.

L'approche actuelle utilisée pour traiter les problèmes de corrosion qui apparaissent sur les avions en service est une approche « zéro défaut », c'est-à-dire qu'aucun défaut de corrosion n'est accepté dans la limite de détection des méthodes de contrôles non destructifs actuellement utilisées. Par conséquent, tout défaut de corrosion qui est détecté doit être réparé ou la pièce endommagée doit être remplacée.

Les enjeux de sûreté, les contrôles qualité et de santé des pièces deviennent un impératif incontournable.

Le contrôle non destructif (CND) a comme objectif de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle,

avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, . . .) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).

Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes familles : les défauts surfaciques et les défauts internes.

Ainsi, ce mémoire s'articule autour de Quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique concernant les alliages d'aluminium, de Titan et de l'acier inoxydable .Une revue de leurs caractéristiques et propriétés mécanique, ainsi les principales familles d'alliage de ces métaux. Ensuite quelque application de ces alliages dans les domaines aéronautique et industriel.
- Le deuxième chapitre met la lumière sur les différents types de corrosion et leurs effets sur les alliages qu'on a étudiés. Ensuite on parle sur la procédure de traitement thermique. Enfin dans cette partie on fait une description générale sur les essais destructifs pour avoir une idée sur la qualité des produits étudiés.
- Le troisième chapitre présente les différentes procédures de contrôle non destructif (CND).
- Le quatrième chapitre est consacré la présentation de partie expérimentale et l'interprétation des résultats des différentes investigations effectuées.

CHAPITRE

I

Matériaux utilisé
dans le domaine
aéronautique et
industriel

Dans ce premier chapitre nous présentons un état d'art sur les alliages d'Aluminium, Titane et de l'acier inoxydable. Nous présenterons les propriétés physicochimiques de ces alliages, ainsi leurs propriétés vis-à-vis la corrosion dans un milieu agressif avec quelques exemples sur les applications de ces alliages dans le domaine aéronautique et d'autres domaines industriels.

I.1. Alliages d'aluminium :

I.1.1. Généralités sur l'aluminium:

L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre.

Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville, qui a présenté les premiers lingots d'aluminium pur à l'Exposition universelle de Paris, en 1855, le décrit comme « un métal blanc, inaltérable comme l'argent... et qui présente la singulière propriété d'être plus léger que le verre ».

Les constructeurs apprécient l'aluminium pour sa légèreté, ses qualités mécaniques et son caractère écologique. La haute qualité de surface, une fois décapée ou anodisée, lui donne un atout supplémentaire.

L'aluminium se trouve à l'état naturel sous forme de minerai oxydé : la bauxite qui contient des oxydes d'aluminium, de fer, de silicium et de titane. Il est extrait de la bauxite par métallurgie en deux étapes :

- Extraction de l'alumine à partir de la bauxite par des procédés chimiques et thermiques.
- Electrolyse de l'alumine en solution.

La production d'une tonne d'aluminium nécessite 5 tonnes de bauxite pour extraire 2 tonnes d'alumine.

L'aluminium figure comme le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'oxygène et le silicium. Mais ce métal n'est connu que depuis le début du 19^{ème} siècle, et fut longtemps considéré comme un métal précieux à cause de sa difficulté de réduction de l'oxyde d'aluminium, forme sous laquelle il est présent dans la nature.

C'est en 1886 que Héoult en France et Hall aux Etats-Unis découvrent simultanément le procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion.

Cette découverte a permis le développement de l'aluminium, devenu aujourd'hui le principal métal non ferreux industriel.

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position pour l'utilisation des matériaux métalliques.

L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. [1]

I.1.2. Les principales familles d'alliages :

On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium:

- **les alliages corroyés** : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage
- **les alliages de moulage** : obtenus par fonderie seulement.

I.1.3. Constitution des alliages d'aluminium :

Ils sont constitués d'aluminium (élément de base) et élément d'alliages, élément d'addition et impuretés.

I.1.3.1. Élément d'alliages :

Ils sont ajoutés en plus faibles quantités de 1 à 7 % pour les alliages de corroyage, et jusqu'à 20% dans les alliages de moulages. Ces éléments sont le Mg, Mn, Si, Cu, et Zn ; certains de ces éléments peuvent être ajoutés simultanément.

I.1.3.2. Élément d'addition :

Ils sont ajoutés en plus faibles quantités (en générale environ 1%) pour améliorer certaine propriété telle que la finesse des grains , la trempabilité et la soudabilité . les éléments d'addition classiques sont : Cr, Mn, Ni, Pb et Be.

I.1.3.3. Les impuretés :

Le fer et silicium sont les deux principales utilisées, le rapport Fe/Si est environ de 2% pour la plupart des alliages d'aluminium.

I.1.4. Propriétés :

- bon conducteur de la chaleur et de l'électricité
- faible masse volumique : 2,7 kg/dm³
- point de fusion : 658° C
- faible module d'Young : 70000 N/mm² 70000 Mpa 7000DaN/mm²
- le coefficient de rigidité par unité de masse est sensiblement égal à celui de l'acier
- faible limite élastique
- fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)

La résistance à la corrosion est bonne à condition que la couche d'alumine soit formée car ensuite elle empêche la corrosion de pénétrer dans l'aluminium.

Par contre l'association avec un métal plus électropositif (acier, alliages de cuivre) détruit la couche d'alumine qui ne peut donc plus protéger l'aluminium.

I.1.5. Diagramme d'équilibre :

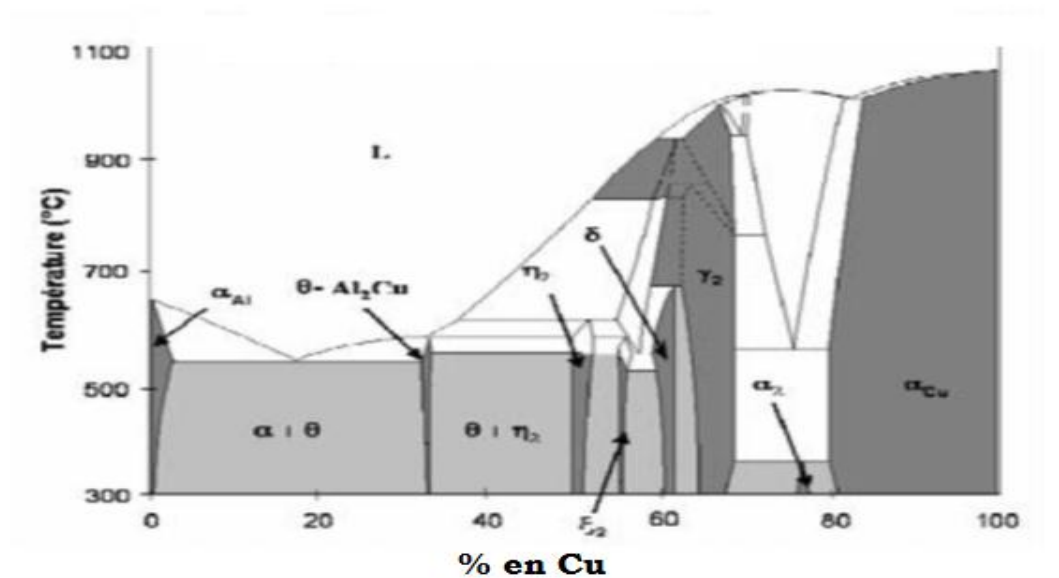


Figure I-1: Diagramme de phase de l'alliage binaire Al-Cu à l'équilibre

I.1.6. Application :

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale superstructures et équipements, bâtiments (toitures, façades, aménagement intérieure), industrie électrique (câbles et appareillages), boîtes de boisson ...etc.

I.2. Alliages de titane :

I.2.1. Généralité sur le Titane :

L'utilisation du titane est en relation avec ses différentes structures, propriétés mécaniques, ses propriétés chimiques, ces propriétés physiques. Un de leurs domaines d'application privilégiés est le secteur aéronautique et spatial (disque de moteurs d'avion, train d'atterrissage, carters, éléments de voilure...).

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. [2]

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).

I.2.2. 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
Capacité thermique massique	522	J.Kg.K-1
Conductivité thermique	16.7	W.m-1.K-1
Résistivité électrique à 20°C	47.8 10 ⁻⁸	Ω.m
Coefficient de dilatation linéaire à 20°C	8.5 10 ⁻⁶	K-
Susceptibilité magnétique	3.2 10 ⁻⁶	Cm ³ .g-1
Module d'élasticité	110000	MPa
Coefficient de poisson	0.33	-

Tableau I-1 : Caractéristique mécanique du Titane

I.2.3. Les éléments d'addition :

Les éléments d'addition stabilisent soit la phase α (élément α -gène), soit la phase β (élément β -gène).

- **Les éléments α -gènes** sont l'aluminium (Al), l'oxygène (O), le carbone (C) et l'azote (N).

- **Les éléments β -gènes** 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).

Enfin, certains éléments sont qualifiés de neutres, tels que le zirconium (Zr) et l'étain (Sn). [2]

I.2.4. Les principales familles d'alliages :

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

- **Les alliages α** sont 100% de phase α ;

Propriétés :

- Ne prennent pas la trempe.
- Résistance mécanique faible à moyenne (R_m 850-1000 MPa).
- Bonne tenue au fluage à chaud (utilisation jusqu'à 450°C)
- Excellentes propriétés cryogéniques.
- Soudable.

Application :

Turboréacteur, turbine à gaz.

Ex : Ti 40 Ti 0.2Fe ou TA5E (Ti5%Al 2.5%Sn)

- **Les alliages β** sont 100% de phase β ;

Propriétés :

- Structure β métastable à température ambiante.
- Durcissement par vieillissement entre 450 et 620°C.
- Résistance mécanique plus élevée (R_m 1000-1300MPa).
- Température d'utilisation jusqu'à 500°C.
- A l'état mis en solution, excellente formabilité et soudabilité.

Application :

Turboréacteur : disque de compresseur.

Ex : Ti V 10 Fe 2 Al 3 ou Ti Al 6 Sn 2 Zr 4 Mo6.

- **Les alliages $\alpha+\beta$** possèdent proportions éminemment variables de phase α et β ;

Propriétés :

- Possibilité de traitement thermique.
- Résistance mécanique moyenne à élevée (R_m 900-1150 MPa).
- Tenue au fluage plus faible températures d'emploi 350-400°C).
- Utilisés principalement à l'état recuit (faible trempabilité).
- Soudabilité inférieure aux α .

Application :

- Aéronautique : pièces de structure.
- Automobile : bielles, ressorts.
- Boulonnerie d'assemblage.
- Industrie chimique réacteur, pompe...).

Ex : Ti Al 6 V 4 ou Ti Al 6 V 6 Sn 2.

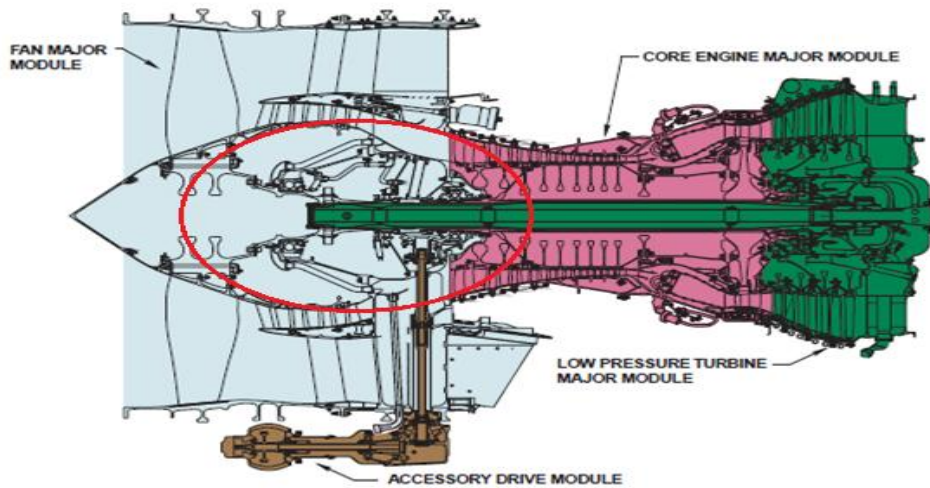


Figure I-3: Pièces en alliage de Titan 25% (moteur CFM -56)

Il y a aussi :

- Les **quasi α** (possédant très peu de phase β stable et proches des alliages α)
- Les **quasi β** (ou β métastables, possédant peu de phase α et proches des alliages β). [3]

I.2.5. Diagramme d'équilibre :

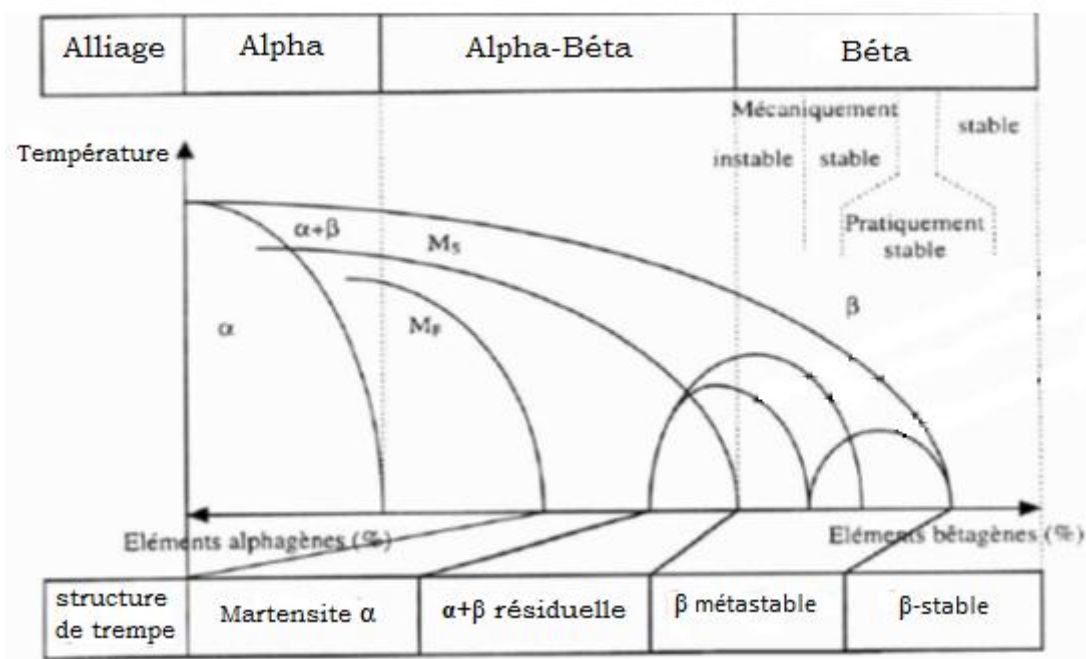


Figure I-2 : Diagramme pseudo-binaire, classification des alliages de titane selon leur composition chimique [4]

I.3. Alliages de l'Acier inoxydable :

I.3.1. Généralité sur les aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables développent la propriété essentielle de résister à la corrosion avec une teneur en chrome supérieure à 12% et moins de 2% de carbone.

Selon les applications recherchées, d'autres éléments d'alliages peuvent être incorporés. L'ajout se fait par substitution (Cr-Ni-Mo-Va-Co) ou en insertion (N, B) dans le réseau. [3]

I.3.2. Les éléments d'addition :

Les éléments d'alliage modifient la position de l'étendue des différents domaines du diagramme d'équilibre traditionnel fer-carbone :

- les éléments comme le Ni, C, N, Mn, Co, Cu... favorisent l'organisation des atomes de l'alliage en austénite : éléments gammagènes ;

- d'autres éléments comme le Cr, Mo, Si, Nb, Ti, Al, W, V, Ta... favorisent l'organisation des atomes de l'alliage en ferrite/martensite : éléments alphagènes.

La structure finale de l'acier dépend donc de l'équilibre entre ces deux tendances. [3]

I.3.3. Les principales familles d'alliages :

On distingue 4 grandes familles d'acier inoxydable :

- Aciers ferritiques
- Aciers martensitiques
- Aciers austénitiques
- Acier austéno-ferritiques

- **Aciers ferritiques :**

Le pourcentage carbone est inférieur à 0,08.

La teneur en chrome varie de 10,5 à 30% avec 2 fourchettes principales :

16 à 20 %, au-dessus de 20 % de chrome, la nuance contient des additions d'éléments alpha gènes (Si,Mo,..) qui stabilisent la phase sigma phase fragilisant lors d'un maintien entre **550°C et 850°C**.

Pour les très fortes teneurs en chrome, l'acquisition de la ductilité nécessite l'élimination quasi complète des éléments carbone et azote.

Enfin la fragilisation à **475°C** affecte toutes les nuances avec un durcissement notable après chauffage prolongé entre **350°C et 550°C**.

Ils ne prennent pas la trempe. Généralement pas soudables.

Ils deviennent fragiles et sensibles à la corrosion inter granulaire.

Propriétés physique :

densité	Coefficient de dilatation	Conductibilité thermique	Capacité thermique massique	Résistivité électrique
d	α (20-100°C) 10^{-6} K^{-1}	λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	C $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ρ $10^{-2} \mu\Omega.\text{m}$
7,7	10	25	460	60

Tableau I-2 : Propriétés physique de l'acier ferritique [3]

Caractéristique mécanique (à 20°C) :

- Résistance : 400-630 MPa.
- Limite élastique 0.2% : 260MPa(min).
- Allongement (5d) : 20%(min)
- Module d'élasticité à 20°C : 220.10^3 MPa.

Particularité a la nuance :

-fortement magnétisable ; excellent rapport d'emboutissage ;
Grande aptitude au polissage.

Application :

Industries alimentaire et agroalimentaire ; électroménager ; transport ;
bâtiment (barodage, décoration)

- **Aciers martensitiques :**

Teneur en chrome de 11.5 à 19 % avec un pourcentage de carbone
0.08 minimum.

A l'état trempé, leur structure est martensitique.

Propriétés physique :

densité	Coefficient de dilatation	Conductibilité thermique	Capacité thermique massique	Résistivité électrique
d	α (20-100°C) 10^{-6} K^{-1}	λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	C $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ρ $10^{-2} \mu\Omega.\text{m}$
7,71	10.8	30	460	65

Tableau I-3 : Propriétés physique de l'acier martensitique

Caractéristique mécanique :

-module d'élasticité à 20°C : 250.10^3 MPa .

Particularité de la nuance

- Faible teneur en Cr.
- Dureté élevée : acier trempant à forte teneur en C.
- Présence de carbure type Cr_{23}C_6 .
- Bonne résistance à l'usure, bonne teneur du fil de coupe.
- Cr partiellement engagé dans des carbures.
- Résistance à la corrosion réduite, remède.
- Polir les surfaces ;
- Préférer des températures de revenu voisines de 200°C (550°C est particulièrement défavorable).

Application

- $\text{C} > 0.3$: pièce mécaniques.
- $0.3 < \text{C} < 0.6$: coutellerie.
- $\text{C} = 1\%$: roulement.

Austénitique (non ferritique) :

Acier à haute teneur en chrome comprise entre 16% et 20% associée à des teneurs en nickel comprise entre 6% et 15%

Pour obtenir une structure entièrement austénitique.

Le pourcentage de carbone varie entre 0.015 et 0.15.

Propriétés physique à (20°C):

densité	Coefficient de dilatation	Conductibilité thermique	Capacité thermique massique	Résistivité électrique
d	α ($20-100^\circ\text{C}$) 10^{-6} K^{-1}	λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	C $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ρ $10^{-2} \mu\Omega.\text{m}$
7,9	16.8	16	500	76

Tableau I-4 : Propriétés physique de l'acier austénitique

Caractéristique mécanique (à 20°C) :

- Résistance : 500-700 MPa.
- Limite élastique 0.2% : 200 MPa(min).
- Allongement (5d) : 40%(min)
- Résilience KCU : 200J/cm²
- Module d'élasticité à 20°C : 215.10³ MPa.

Particularité de la nuance :

- Non ferromagnétique.
- Très haute résistance à la corrosion.
- Très ductile.
- Facilité de déformation à froid (frappe à froid –emboutissage).
- Ecrouis sable(Rm max >1400-Rp 0.2>1300).
- Très bonne soudabilité.

Application :

- Constructions mécanique et maritimes.
 - Nucléaire.
 - Médicale, pharmaceutique.
 - Chimique, pétrochimique, pétrolière.
 - Alimentaire
-
- **Austino-ferritique (ferromagnétique) –Duplex**

Teneur en chrome de 21 % à 28% avec un pourcentage de nickel relativement bas (3.5 à 8 %), et une addition d'azote.

Le diagramme de Schaeffler montre que l'augmentation de la teneur en chrome combinée à une diminution de teneur en nickel favorise des structures biphasées (austéno-ferrite) à température ambiante. [5]

La teneur en austénite est comprise entre 10 et 60 %.

Propriétés physique à (20°C):

densité	Coefficient de dilatation	Conductibilité thermique	Capacité thermique massique	Résistivité électrique
d	α (20-100°C) 10^{-6} K^{-1}	λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	C $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ρ $10^{-2} \mu\Omega.\text{m}$
7,9	12.5	17	500	80

Tableau I-5 : Propriétés physique de l'acier duplex**Caractéristique mécanique (à 20°C) :**

- Résistance : 760-890 MPa.
- Limite élastique 0.2% : 550 MPa(min).
- Allongement (5d) : 25%(min)
- Résilience KV : 100 J(min).
- Module d'élasticité à 20°C : 200.10^3 MPa.

Particularité de la nuance :

- Soudage : pas de pré ni poste-chauffage, insensibilité à la fissuration à chaud.

En comparaison avec les aciers austénitiques ;

- Ferromagnétique.
- Tenue à la corrosion très améliorée, en particulier :
 - Sous contrainte en milieu H_2S ;
 - Par piqûres et crevasses en milieu chloruré ;
 - plus utilisé dans le milieu marin.
- Limite élastique pratiquement doublée, allié à une ductilité et une ténacité satisfaisantes.

Application :

- Pièces mécanique et mécano-soudées déverses devant travailler dans des milieux corrosifs.
- Industries :
 - Pétrolière et pétrochimique ;
 - Chimique ;
 - Mécanique, armement et marine.

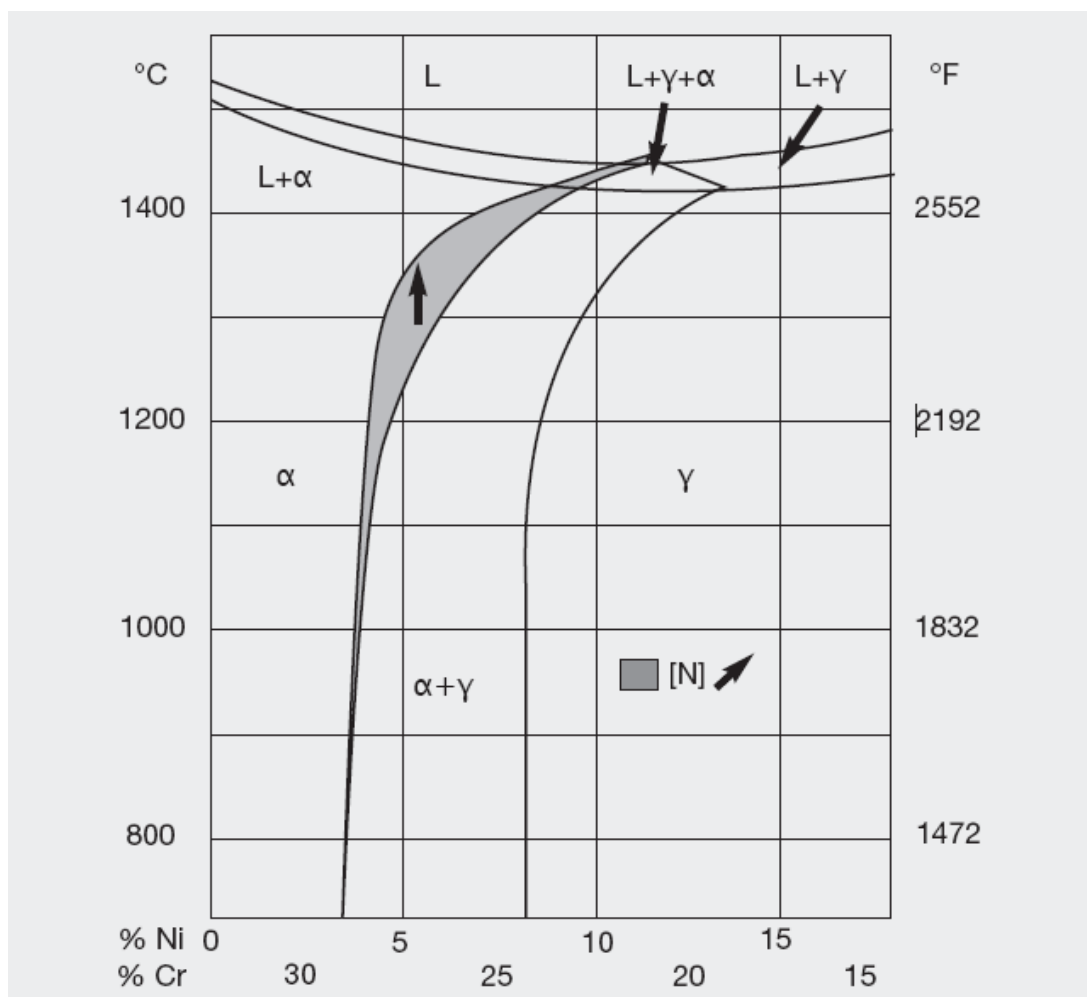
I.3.4. Diagramme d'équilibre :

Figure I-4 : Coupe du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni pour 68% de fer. de petites variations de la teneur en nickel et en chrome ont une incidence importante sur les quantités d'austénite et de ferrite dans aciers duplex. [5]



Figure I-5 : pièces en acier pour l'aéronautique

Les alliages d'aluminium présentent un bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports.

Les alliages de titane permettent un gain de poids pour des propriétés mécaniques équivalentes à celles d'un acier.

Les alliages d'acier inoxydable Utilisés pour réaliser des pièces de frottement (axes, arbres, roulements, etc..) à cause de leur bonne résistance à l'augmentation de température.

Toute cette caractéristique augmente l'utilisation de ces alliages dans l'industrie aéronautique.

CHAPITRE

II

**Corrosion et
contrôle destructif**

II.1. La corrosion :

La corrosion, du latin "corrodere", signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques).

Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

II.1.1. Définition de la corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés. [6]

II.1.2. Principales formes de corrosion :

II.1.2.1. Corrosion généralisée ou uniforme :

La corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement). [7]



Figure II-1: Corrosion Généralisée

II.1.2.2 .Corrosion localisée :

• Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres est caractérisée par une attaque très localisée en certains points de la surface et provoque des piqûres. Cette forme de corrosion est produite par certains anions, notamment les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. La corrosion par piqûres affecte en particulier les métaux ou les alliages passivés (aciers inoxydables, les alliages d'aluminium, etc.). [7]



Figure II-2 : Corrosion par piqûres

• Corrosion intergranulaire

Dans certaines conditions, les joints de grains sont le siège d'une corrosion localisée très importante alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants. (Figure II-3). [8]

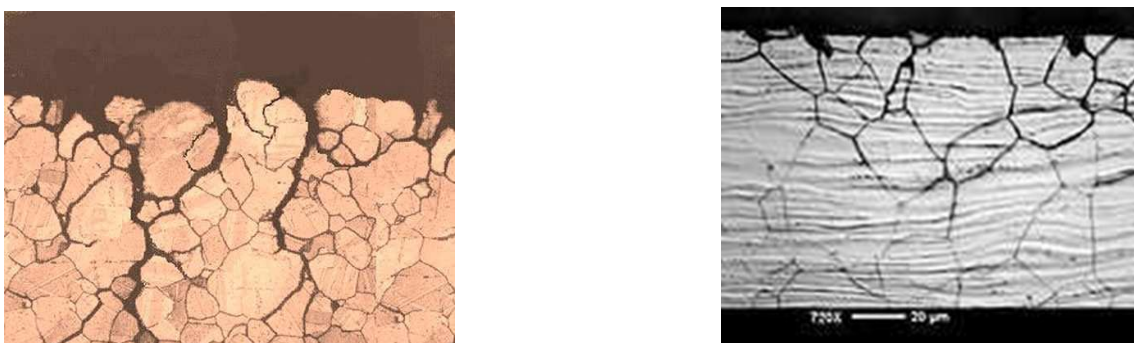


Figure II-3 : Corrosion Intergranulaire

- **Corrosion par crevasse**

Ce type de corrosion est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnants dans les trous, sous les dépôts, à l'interface des brides et joints, à l'interface d'un objet tombé dans le fond d'un récipient, etc. C'est une attaque électrochimique par "aération différentielle" qui se prolonge par une ou des réactions secondaires (figure II-4). [8]



Figure II-4 : Corrosion Caverneuse

- **Corrosion galvanique**

Ce type de corrosion résulte du couplage électrique de deux métaux différents et immergés dans la même solution. Le moins noble (l'anode) se corrode et le plus noble (la cathode) est protégé. Elle résulte de la formation d'une pile électrochimique (figure II-5).



Figure II-5: Corrosion Galvanisée

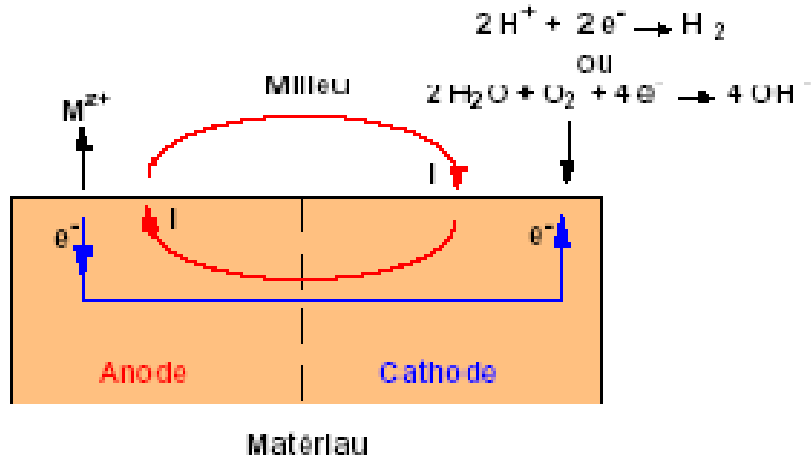


Figure II-6 : Schéma du processus de corrosion galvanique
Corrosion et dissolution sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

- **Corrosion par frottement**

C'est la détérioration qui se produit à l'interface entre des surfaces en contact, suite à la conjugaison de la corrosion et d'un faible glissement réciproque des deux surfaces.

- **Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion**

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (force de traction) et d'une réaction électrochimique. La corrosion sous l'effet de la fatigue est due à l'application répétée des contraintes. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures intergranulaires ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte.

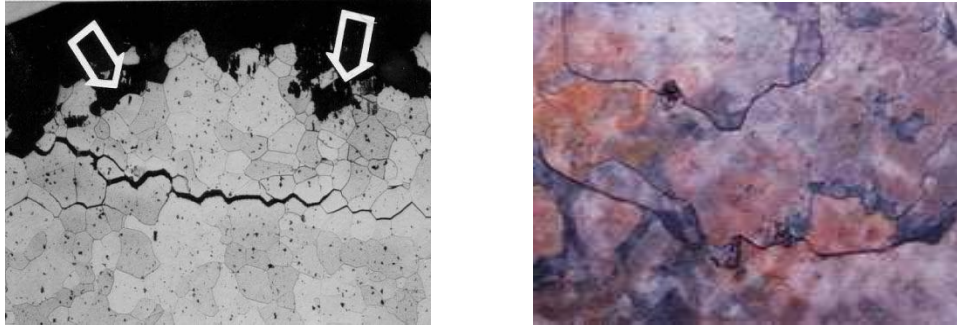


Figure II-7 : Corrosion sous contrainte

- **Erosion :**

La corrosion –érosion résulte du mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important et les phénomènes de frottement et d'usure peuvent intervenir. Les signes en sont : apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous ...avec un aspect directionnel caractérisé («queue de comète ») . [8]

II.1.3.Types de corrosion rencontrée sur le titane et les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium :

II.1.3.1. Les aciers inoxydables :

- 1) Corrosion uniforme en milieu acide
- 2) Corrosion par piqûre
- 3) Corrosion caverneuse
- 4) Corrosion sous contrainte

Il faut réunir trois conditions :

- Présence de chlorures
- Température élevée
- Présence de contraintes mécaniques de traction

- 5) Corrosion inter-granulaire :

Pour que ce type de corrosion se développe il faut que le métal ait été sensibilisé, puis mis en contact avec un milieu corrosif.

- 6) Corrosion galvanique
- 7) Corrosion sélective : l'attaque sélective est due au couplage galvanique entre la phase ferrite α et celle de l'austénite γ de ces alliages duplex.

II.1.3.2. Les alliages de titane :

1) Corrosion par piqûre, caverneuse ou sous contrainte :

- Les risques de corrosion sous contraintes apparaissent dans les alliages de titane :
 - à froid dans l'eau de mer
 - dans certains milieux aqueux (méthanol anhydre)
 - à chaud, en présence de NaCl fondu rencontrées sur ces matériaux
- Les critères de résistance sont globalement assez proches de ceux qui améliorent la ténacité :
 - les structures α sont sensibles à la corrosion sous contraintes
 - les structures β ont une bonne résistance
 - les alliages α - β ont une sensibilité

2) Erosion

- Très faibles car la couche d'oxyde protectrice est très résistante.

II.1.3.3. Les alliages d'aluminium :

- **Corrosion par piqûres**

L'aluminium, comme tout métal recouvert d'un film passif, est sensible à la corrosion par piqûres.

- **Corrosion galvanique**
- **Corrosion intergranulaire**
- **Corrosion feuilletante**

II.1.4. Les principaux moyens de protection contre la corrosion dans l'industrie aéronautique :

L'utilisation dans l'industrie aéronautique d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques, nécessite de mettre en œuvre des moyens de protection contre la corrosion efficaces pour assurer la durabilité de la structure.

Plusieurs procédés sont en général couplés pour obtenir une protection optimale. La Figure II.8 donne un schéma d'un système de protection classique qui comprend trois couches successives : la conversion ou l'anodisation reposant sur le substrat, le primaire et puis la couche de finition (décoration).

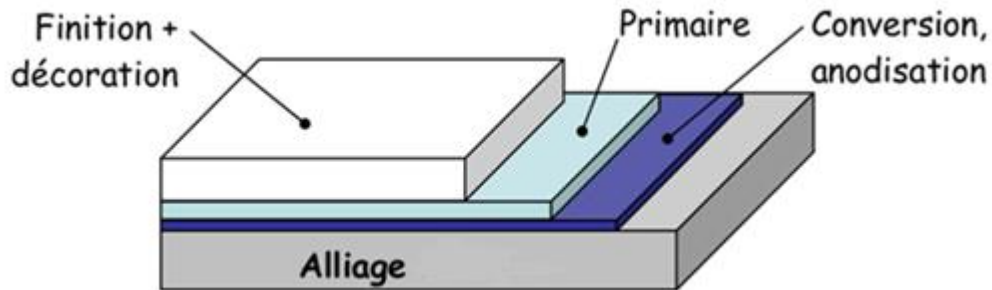


Figure II-8 : Schéma d'un système de protection utilisé dans l'industrie aéronautique

II.2. Traitements thermiques :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage.

II.2.1. Définitions et procédés des traitements thermiques :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (figure II-9).

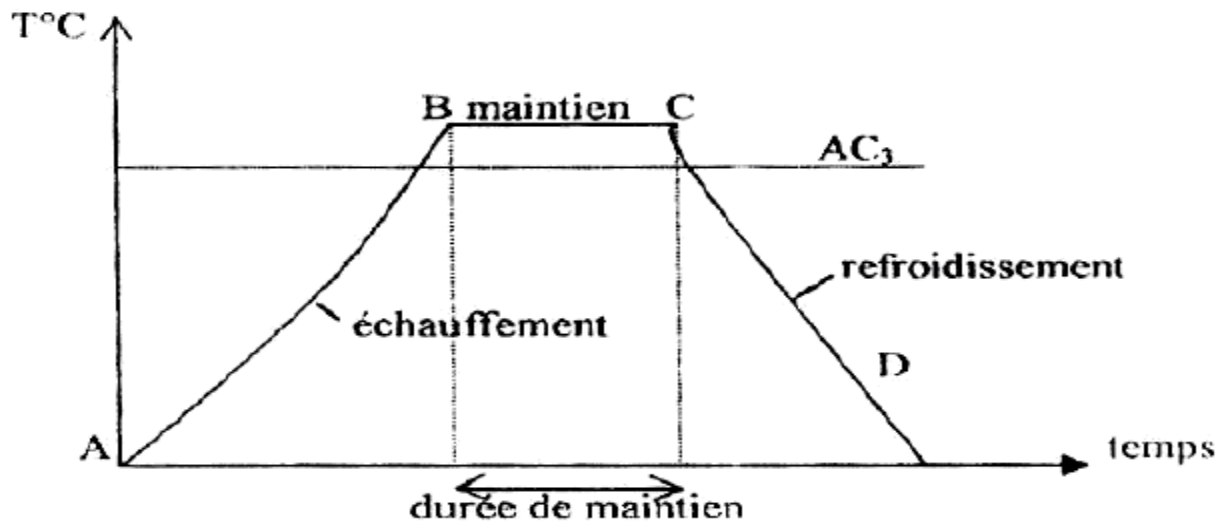


Figure II-9 : Le procédé de traitement thermique

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation.

- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

II.2.2. Chauffage des pièces :

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

a. Par transmission de la chaleur :

On distingue trois possibilités :

- **Par conductibilité** : La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.
- **Par convection** : Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.
- **Par rayonnement** : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement

b. Par production de la chaleur dans la pièce :

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction).

II.2.3. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques :

L'appareil de chauffage doit permettre :

- D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température déterminée et avec une précision de l'ordre de plus ou moins 5°C.
- D'éviter une dénaturation du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.
- De présenter des possibilités de préchauffage lorsque la température à atteindre est élevée.

En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée.

II.2.4. Types de fours et leurs atmosphères :

a. Fours à sole :

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

b. Fours à bain de sels :

Ils présentent les avantages suivants :

- rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent.
- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation.
- Absence de dénaturation du métal : le bain qui peut être choisi neutre, oxydant ou réducteur, protège la pièce de tout contact avec l'oxygène de l'air.

c. Fours électriques :

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

d. Atmosphères :

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.



Figure II-10 : four électrique de traitement thermique

II.2.5. Refroidissement des pièces :

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps).

Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.

On utilise aussi les jets permettant de régler le refroidissement des pièces sur toute leur surface, et enfin des chambres spéciales avec production du brouillard obtenu par jet d'eau et d'air sous pression, surtout utilisé en aviation pour le traitement de certaines pièces en aluminium.

II.3.Le contrôle destructif :

II.3.1.Microscopie optique :

La microscopie optique a été utilisée en tant que moyen de caractérisation de la macrostructure, de la microstructure et également de l'état de corrosion du matériau. Associé à une caméra, le microscope optique permet de réaliser des micrographies de la surface des échantillons.

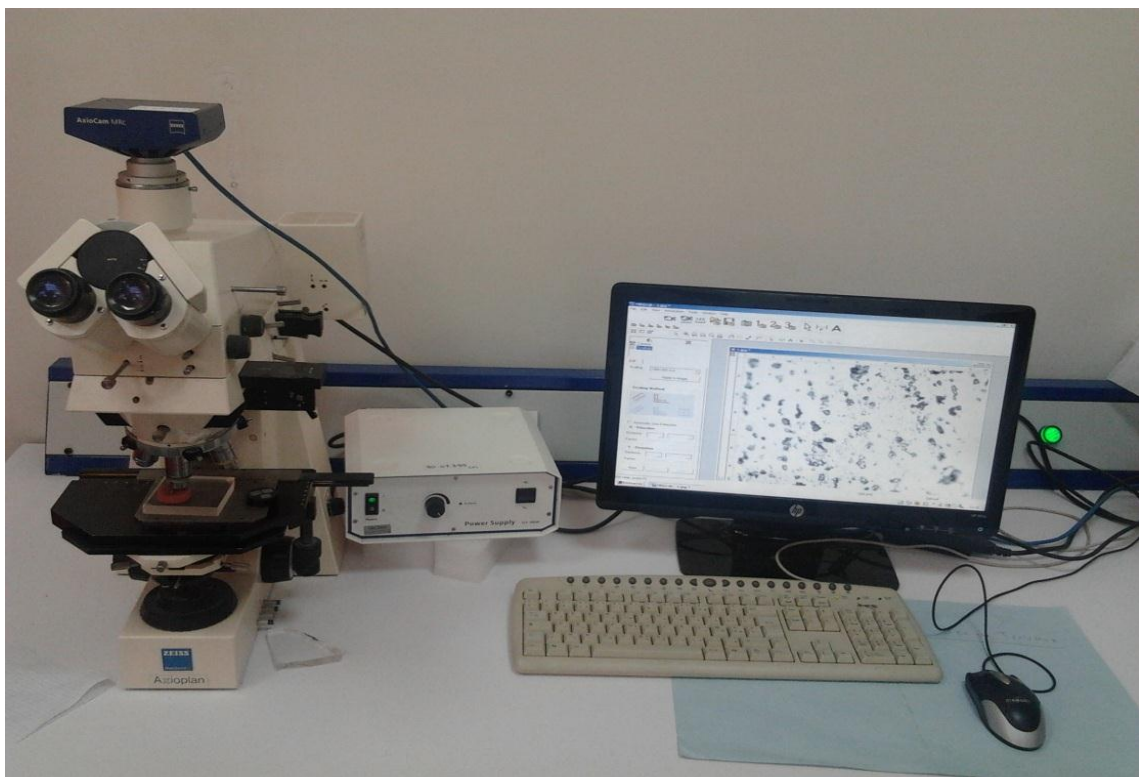


Figure II-11 : microscope optique ZEISS axioplan

II.3.2. La Microdureté :

Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique.

La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la conservation du poli, la difficulté d'usinage, etc. Elle permet d'apprécier la résistance des corps fragiles (carbures, composés intermétalliques, etc.)

Enfin, la mise au point des méthodes de microdureté permet de résoudre de nombreux problèmes : mesure de la dureté des couches minces ou superficielles, exploration d'alliages à phases multiples.

➤ Dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue (figure II-12). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur.

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kg) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. En choisissant la force donnant une empreinte telle que la diagonale d doit être inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. [14]

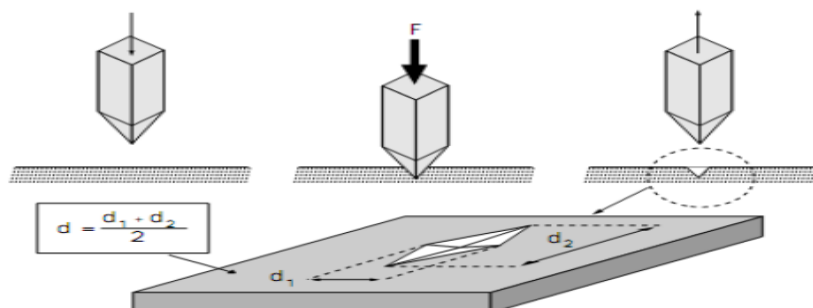


Figure II-12 : principe de dureté de vicker

Dans l'essai Vickers (Smith et Sandland 1925), une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers HV est définie par:

$$HV = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{la surface de l'empreinte}}$$

$$HV = \frac{2F \sin 68}{gd^2} = 18544 \frac{p}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

Avec: $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

F (N) : La charge appliquée au pénétrateur.

d (mm) : Le diagonal moyen de l'empreinte.



Figure II-13 : duretémètre

II.3.3. Préparation des échantillons :

Le polissage est une technique qui permet d'obtenir des surfaces planes et lisses sans rayures afin de pouvoir observer la microstructure du matériau après l'attaque chimique. Le polissage est réalisé mécaniquement par l'utilisation de papiers abrasifs avec une solution en en l'alumine.

Cette technique permet de polir pratiquement tous les matériaux massifs, compacts, en couche mince et même divisés ou poreux s'ils sont enrobés. Ils peuvent être multiphasés et contenir des précipités ou des ségrégations. Ils peuvent être de toute dureté à l'exception des matériaux très mous.

Généralement on utilise des polisseuses à disques du commerce. Celles-ci comportent un ou plusieurs plateaux métalliques rotatifs. Le plateau sous forme de disque est mis en rotation par un moteur de vitesse réglable.

Pour le polissage de finition, on utilise des tissus ou feutres sur lesquels l'abrasif est répandu soit sous forme de poudre abrasive à laquelle on ajoute un lubrifiant, soit sous forme de pâte contenant l'abrasif. Il existe de nombreux types d'abrasifs et de supports d'abrasif que l'on choisira en fonction de la nature du matériau et de la qualité de la finition souhaitée.

L'échantillon est généralement fixé solidement sur la base inférieure d'un porte-objet lourd (cylindre métallique) soit par un blocage mécanique soit par collage à chaud ou à froid avec des colles ou cires. Le porte-objet peut être équipé d'une tête goniométrique. Dans le cas de dégrossissage, on peut tenir l'objet à la main. La face inférieure de l'échantillon est plaquée sur le disque abrasif mis en rotation. Une lubrification assurée par l'écoulement d'un fluide sur le plateau est impérative pour éliminer les débris d'usure et réduire l'échauffement dû au frottement. Il s'agit généralement d'eau, d'huile ou de lubrifiants spéciaux.

Les paramètres à contrôler sont : la vitesse de rotation, la direction du polissage, la quantité et la nature de l'abrasif et du lubrifiant, la force de pénétration et le temps de polissage. Il faudra faire un choix judicieux du matériel employé pour minimiser les dégâts mécaniques.



Figure II-14 : polisseuse type STRUERS

Dans ce chapitre on a vu les principaux types de corrosion qui peuvent dégrader les alliages d'aluminiums, de titanes et les aciers inoxydables, à savoir :

La corrosion généralisée, la corrosion par piqure, la corrosion intergranulaire la corrosion caverneuse, la corrosion galvanique, la corrosion par frottement et enfin la corrosion sous contrainte et l'érosion.

Nous avons présenté la procédure de préparation d'échantillons, le traitement thermique qui peut apporter des modifications dans la structure et des méthodes de caractérisation d'ordre destructive, commençant par la microscopie optique qui nous révèle la microstructure du matériau et l'état de la surface et des joints ensuite la micro dureté qui est une caractéristique mécanique très importante du matériau.

CHAPITRE

III

Contrôle non
destructif

Comme son nom l'indique, le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis, disons que le CND concerne exclusivement la "santé de la matière" et consiste à rechercher les défauts internes des structures, matériaux, pièces et assemblages.

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.

L'idéal serait d'obtenir un dimensionnement très précis de tous les défauts décelés.

III.1.Principales méthodes de contrôles non destructifs :

Les méthodes de contrôle non destructif les plus couramment employées peuvent être classées en deux familles principales en fonction du type d'anomalie recherchée dans la pièce.

Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position et forme du défaut, ...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce, ...), les problèmes économiques (coût, ...), etc.

- **Les méthodes de surfaces :**

Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect,

c'est à dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

(Anomalies en surface extérieure) sont les suivantes :

- Contrôle visuel ;
- ressuage ;
- magnétoscopie ;
- courants de Foucault.

- **Les méthodes volumiques :**

Les défauts internes sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses.

(anomalies au sein de la pièce) sont les suivantes :

- ultrasons ;
- rayonnements ionisants(écographie)./radiographie

D'autres méthodes existent et ont l'avantage d'être globales et en temps réel. Il s'agit en particulier de :

- la thermographie ;
- l'émission acoustique.

Cette liste de méthodes est loin d'être exhaustive. On citerait encore, l'étanchéité et l'émission acoustique qui ne seront pas détaillées car elles concernent plus les objets fabriqués avec les métaux que les métaux eux-mêmes

III.1.1. Les Méthodes de Surfaces :

III.1.1.1. Le Contrôle Visuel :

C'est la méthode la plus simple, la plus ancienne. L'appareillage comprend des loupes, des miroirs, des endoscopes, des caméras vidéo, etc.

On peut même utiliser des robots pour inspecter des endroits dangereux ou difficiles d'accès tels les réseaux de canalisation et les réacteurs nucléaires.

III.1.1.2. Le Ressuage :

Cet essai permet de déceler les défauts qui apparaissent à la surface. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.).

Le contrôle par ressuage est limité à la détection de défauts débouchant à la surface des pièces.

- **Principales Etapes de Ressuage** (Figure III-1) :

Cette méthode est déterminée par quatre phases ;

- D'abord nettoyer soigneusement la pièce pour enlever les salissures, les traces de graisse.
- Appliquer d'un liquide pénétrant à la surface de la pièce
- Eliminer l'excès de pénétrant avec un produit adapté
- Déposition d'une couche de révélateur (poudre) qui fait ressortir le pénétrant et l'étale autour des fissures
- Inspection visuelle sous une lumière UV

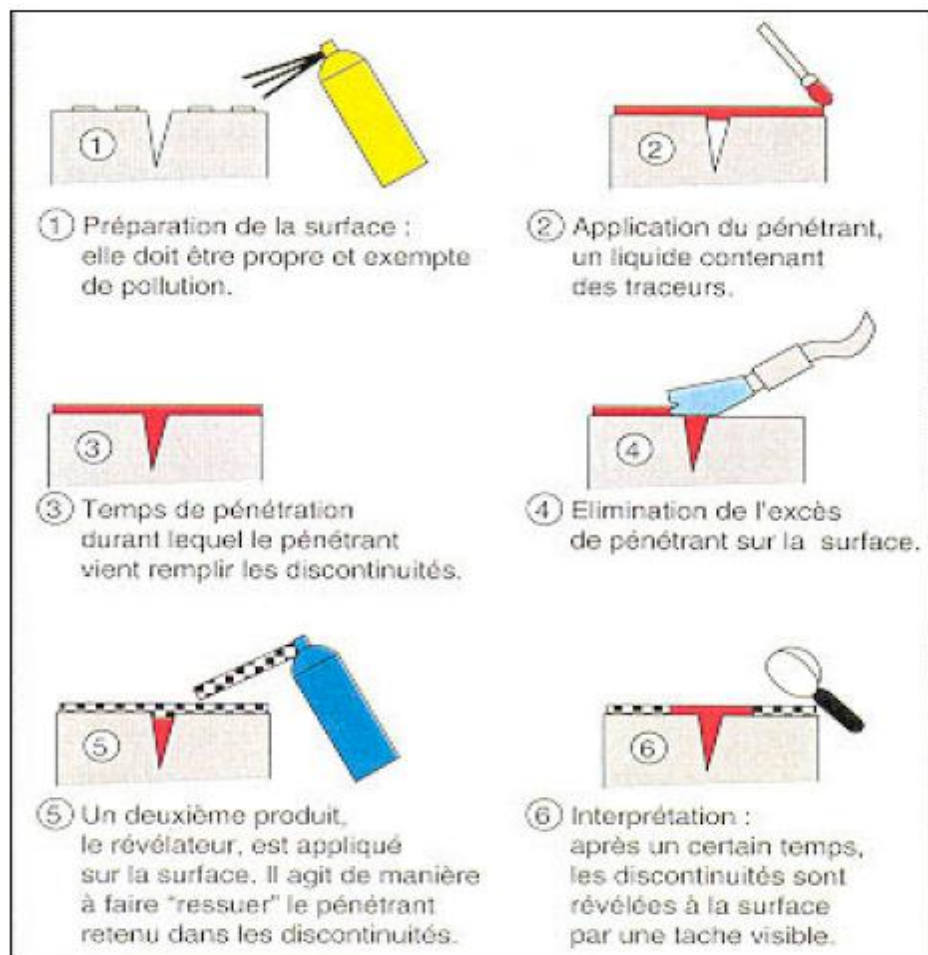


Figure III-1 : Méthode de Ressuage

Cette méthode s'applique à une grande variété de matériaux compacts et non poreux (métaux, plastiques, composites...).

Le pénétrant peut être appliqué au pinceau, au pistolet, à la bombe aérosol ou par immersion.

III.1.1.3. La magnétoscopie :

Cette méthode consiste à créer un flux d'induction magnétique intense dans des structures ferromagnétiques entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des traceurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux.[10]

Les lignes de force du flux sont bien alignées lorsque le matériau est sain. Elles sont déviées par des défauts orientés perpendiculairement à leur sens d'alignement

C'est une méthode qui s'effectue selon le processus suivant :

- Magnétisation de la pièce
- Application d'une poudre ferromagnétique fluorescente
- Les particules sont attirées par le flux magnétique et s'agglutinent au-dessus des défauts
- Observation des indications sous un éclairage approprié

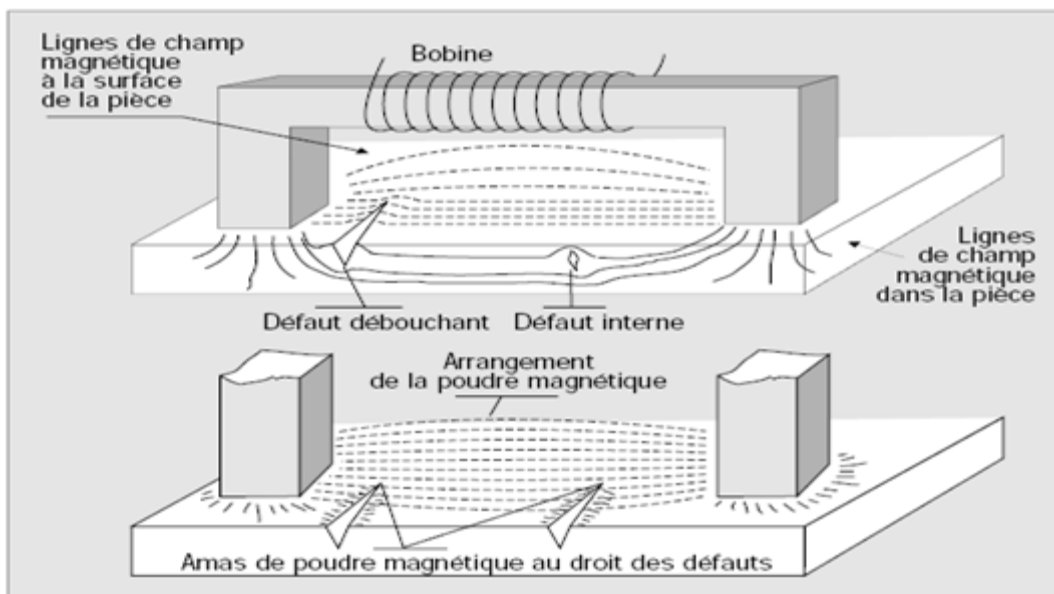


Figure III-2 : Schéma de principe du contrôle par magnétoscopie

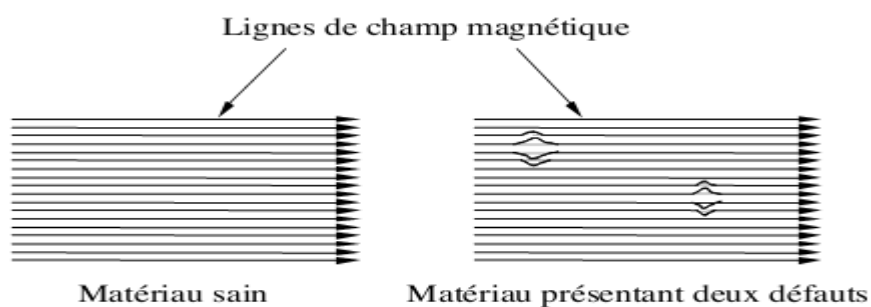


Figure III-3 : lignes de champ magnétique

Méthodes d'Aimantation :

- **Par passage de flux magnétique dans les pièces (aimantation longitudinale)**

Les lignes de force (donc le flux) sont sensiblement parallèles à l'axe Nord-Sud.

Cette méthode permet donc de détecter des discontinuités transversales (ou perpendiculaires) à cet axe.

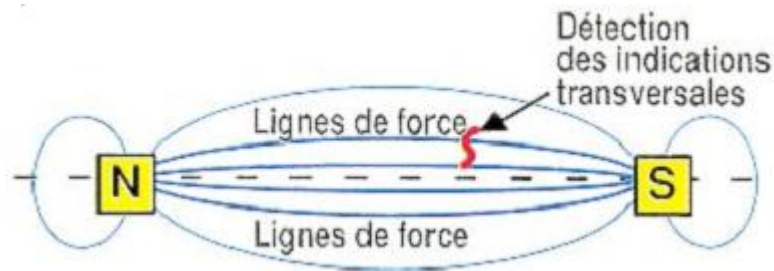


Figure III-4 : Détection des défauts par passage défaut magnétique

- **Par passage de courant dans les pièces (aimantation transversale)**

Les lignes de force traversent le produit perpendiculairement à l'excitation électrique.

Cette méthode permet de donc détecter les discontinuités longitudinales (ou parallèles) à l'axe du courant électrique.

Le flux se boucle dans la pièce perpendiculairement à l'axe électrique.

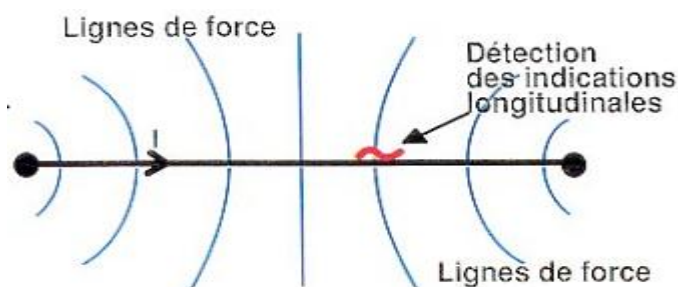


Figure III-5 : Détection des défauts par passage de courant électrique

III.1.1.4. Les courants de Foucault :

C'est une méthode de contrôle qui consiste à créer, dans un matériau conducteur, un courant induit par un champ magnétique variable. Ces courants induits, appelés courants de Foucault, circulent localement, à la surface du matériau. La présence d'une discontinuité à la surface de la pièce contrôlée perturbe la circulation des courants entraînant une variation de l'impédance apparente de la sonde de contrôle. [10]

a) L'effet de peau :

L'intensité des courants de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ (en Sm^{-1}) et une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur.

Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques δ .

L'épaisseur de peau est définie :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}$$

Si on considère une pièce plane infini en épaisseur et en (x, y) , excitée par un courant extérieur, de fréquence f (en Hz), 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. Le module de la densité de courants dans la pièce est donné par la relation :

$$J(z) = J_s e^{-\frac{z}{\delta}}$$

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

Nous pouvons constater que la densité de courant décroît de manière exponentielle dans la pièce.

Dans le tableau 2.1, les valeurs théoriques de la conductivité σ et de la perméabilité μ de certains matériaux sont données

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

Tableau III-1 : Conductivité électrique et perméabilité magnétique théoriques de matériaux à contrôler dans l'industrie.

b) Les capteurs à courants de Foucault :

La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault nécessite la mise en place d'un système permettant l'émission et la réception d'un champ magnétique alternatif. Ces deux fonctions peuvent être réalisées par un seul élément ou par deux éléments distincts. Les capteurs magnétiques transforment les variations du champ magnétique en une variation de tension mesurable. Nous pouvons classer les capteurs permettant de mesurer un champ magnétique variable en deux grandes familles :

– les capteurs inductifs. Historiquement les premiers éléments sensibles au champ connus, ils sont des bobines qui transforment le champ magnétique qui les traverse en tension. Elles peuvent être utilisées en émission et en réception.

– les capteurs **magnétiques**. La variation de l'impédance ou de la résistance de ces capteurs est proportionnelle au champ magnétique dans lequel ils sont plongés. L'émission du champ magnétique alternatif doit être réalisée par un autre élément. [9]

b) Diagramme d'impédance :

Les sondes de contrôle par courants de Foucault sont toujours des bobines de formes variées, uniques ou multiples, éventuellement couplées, caractérisées électriquement par une résistance R et une réactance $X = L \omega$ se combinant en une impédance Z ; le point de fonctionnement de la bobine peut être ainsi illustré par l'extrémité du vecteur dans le plan complexe R, X . Il est utile, pour définir les conditions d'un contrôle, de connaître l'influence des différents paramètres en jeu sur cette impédance Z (figure ...).

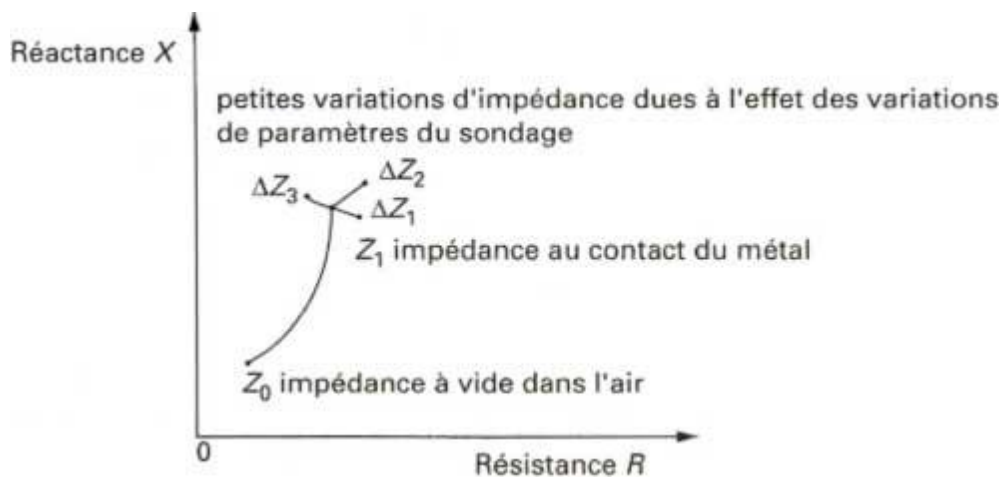


Figure III-6: Représentation des variations d'impédance d'une bobine

L'influence de la conductivité σ et de la fréquence f se matérialise dans le plan complexe par des courbes ayant l'allure d'arcs de cercles centrés sur l'axe OX . Une perméabilité magnétique relative croissante engendre un réseau homothétique de courbes, comme l'illustre la figure III.7 pour laquelle on a pris la représentation usuelle du diagramme normalisé en $L0\omega$ ($L0\omega$ étant l'inductance de la bobine dans l'air).

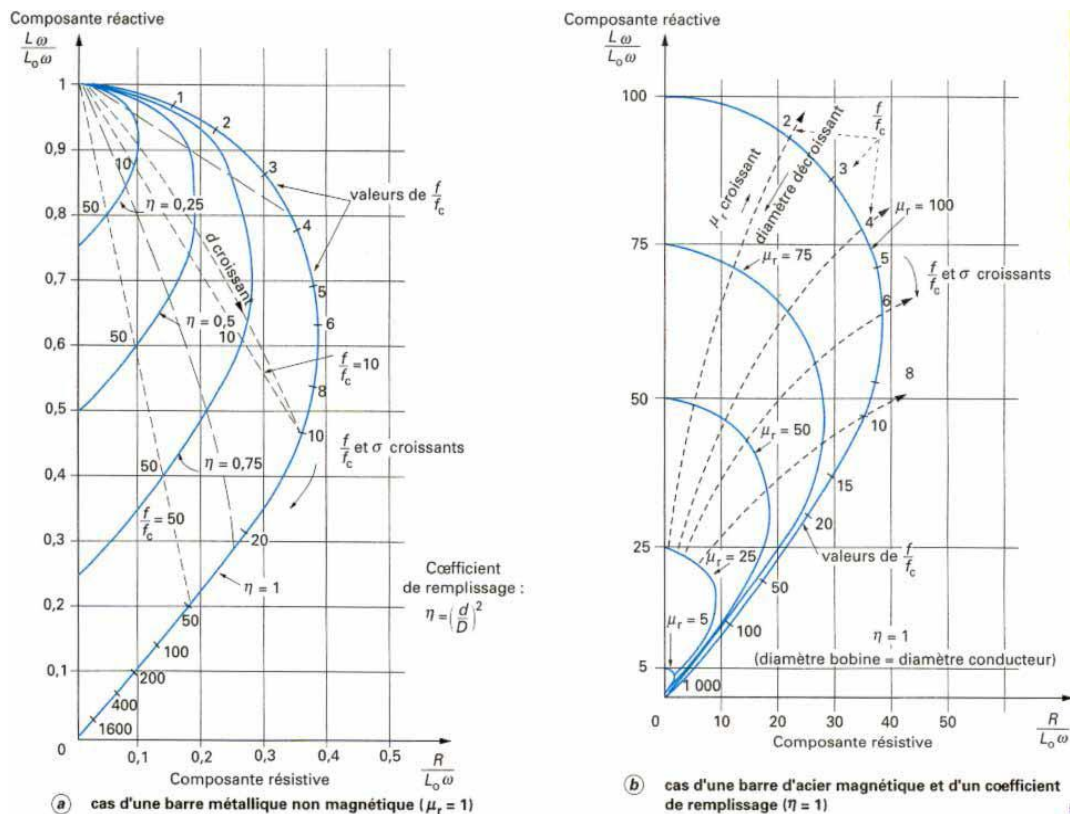


Figure III-7 : Diagrammes théoriques de l'impédance normalisée d'une bobine de diamètre D encerclant une barre métallique ferromagnétique ou non de diamètre d

III.1.2. Les Méthodes volumiques :

III.1.2.1. Radiographie :

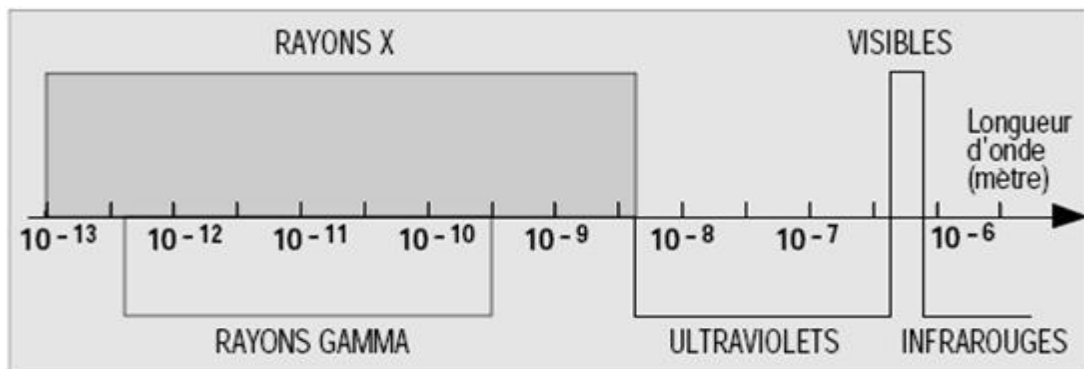
Une pièce est placée entre la source de radiation et le film. Plus le matériau traversé est dense, plus il absorbe le rayonnement. L'intensité de gris du film est proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques comme les faisceaux lumineux ordinaires, mais ils ont une longueur d'onde (λ) sensiblement inférieure et une énergie de rayonnement supérieure aux rayons lumineux.

L'énergie de rayonnement élevée confère aux rayons X et γ la propriété de pouvoir pénétrer et de traverser des corps opaques à la lumière ordinaire. La transparence n'est cependant pas parfaite. [10]

Le choix optimal des paramètres de travail tels que la distance entre le foyer et le film, la tension et le courant anodiques ainsi que le temps de pose pour une éprouvette donnée (forme, épaisseur, alliage), nécessite une bonne expérience et quelque fois des essais préliminaires.

Les doses de rayonnement X ou γ mises en jeu pour le contrôle non destructif des matériaux sont en général plus élevées que celles couramment appliquées pour les diagnostics en médecine. Des précautions de sécurité contre ces radiations sont donc impératives.



Les rayons X sont des rayons ionisants à très courte longueur d'onde

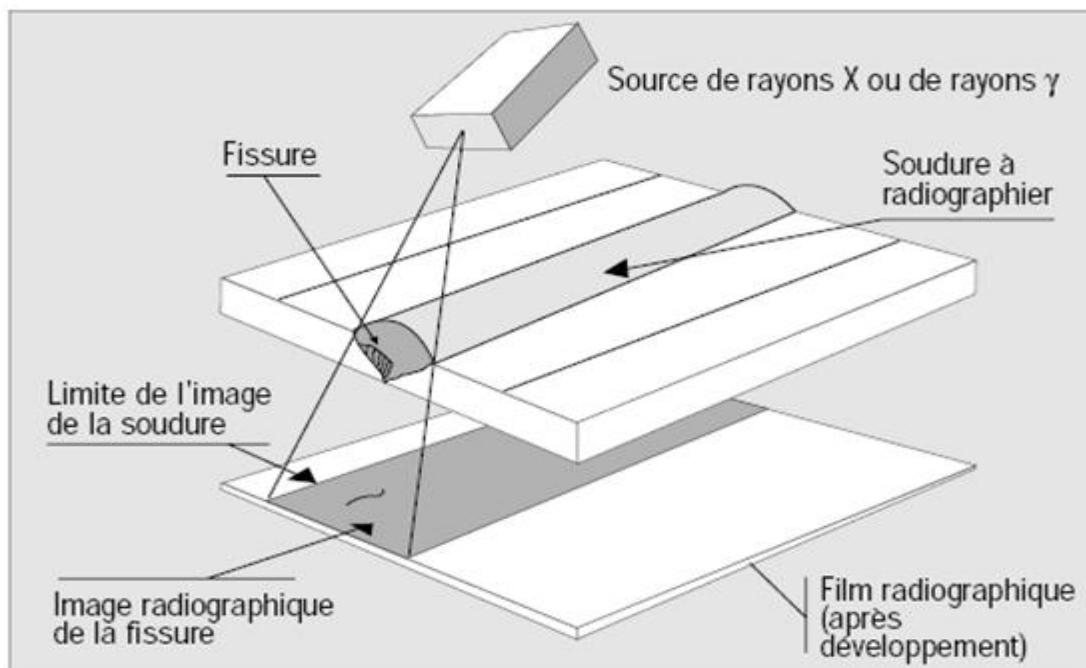


Figure III-8 : Schéma de principe du contrôle par radiographie.

III.1.2.2. Les ultrasons :

Les ultrasons sont des ondes acoustiques ou élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine et inférieure aux vibrations thermiques des atomes. Les sons audibles sont compris entre 10 et 20000 Hz et la gamme de vibrations thermiques s'étend de 10⁹ à 10¹³ Hz (1 GHz - 10 THz). Les fréquences utilisées lors d'examens aux ultrasons ne comprennent pas toute la gamme des ultrasons, mais varient entre 0,5 à 12 MHz. Pour un solide ayant une vitesse de son c de 5000 m/s ceci correspond à l'intervalle des longueurs d'ondes $\lambda = c/v$ de 1 cm à 0.4 mm. La limite inférieure de 0.5 MHz est déterminée par la perte totale en résolution des défauts qui ont une taille inférieure à la longueur d'onde. Dans les solides (vitesse du son $c \approx 5000$ m/s), une onde d'une fréquence de 0,5 MHz ne permet que de percevoir les défauts qui sont plus grands qu'un centimètre.

En général on s'intéresse aussi à des défauts beaucoup plus petits. L'augmentation de fréquence qui s'impose alors, a comme effet d'augmenter l'absorption et donc de limiter la profondeur accessible aux ultrasons.

C'est une méthode de contrôle qui consiste à transmettre des impulsions acoustiques de hautes fréquences (les ultrasons) dans un matériau. Ces ondes se propagent dans le matériau suivant les différents modes de propagation. La présence d'une discontinuité sur le trajet des ultrasons provoque la réflexion partielle des impulsions. Le signal réfléchi est recueilli par un transducteur ultrasonore. [11]

a) Emission et détection d'ultrasons :

L'émission et la détection d'ondes ultrasonores se réalise très facilement grâce à l'effet piézoélectrique.

Certains matériaux anisotropes, comme p. ex. le quartz monocristallin, ainsi que les matériaux ferroélectriques, tels que le titanate de baryum et le titanate de plomb, possèdent la propriété de se déformer sous l'effet d'un champ électrique (effet piézo-électrique direct).

Les déformations sont de l'ordre de 0,1 nm par Volt appliqué aux électrodes. Une tension électrique alternative, appliquée aux électrodes, fait vibrer le transducteur piézoélectrique.

Les vibrations, ainsi créées, se transmettent à tout solide en contact avec le transducteur et vont se propager dans celui-ci avec la vitesse du son caractéristique de ce milieu.

Réciproquement, une compression ou une dilatation d'un matériau piézoélectrique, provoquée par une onde incidente, fait apparaître des charges électriques sur les électrodes qui se mesurent facilement par la tension créée entre les électrodes (effet piézoélectrique inverse).

L'effet inverse peut alors servir pour la détection d'ondes. Il suffit pour cela de remplacer dans la (figure III-9) la tension d'alimentation par un oscilloscope.

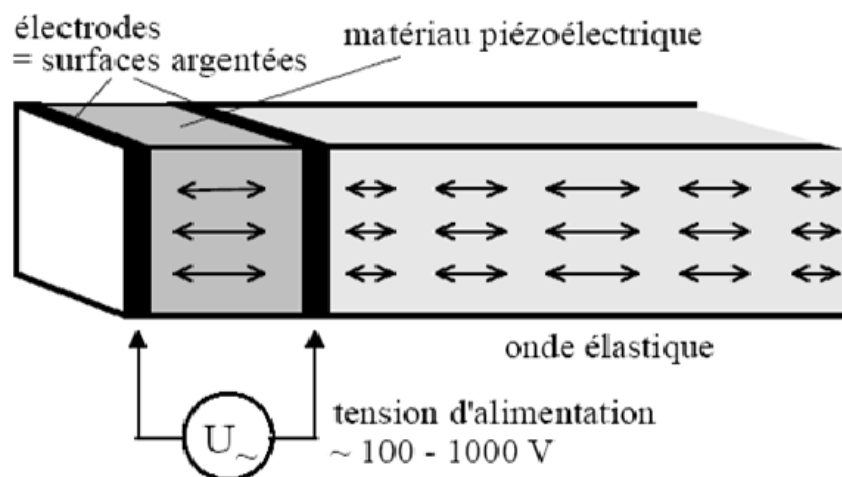


Figure III-9 : Emission d'une onde élastique longitudinale

b) Détection des défauts :

Pour la détection des défauts, on emploie principalement la méthode par réflexion. La sonde a le double emploi d'émetteur et de récepteur. Tout changement de milieu sera repéré par l'écho qu'il provoque. On peut donc situer la position du défaut à l'intérieur de la pièce.

La méthode par transmission nécessite deux palpeurs, un émetteur et un récepteur, la pièce doit avoir au moins deux surfaces parallèles. Une troisième méthode (méthode de résonance) est basée sur l'influence qu'ont les défauts sur les fréquences de résonance d'une pièce.

Une assiette contenant une fissure sonne différemment qu'une assiette parfaite quand on frappe dessus. Pour appliquer cette méthode, il faut, comme dans l'exemple de l'assiette, posséder des pièces de référence tout à fait identiques à l'exception des défauts. La méthode est très puissante mais n'est utilisable que pour le contrôle d'une série d'objets tout à fait identiques.

III.1.2.3. La thermographie infrarouge :

(TIR) est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien.

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle « Thermogramme ». [12]

Rayonnement infrarouge

La lumière visible, les ondes radio, TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques. Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8 μm . La bande infrarouge [figure III.11] s'étend de 0,8 à 1000 μm . En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 μm et 7-15 μm .

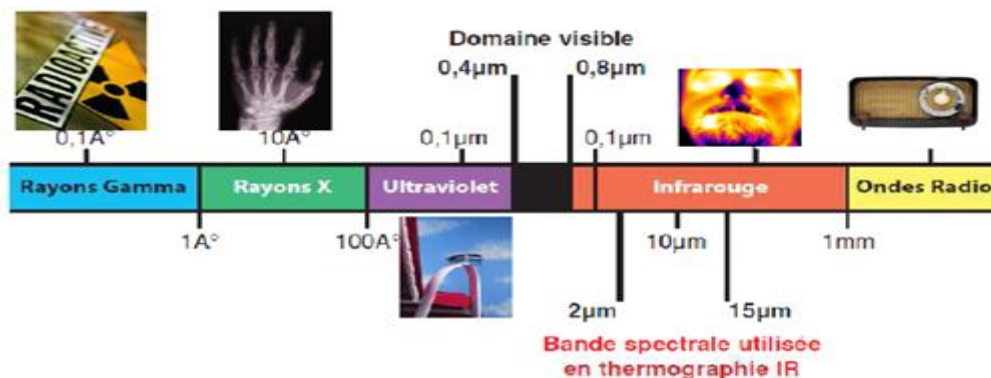


Figure III-11: les domaines de Rayonnement électromagnétique

III.1.2.4.Emission acoustique :

L'émission acoustique (EA) 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. Cette méthode de contrôle est particulièrement adaptée à la détection de la corrosion, le suivi de l'oxydation à haute température et au contrôle de l'état de revêtements de surface, utilisé avec précaution et rigueur, cette technique permet de détecter et suivre la propagation des fissures dans les matériaux.

Les signaux recueillis et traités en temps réel permettent de déceler et d'identifier la nature des endommagements tout en suivant leur évolution.

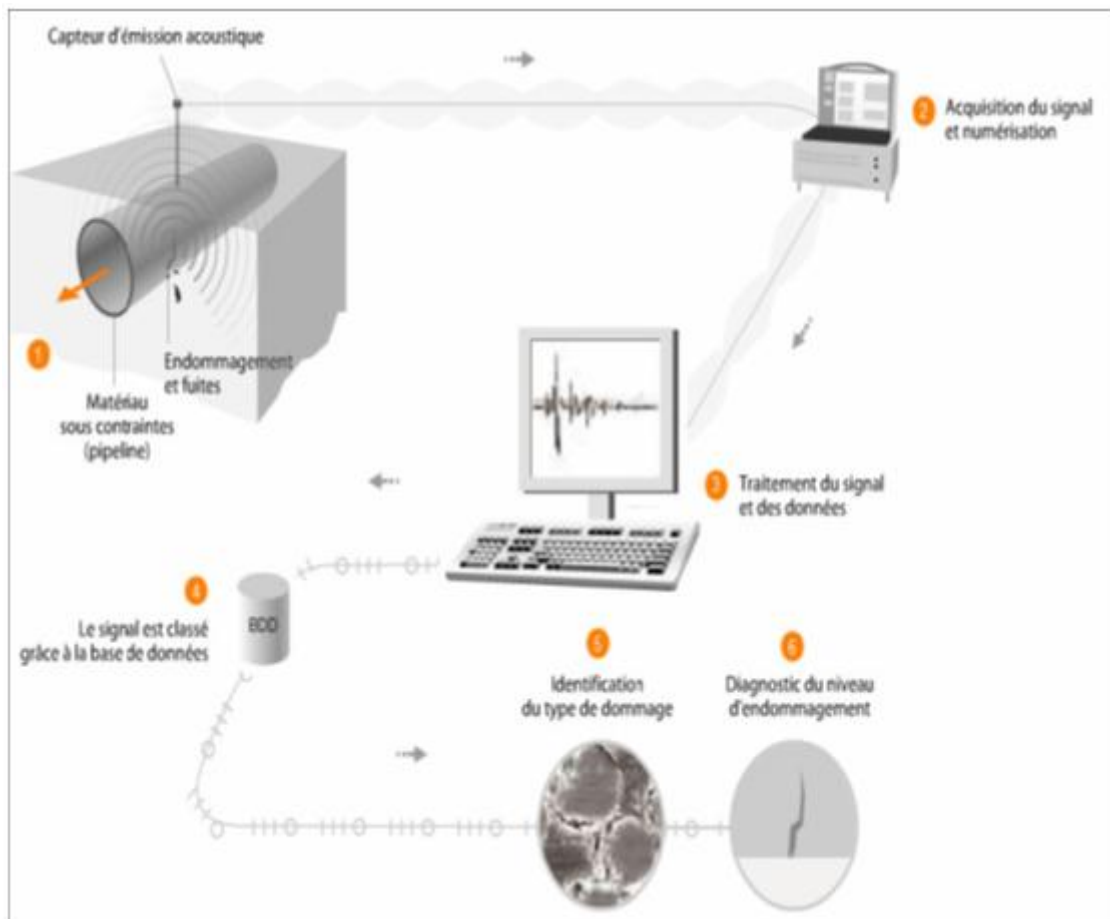


Figure III-11 : La technique de l'émission acoustique

L'avantage essentiel de cette technique est de donner une information en temps réel sur l'endommagement au cours d'une sollicitation mécanique ou thermomécanique. Elle est sans doute l'une des techniques la mieux adaptée pour surveiller et étudier la cinétique de l'endommagement dans les matériaux (propriétés physiques, mécaniques, etc.....) et sur l'expérience en émission acoustique acquise à travers de nombreux travaux de recherche en laboratoire et de multiples applications industrielles.

Le contrôle non destructif par émission acoustique s'applique en cours de service sans arrêt de production et sans préparations lourdes des structures à contrôler.

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.

III.2. Evaluation non destructifs :

III.2.1. Bruit de barkhausen :

BARKHAUSEN fut le premier à mettre en évidence ces discontinuités par une expérience simple; En testant un nouvel amplificateur reliant un bobinage placé autour d'un morceau de fer à un haut-parleur, il s'aperçoit que son montage émettait des crachotements lorsqu'un aimant permanent était approché lentement du barreau de fer.

Dans cette expérience, chaque mouvement brutal de paroi provoque une petite variation locale de champ que la bobine transforme en une tension électrique. Il se trouve qu'une partie importante du spectre se situe dans le domaine audible. Ce bruit est généralement appelé bruit Barkhausen ou bruit ferromagnétique.

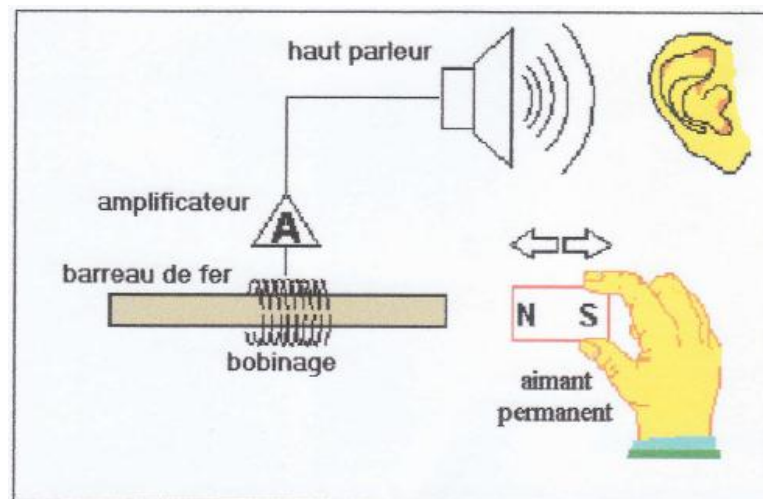


Figure III-12: expérience de BARKHAUSEN.

Les appareils actuels sont directement issus de cette expérience, l'excitation est évidemment électrique, provoquée par un inducteur qui magnétise le matériau plus ou moins localement suivant la forme de la pièce. La bobine (capteur) est, soit encerclant comme dans l'expérience de BARKHAUSEN, soit de côté. Dans ce cas, un petit noyau de ferrite lui est souvent adjoint pour augmenter sa sensibilité. Le signal sortant de la bobine capteur est filtré. [13]

A cause de phénomène de peau, La fréquence d'application de champ limite le volume pris en compte dans la matière. Dans le cas d'une magnétisation locale (par électroaimant) la pénétration de la magnétisation est limitée en profondeur, c'est-à-dire que le volume pris en compte dépend de la géométrie de l'inducteur et de caractéristiques du courant d'excitation en amplitude et en fréquence.

III.2.2. Cycle d'hystérésis :

Dans le cas du cycle d'hystérésis (Figure III-13), le matériau est porté alternativement de saturation à saturation dans deux directions opposées, à l'aide d'une excitation magnétique extrême alternative. Partant de l'état saturé, nous retrouvons alors les phénomènes inverses de ceux décrits lors de la première aimantation et ayant abouti à la saturation :

- Partant de l'état saturé, alors que H diminue, les moments magnétiques vont retourner dans la direction de facile aimantation la plus proche.
- De nouveaux domaines de fermeture vont apparaître : phénomène de germination.
- Décroissance des domaines orientés favorablement par rapport à H .
- Puis croissance de ceux orientés dans la direction opposée.
- Disparition des domaines défavorablement orientés.
- Enfin rotation des moments magnétiques pour s'aligner dans la direction de H .

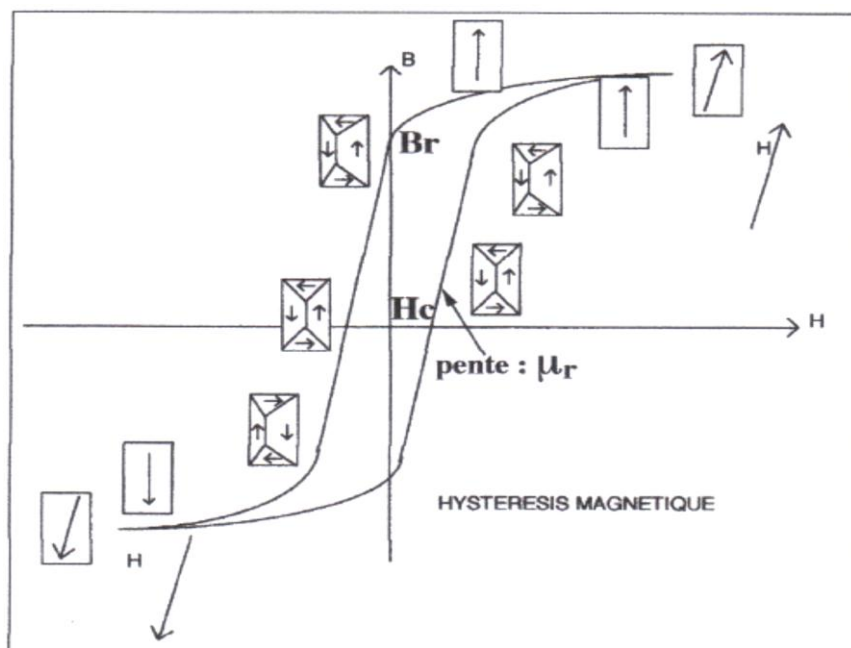


Figure III-13: Schéma d'un Cycle d'Hystérésis

III.2.3.VSM (vibrating sample magnetometer):

a)Principe de fonctionnement :

Dans le VSM, la vibration d'un échantillon magnétique à proximité d'un ensemble de bobines crée un flux variable. Ce flux est proportionnel au moment magnétique qui est mesuré et tracé en fonction du champ magnétique (H), de l'angle du champ, et de la température de l'échantillon. L'échantillon est relié par une tige (porte échantillon) à une source de vibration. L'échantillon est placé au milieu d'un ensemble de bobinage de détection dans lesquels une tension est induite. Un électro-aimant entourant l'échantillon est utilisé pour faire varier le champ dans lequel l'échantillon est exposé de sorte que l'aimantation peut être mesurée en fonction du champ appliqué.

Le logiciel Du VSM, **EasyVSM**, peut être installé pour extraire les différents paramètres magnétiques afin de caractériser une large variété d'échantillons pour différentes gammes de coercivité.

b) Les options disponibles sont :

- une option de rotation automatique (pour tourner l'unité de vibration).
- un système de contrôle de température.
- une sonde de magnétorésistance.
- Bobine de détection (au lieu des bobines standard à grandeur scalaire)
- un composant de mesure de couple.
- panneau de puissance facultatif de contact de sécurité.

c) Types de mesures disponibles

Easy VSM soutient les types de mesures prédéfinies suivantes :

- Courbe vierge
- Cycle d'hystérésis
- IRM et courbe vierge
- Démagnétisation de C.C (DCD)
- IRM et DCD (Henkel, deltaM, delta H)
- Mesures de combinaison
- Rémanence angulaire
- Rémanence à C.A.
- Dépendance de temps
- Balayage de la température
- Couple
- Méthode de Miyajima
- Mesures manuelles



Figure III-15 : Le VSM (vibrating sample magnetometer)

Le CND est utilisé pour vérifier l'intégrité des structures dans différents domaines industriels, par exemple l'aéronautique, le nucléaire, la métallurgie et le transport ferroviaire. Il existe trois types de contrôle : en fabrication, de qualité et de maintenance.

La fabrication de composants dans la métallurgie, demande des contrôles en cours de fabrication afin de détecter les éventuels défauts connus et de séparer les pièces défectueuses dans le meilleur délai possible.

Le contrôle de qualité a pour objectif de déterminer la conformité des pièces aux spécifications techniques demandées après leur fabrication.

Enfin, le contrôle en maintenance permet la détection de défauts dans une pièce critique, par exemple une pièce soumise à des fortes contraintes, qu'elles soient d'origine mécanique (vibrations) ou dues à la variation de température et de pression, ou encore à la corrosion.

Dans l'aéronautique, un des grands enjeux est de contrôler les lignes de rivets , pour détecter d'éventuels phénomènes de fissuration qui peuvent se créer en pied de rivet et se propager.

CHAPITRE

IV

Résultats et
interprétations

Dans ce travail on va traduire et interpréter les résultats obtenue après une série de tests et d'essais, par quelques méthodes parmi ceux qu'on a cité dans les chapitres précédents.

IV.1.Procédure expérimentale :

➤ **Choix des matériaux :**

On a choisis d'étudier trois types des matériaux :

- Aluminium 2024
- Titane Ti-6Al-4V
- Acier inoxydable duplex 2205 (austéno-feritique).

➤ **Chois de températures pour le traitement thermique :**

-**950°C** refroidissement trempé et à air

-**1150°C** refroidissement trempé et à air

➤ **Chois des milieux :**

-solution de HCl 3% de concentration.

-solution de HCl 5% de concentration.

➤ **Préparation des échantillons**

- On a découpé les tôles des métaux qu'on a choisis d'étudier en petits carrés de 8mmX8mm.
- On a fait un enrobage à chaud à l'aide d'une enrobeuse, l'enrobage permet de limiter les effets de bords pendant l'étape de polissage. Cette opération nous facilite la préhension de l'échantillon lors du polissage manuel.
- On a fait un polissage aux papiers abrasifs de granulométrie décroissante, 80 ensuite 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400 et 4000. puis un polissage de finition sur disque rotatif recouvert d'un papier feutre en présence d'alumine jusqu'à l'état miroir.

➤ **Procédures de travail :**

- ❖ Des mesures de micro-dureté seront prises pour les trois matériaux, à l'état pur, et après le traitement thermique.
- ❖ Le polissage mécaniques des échantillons suivie par une attaques chimique spécialisé pour chaque matériaux avant l'observation par le microscope optique pour la révélation les microstructure .

Des images seront prises par microscope optique, pour les trois types des matériaux, à l'état pur, après les traitements thermiques, on utilisant pour la révélation des microstructures une des attaques suivantes :

- L'aluminium 2024 :

Attaque chimique :

HNO ₃	30%
HCL	30%
HF	3%
H ₂ O	37%
Pendant 30 secondes	

- Le titane 4AL-6V :

Attaque chimique:

HNO ₃ (densité 1.40)	5cm ³
HF 48%	(10cm ³)
H ₂ O	85 cm ³
Pendant 30 secondes	

- Le duplex 2205 :

Attaque électrolytique :

(Acide oxalique 10% ,6V, pendant 40 Secondes).

Des mesures par une sonde à courant de Foucault sont effectuées pour les trois matériaux l'aluminium le titane et le duplex et le cycle d'hystérésis par le VSM est effectué seulement pour le duplex a l'état pure et avant et après l'immersion dans les deux concentrations de Hcl.

Dans le contrôle par courant de Foucault il est nécessaire de procéder à la caractérisation de la sonde suivant le cas étudié. Une étude de faisabilité dépend énormément de la sonde utilisée et du matériau à traiter. Dans ce travail, nous citerons uniquement le diagramme d'impédance, car il résume en lui-même la stabilité des sondes utilisées. De plus il nous permet de déterminer la fréquence optimale permettant un échange d'énergie maximale entre la sonde et le matériau et une profondeur de pénétration satisfaisante.

IV.2. Résultats et interprétations :

IV.2.1. Résultats de la microdureté :

Avec un appareil de mesure de microdureté vicker on a mesuré la moyenne de microdureté des trois matériaux l'aluminium, titane et le duplex à l'état pur et après le traitement thermique :

<i>L'alliage</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
TA-6V	355.1
Al 2024	139.3
Duplex 2205	261,3

Tableau IV-1: Résultats de la microdureté des alliages d'aluminium, de Titane et de l'acier inoxydable.

<i>L'alliage et type de traitement</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
Ti 950-tr-2h	341.2
Ti 950-air-2h	344.9
Ti 950-tr-4h	306.6
Ti 950-air-4h	325.4
Du 950-tr-2h	202.6
Du 950-air2h	226.6
Du 950-tr-4h	213.5
Du 950-air4h	210.5

Tableau IV-2: Résultats de la microdureté des alliages de Titane et de l'acier inoxydable traité à 950°C

<i>Titan 1150-Tr</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
30 mn	400,7
1h	394,975
1,5h	395
2h	427,775
2,5h	429,05
3h	462,025
3,5h	477,375
4h	491,15

Tableau IV-3: Résultats de la microdureté des alliages de titan traité à 1150°C avec refroidissement à eau

<i>Titan 1150-air</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
ti-air-30	372,925
1h	388,5
1,30h	401,275
2h	411,775
2,30h	469,5
3h	526,575
3,30h	555
4h	597,35

Tableau IV-4: Résultats de la microdureté des alliages de titan traité à 1150°C avec refroidissement à air

<i>Duplex 1150-Tr</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
30 mn	227,525
1h	234,7
1,5h	235,375
2h	245,075
2,5h	244,575
3h	246,525
3,5h	240,925
4h	242,65

Tableau IV-5: Résultats de la microdureté des alliages de l'acier inoxydable traité à 1150°C avec refroidissement à eau

<i>Duplex 1150-Air</i>	<i>Moyenne de microdureté (HV)</i>
30 mn	227,5
1h	245,225
1,5h	233,425
2h	247,325
2,5h	257
3h	238,2
3,5h	220,55
4h	244,3

Tableau IV-6: Résultats de la microdureté des alliages de l'acier inoxydable traité à 1150°C avec refroidissement à air

Les tableaux ci-dessus représentent les résultats de micro dureté avant et après traitement thermique, nous constatons une augmentation dans le cas du TA6V et du 2205.

IV.2.2. Résultat de la microscopie optique (la microstructure) :

Pour révéler la microstructure de ces alliages on a utilisé un microscope optique, et des attaques chimique et électrolytique :

- **L'aluminium 2024 :**

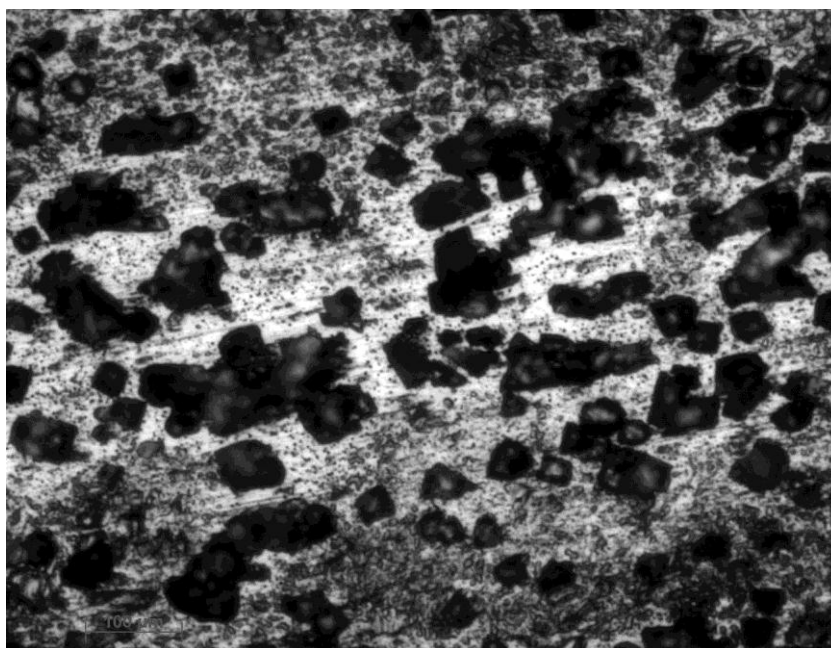


Figure IV-1 : Microstructure Aluminium 2024 a l'état pur (agrandissement X500)

- **Le Titane (TA6V) :**

L'alliage TA6V est un alliage de structure mixte $\alpha+\beta$, stabilisée par l'aluminium (6%) élément α -gène et vanadium (4%) élément β -gène. L'aluminium durcit la phase α en améliorant la résistance mécanique et la tenue au fluage. Le vanadium améliore la ductilité mais diminue la tenue à l'oxydation.

La microstructure obtenue est présentée sur la figure IV-2. Il s'agit d'une structure duplex, formée de grains de phase α , composante majoritaires (environ 60%), sous forme de nodule (diamètre de l'ordre de 20 à 30 μm) et de lamelle de phase α et β .

Le TA6V est un alliage à une microstructure à deux phases α et β .

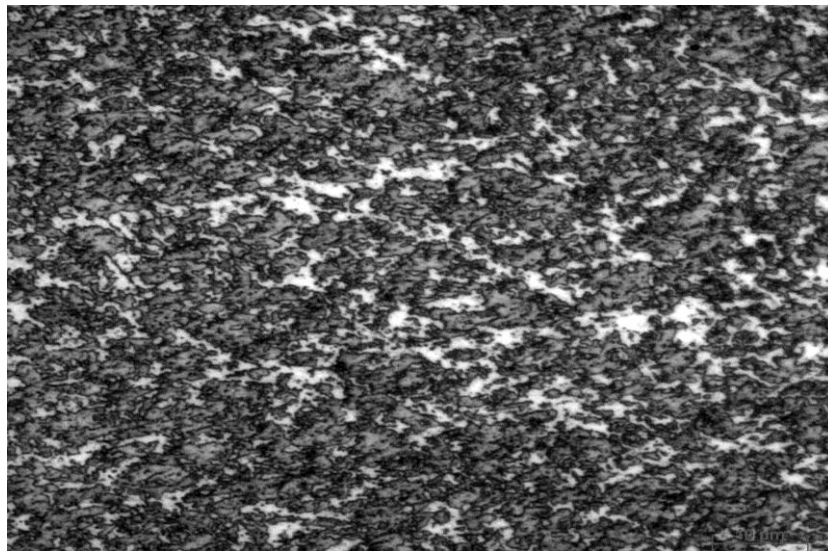


Figure IV-2 : Microstructure TA-6V à l'état pur (agrandissement X500)

- **Acier duplex 2205 :**

A l'état pur : Les aciers inoxydables duplex sont appelés "duplex" parce qu'ils ont une microstructure à deux phases constituée de grains d'acier inoxydable ferritique et austénitique. La Figure IV-3 montre la phase austénitique (couleur claire) et la phase ferritique foncée.

Le résultat est une microstructure d'environ 50% d'austénite et 50% de ferrite.

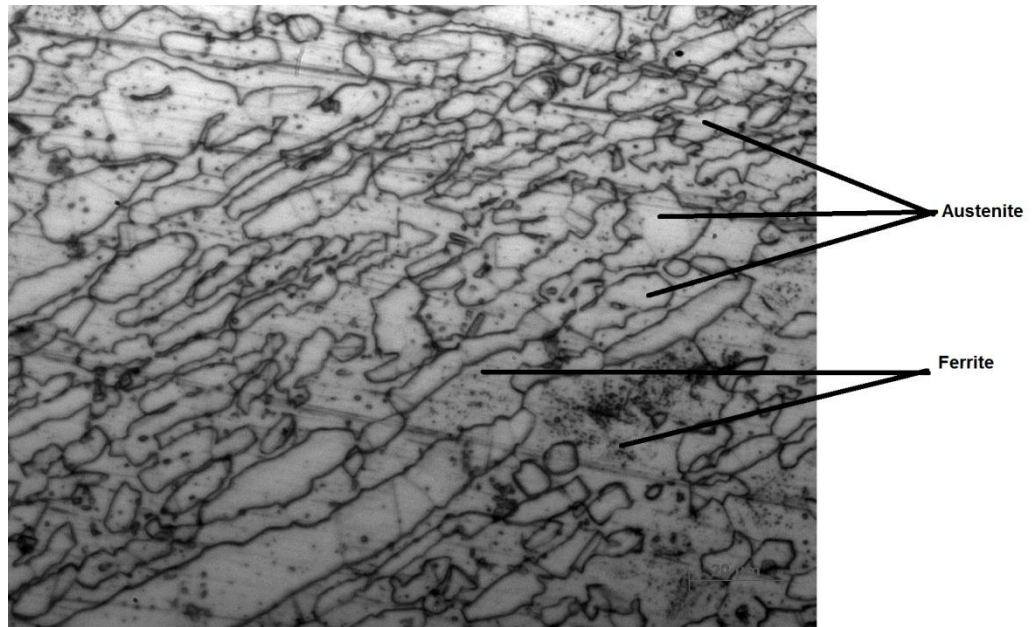


Figure IV-3: Microstructure acier duplex 2205 a l'état pur (agrandissement X500)

- **Titane (TA-6V) à 950°C:**

Le recuit a duré 2 heures et 4 heures suivi d'un refroidissement lent (à air) et rapide (une trempe). Les images prises par microscope optique sont illustrés sur les Figures IV-4 et Figure IV-5

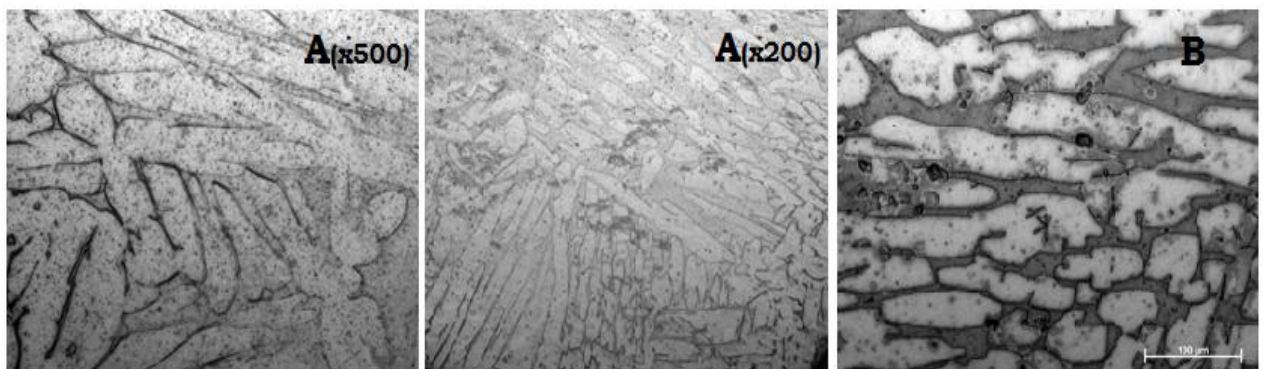


Figure IV-4: Microstructure TA-6V a subit a un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a air, A: 2 Heure ; B: 4 Heure (agrandissement X500)

La *Figure IV-4* représente les microstructures du TA6V après qu'il subit un traitement thermique. La morphologie de la microstructure résultante de nos échantillons après un traitement de 2 heures et 4 heures avec un refroidissement lent.

Elle est constituée d'une structure bimodale ou duplexe, de phase α_1 granulaires de structure hexagonale compacte comme la phase α , mais ayant la même composition chimique que la phase β d'origine, elle est obtenue par une transformation martensitique de la phase β . On a aussi une distribution plus ou moins de la phase α_2 des aiguilles de structure orthorhombique intergranulaire, précipite dans la phase β

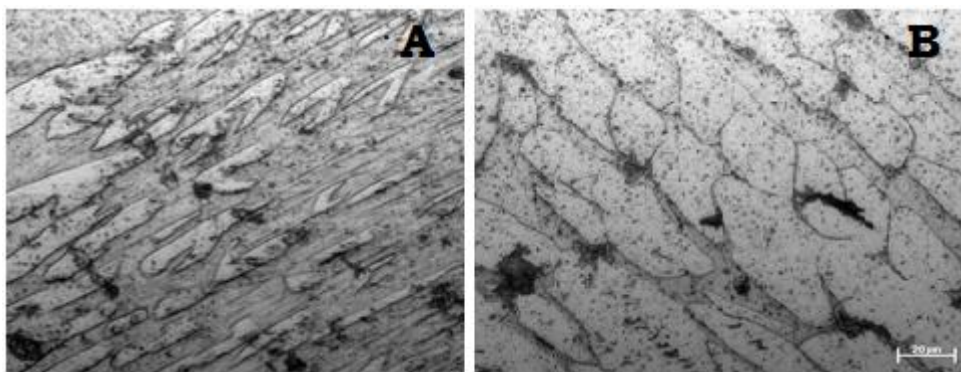


Figure IV-5: Microstructure TA-6V a subi a un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a eau, A: 2 Heure ; B: 4 Heure (agrandissement X500)

Dans le cas du recuit à 950°C, suivi d'une trempe à l'eau, la structure représente une forme equiaxe $\alpha_1+\beta$. Les grains sont pratiquement équiaxiaux, distribués de façon relativement homogène avec un agrandissement plus élevé dans le cas de 4heure. La transformation allotropique des phases $\alpha+\beta$ vers β se produit, la fraction de phase α diminue au cours du traitement thermique et la phase β augmente.

- **Titane (TA-6V) à 1150°C:**

Les Figures IV-6 et VI-7 regroupe les microstructures des échantillons après un traitement thermique à 1150°C suivi par un refroidissement à air et une trempe à l'eau.

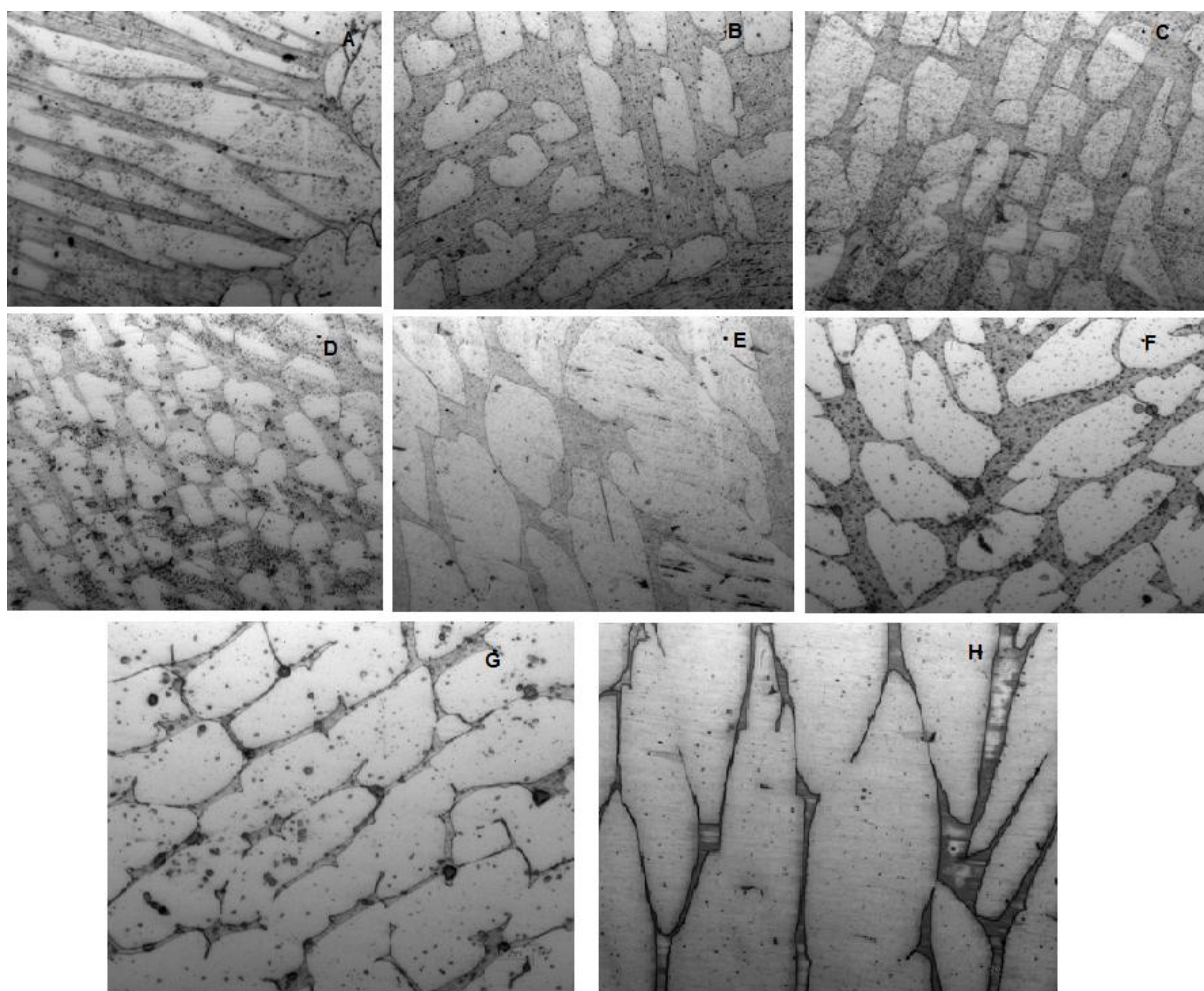


Figure IV-6: Microstructure TA6V ayant subi à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement à Air,

A :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h
(agrandissement X500)

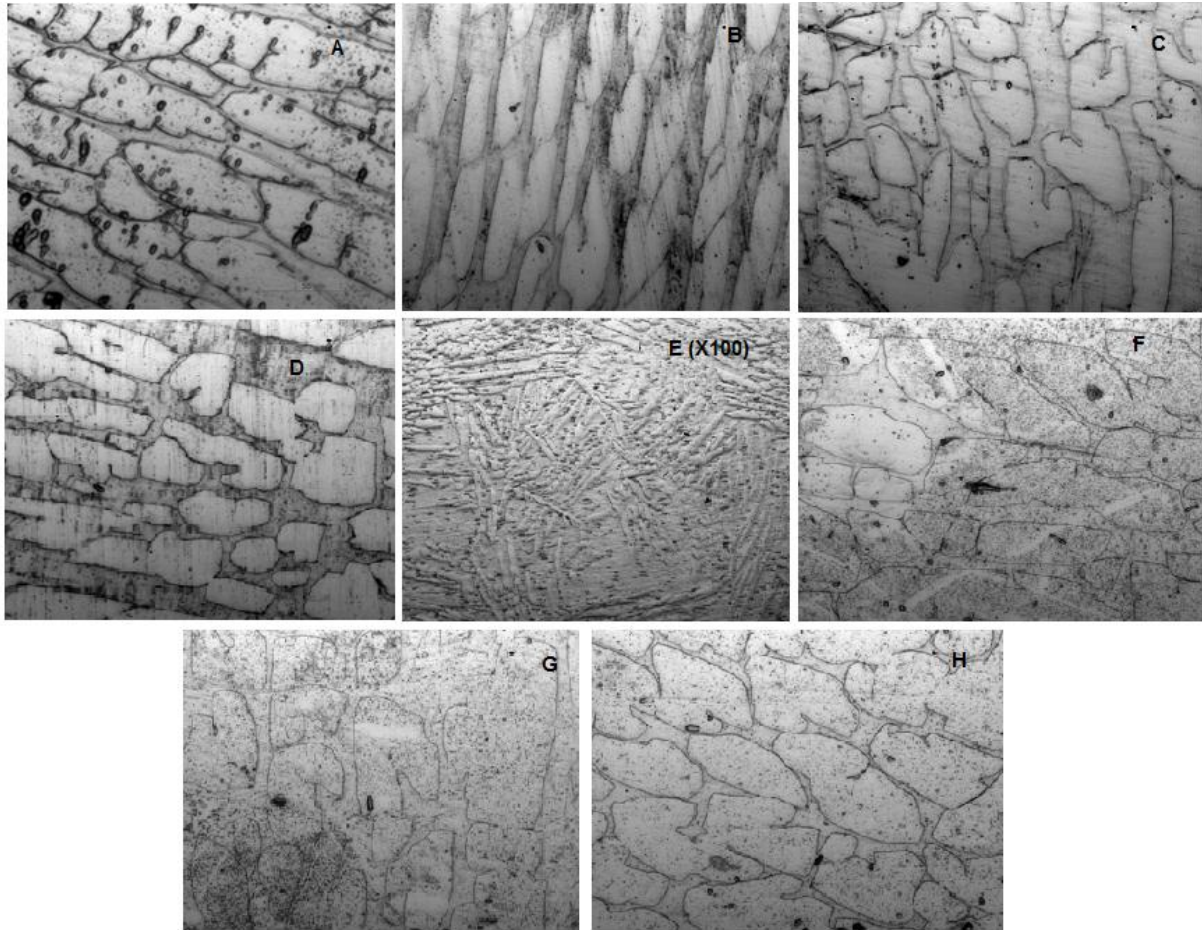


Figure IV-7: Microstructure TA6V ayant subi à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement a eau,

A :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h
(agrandissement X500)

Dans cette partie du traitement thermique nous suivons l'évolution des phases chaque 30 minute pour les deux types de refroidissement.

Dans le cas du refroidissement à air, nous remarquons une augmentation de la phase α avec des grains de forme lamelle, tandis que, dans le cas du refroidissement rapide, la forme des grains change de la forme lamellaire à la forme rond.

- **Duplex 2205 à 950°C:**

Les figures IV-8 et VI-9 regroupent les microstructures des échantillons après un traitement thermique à 950°C suivi par un refroidissement à air et une trempe à l'eau.

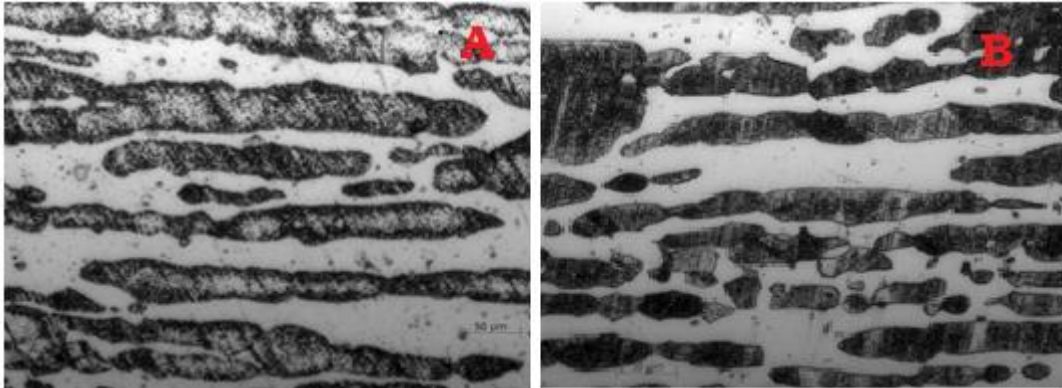


Figure IV-8: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a air, A : 2 Heure ;B :4 Heure (agrandissement X500)

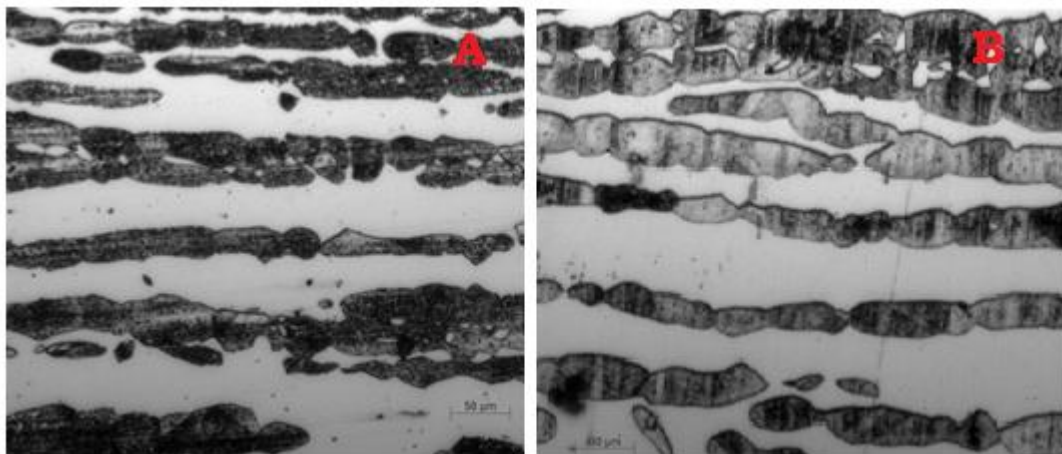


Figure IV-9 : Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a eau, A : 2 Heure ;B :4 Heure (agrandissement X500)

Les aciers inoxydables duplex une fois exposés à des températures comprises entre 650°C et 1000°C sont subit à une précipitation de phases secondaires.

Dans cette intervalle de température l'austénite ne subit aucune transformation tandis que la ferrite, à des températures inférieures à 1000°C c'est une phase métastable, et en raison de la faible compacité de son réseau cristallin cubique centré, les éléments d'alliages tel que le Cr diffusent plus rapidement dans la ferrite que dans l'austénite.

- **Duplex à 1150°C :**

Les *Figures IV-10 et VI-11* regroupent les microstructures des échantillons après un traitement thermique à 1150°C suivi par un refroidissement à air et une trempe à l'eau.

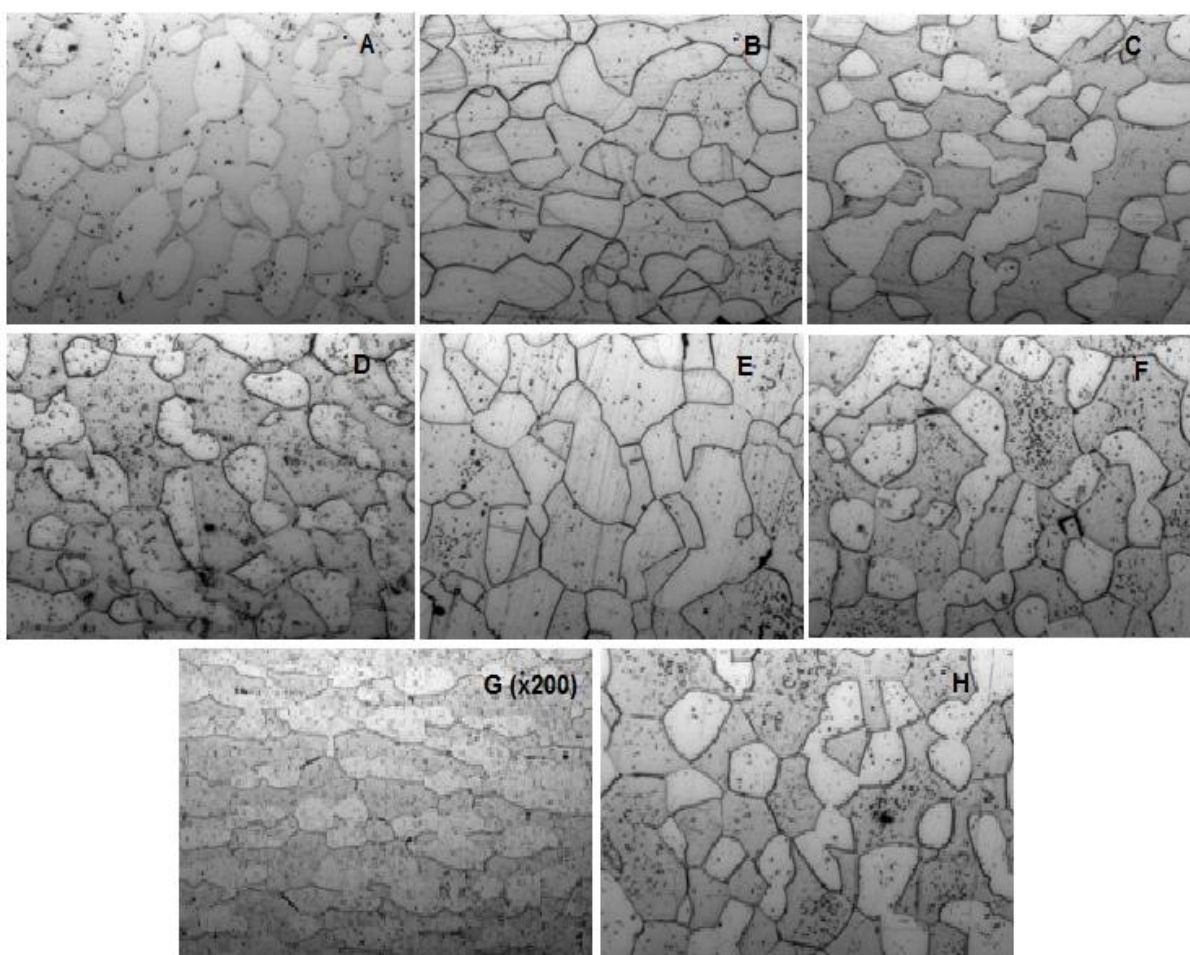


Figure IV-10: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement à Air,

A :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h
(agrandissement X500)

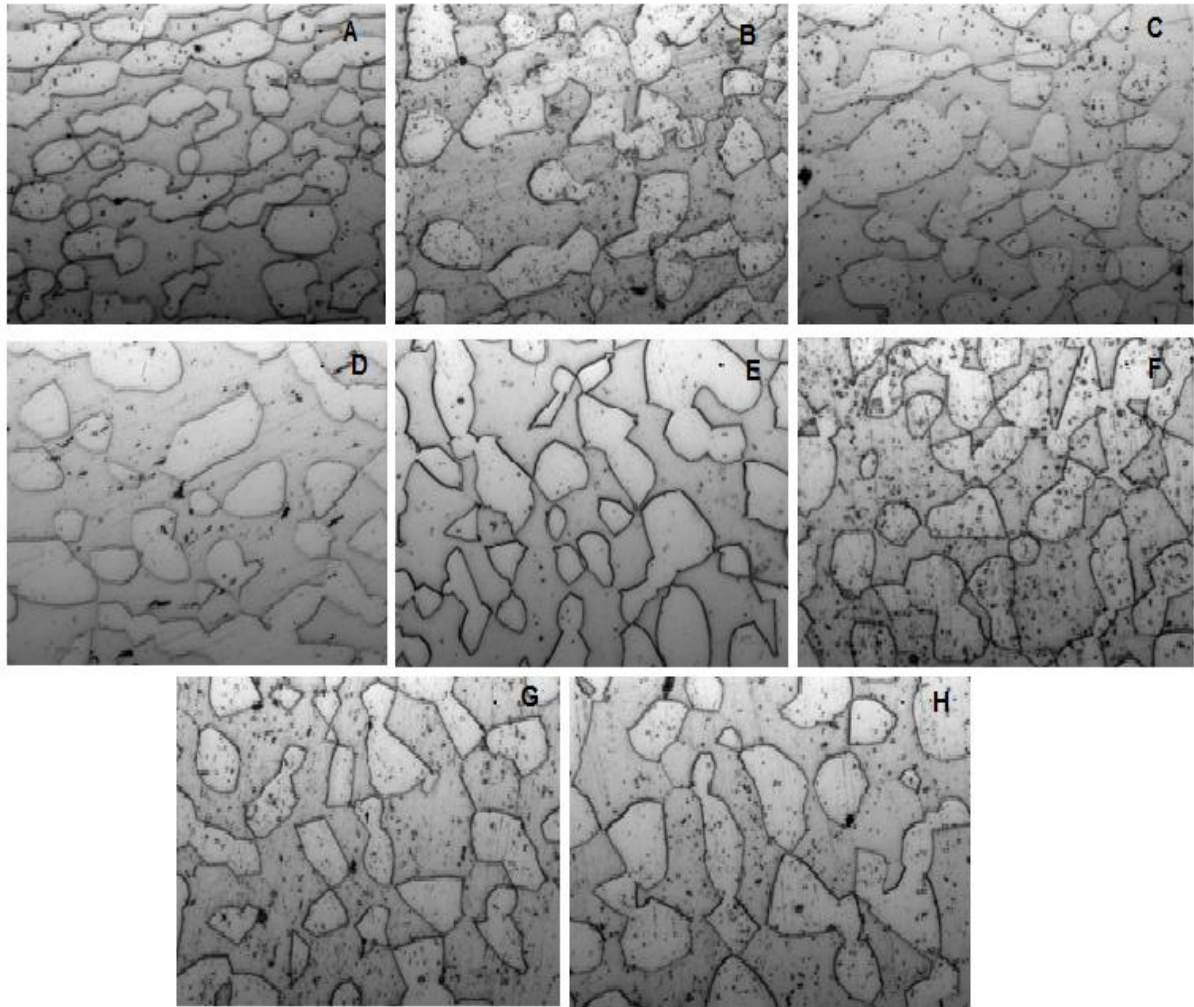


Figure IV-11: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement à eau,
A :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h
(agrandissement X500)

Dans cette partie du traitement thermique nous suivent l'évolution de la microstructure chaque 30 min en effectuant deux types de refroidissement, nous remarquons une homogénéisation de la taille des grains avec une augmentation de la phase de la ferrite cela est mieux fait dans le cas du refroidissement rapide (la trempe).

IV.2.3. résultats d'études par courants de Foucault :

L'utilisation des courants de Foucault sont très importante dans l'évaluation des microstructures. Nous allons étudier le comportement des matériaux par les diagrammes d'impédance sur les différents milieux étudiés pour nos matériaux.

Les résultats obtenus par courant de Foucault présente une bonne cohérence.

- **Aluminium 2024 Brute :**

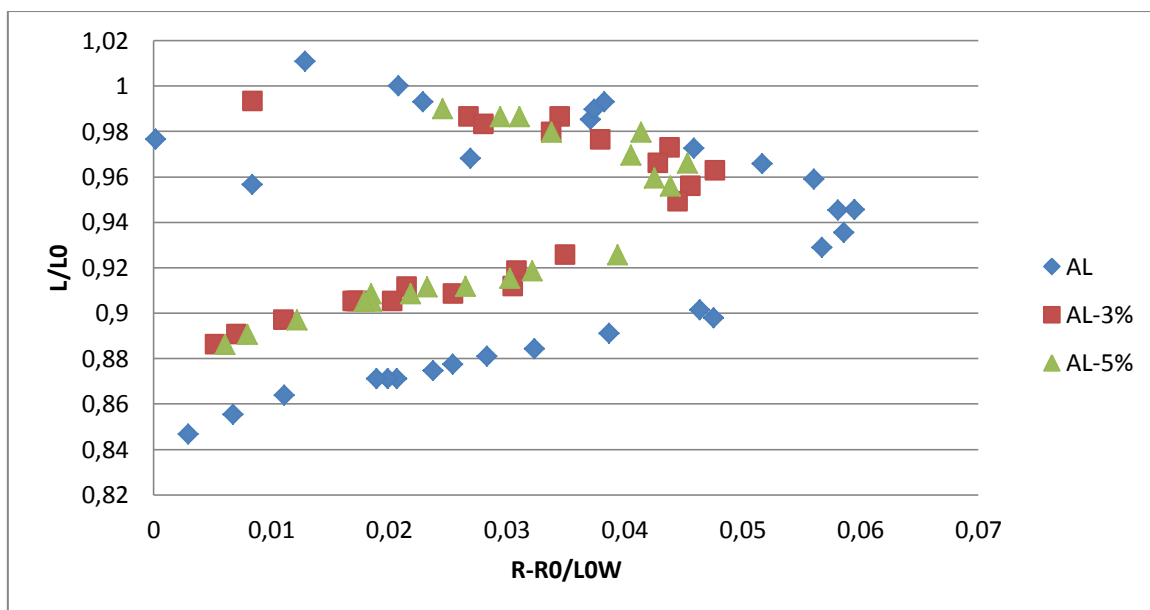


Figure IV-12: superposition de diagramme d'impédance Aluminium 2024 PUR et émergé dans HCL 3% et 5% pendant 2 jours

Pour l'aluminium nous remarquons que les trajectoires ne sont pas les mêmes. L'aluminium ayant subi une attaque à 3% et 5% pendant deux jours présente des impédances différentes à haute fréquence. Ce qui montre que l'attaque chimique est en surface.

• Titan (TA-6V) à 950°C :

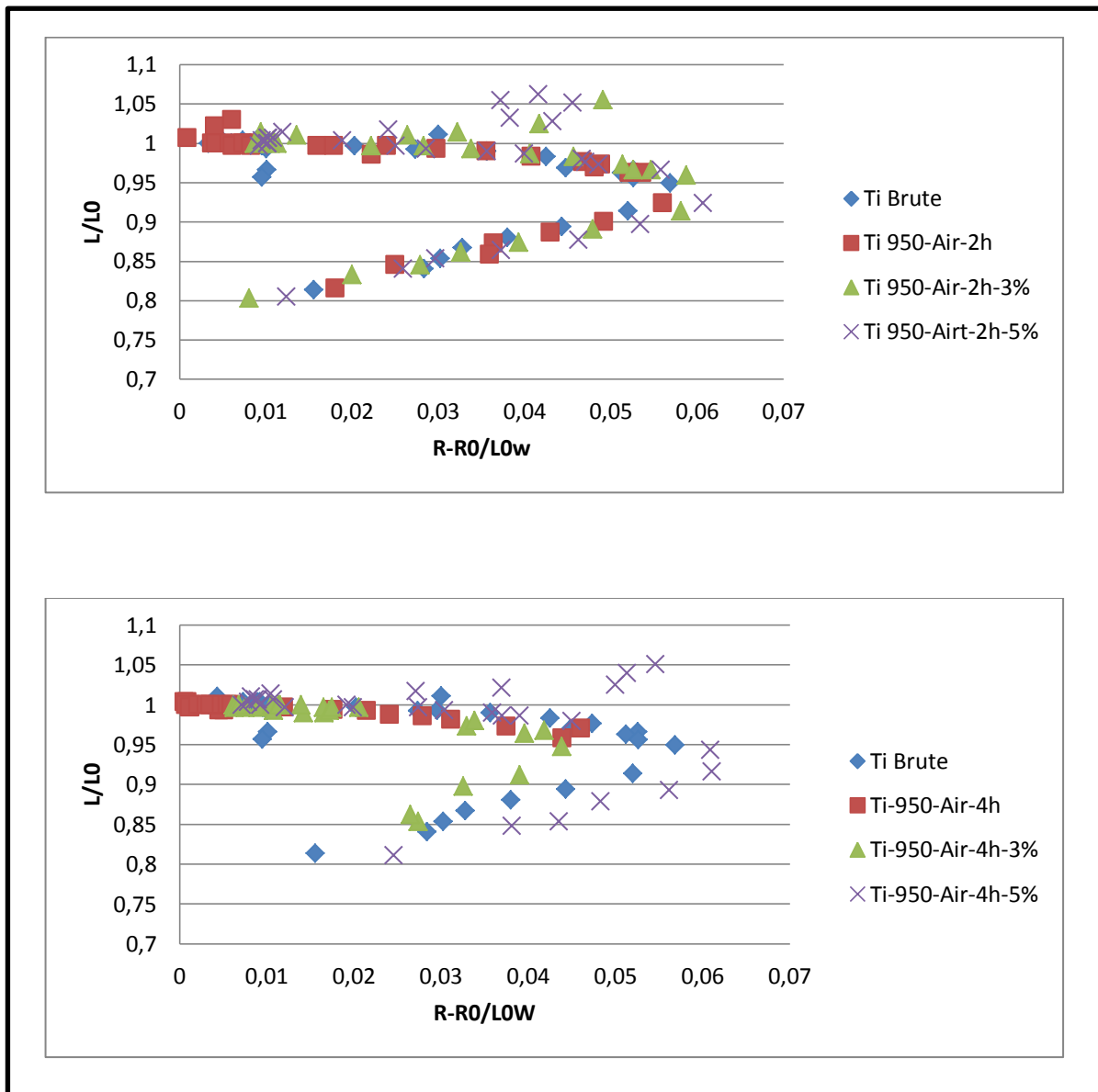


Figure IV-13: superposition de diagramme d'impédance Titane TA6V traité thermiquement a 950°C avec refroidissement à air

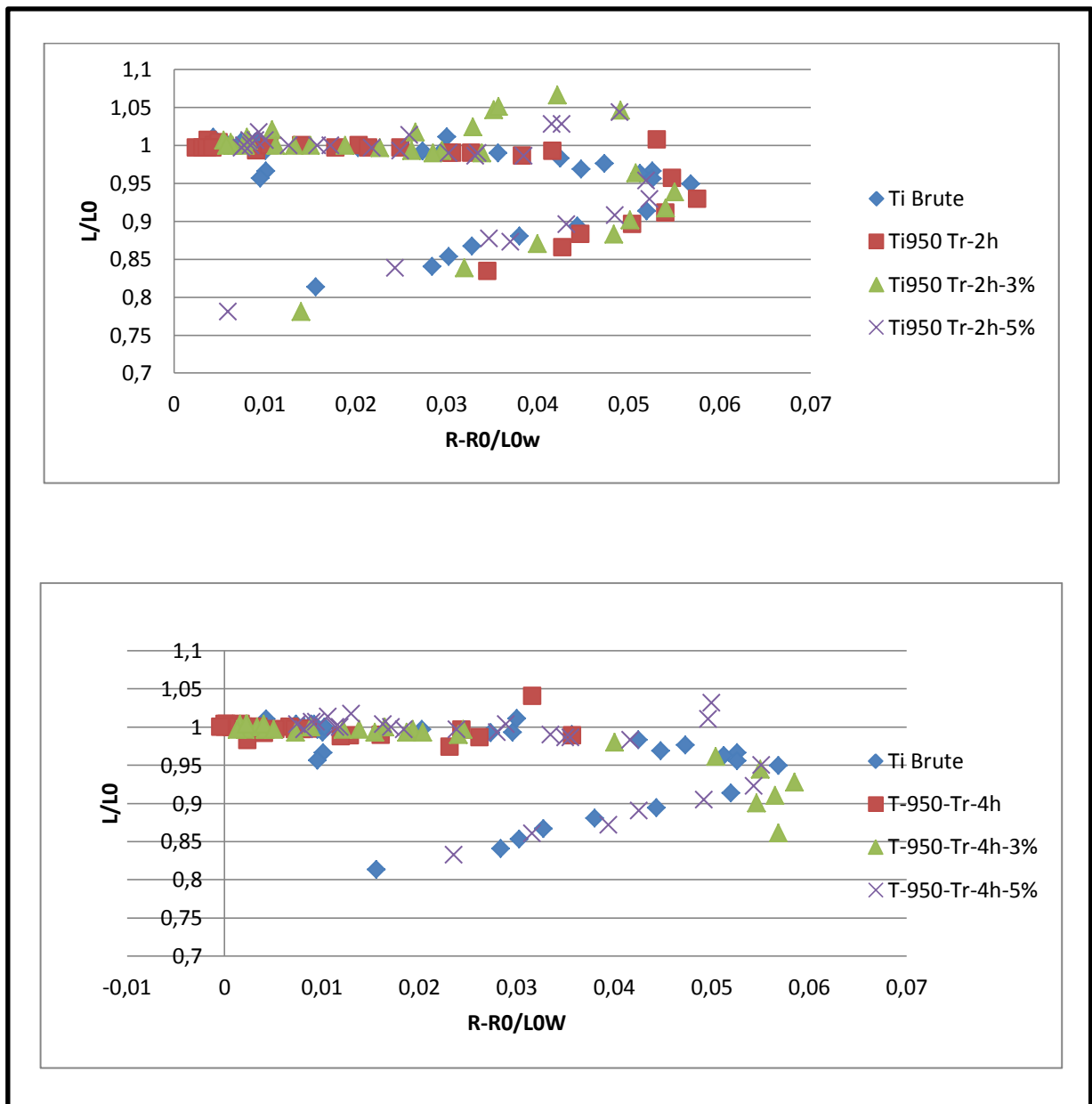


Figure IV-14: superposition de diagramme d'impédance Titane TA6V traité thermiquement a 950°C avec refroidissement à eau

- **Titane (TA-6V) à 1150°C -Air :**

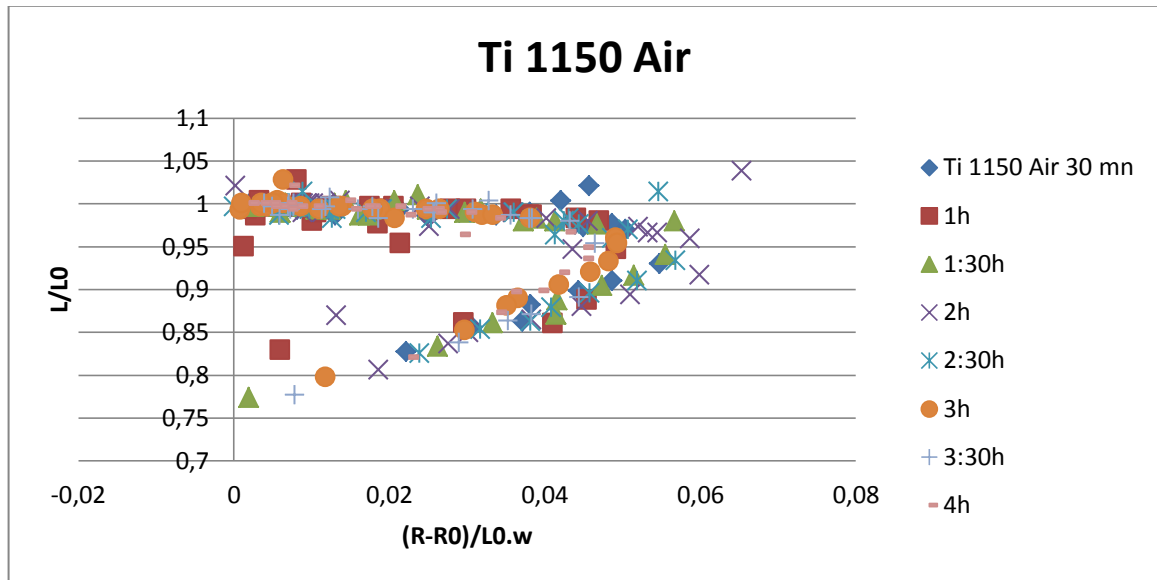


Figure IV-15: superposition de diagramme d'impédance Titane TA6V traité thermiquement à 1150°C avec refroidissement à air

- **Titan (TA-6V) à 1150°C-Tr :**

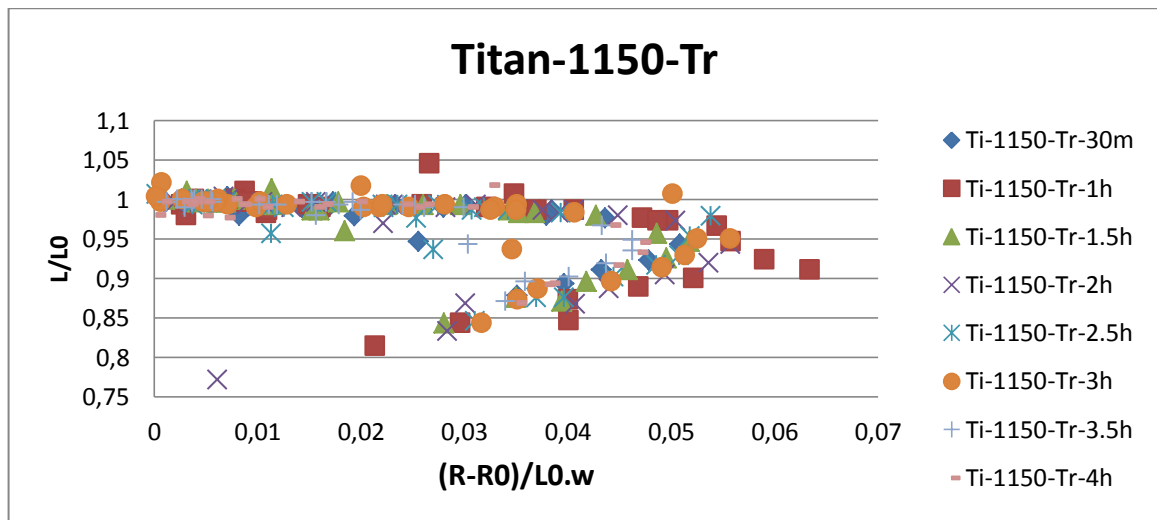


Figure IV-16: superposition de diagramme d'impédance Titane TA6V traité thermiquement à 1150°C avec refroidissement à air

• **Titane (TA-6V) brute:**

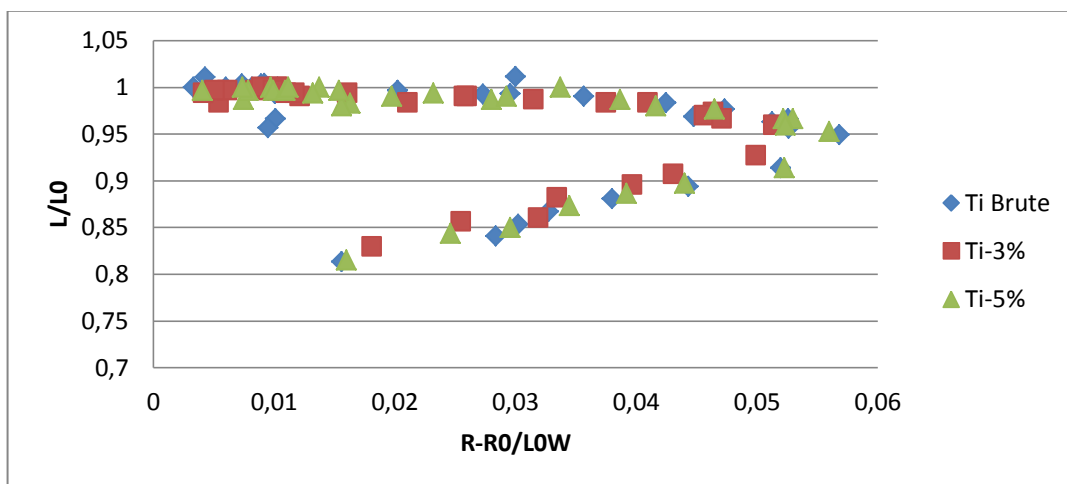


Figure IV-17: superposition de diagramme d'impédance Titane TA6V PUR et émergé dans HCL 3% et 5% pendant 15 jours

Pour le titane, une remarque importante est à considérer à partir des D.I. est qu'il est résistant corrosif, en effet les trajectoires obtenues de D.I. sont presque superposées.

Malgré que le titane traité thermiquement à partir de 1150°C c présente de faiblesse structurale car les trajectoires des D.I. sont légèrement éparées.

• **Duplex 2205 brute :**

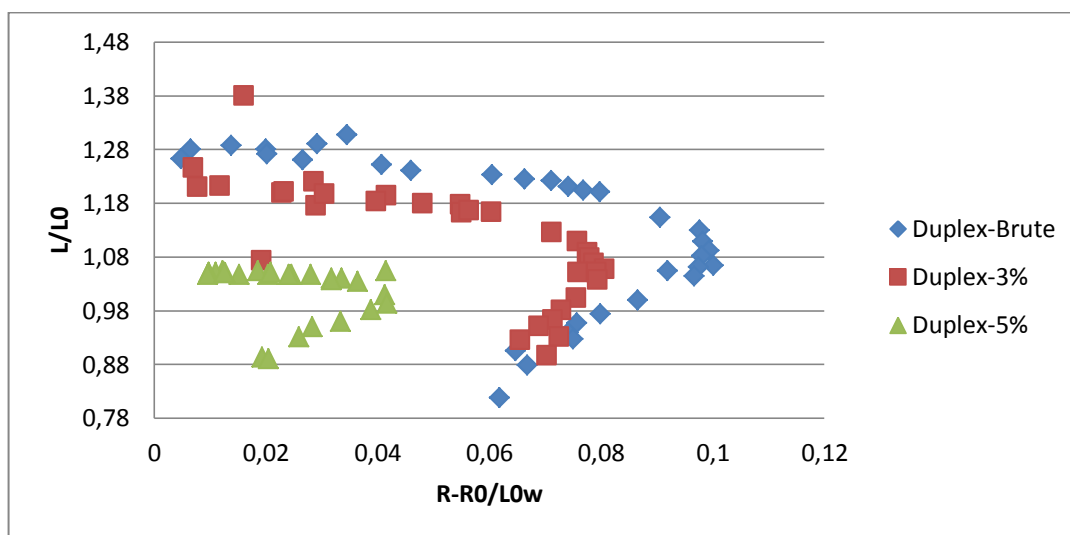


Figure IV-18: superposition de diagramme d'impédance Duplex 2205 PUR et émergé dans HCL 3% et 5% pendant 15 jours

• Duplex 2205 à 950°C :

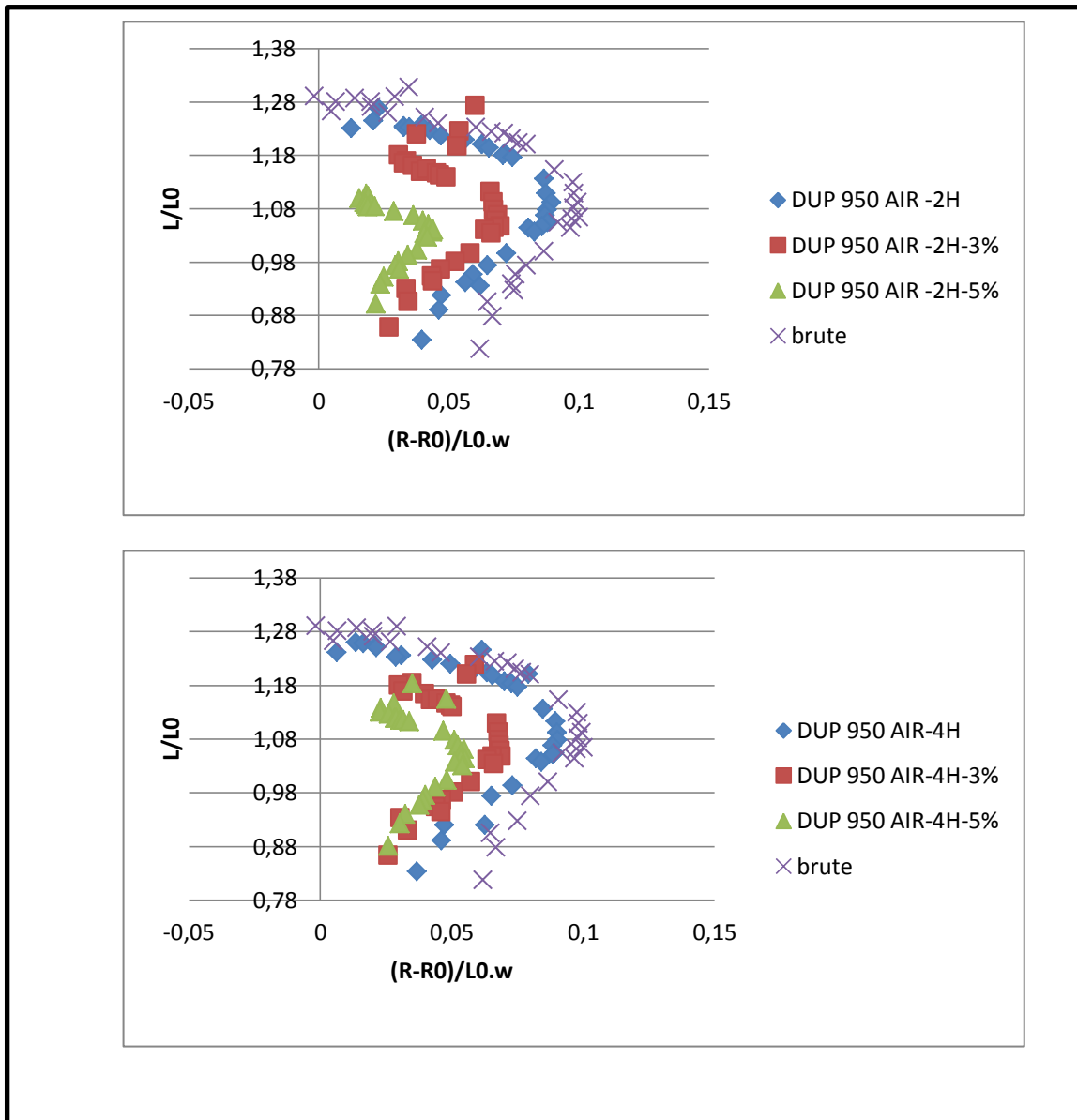


Figure IV-19: superposition de diagramme d'impédance Duplex traité thermiquement a 950°C avec refroidissement à air

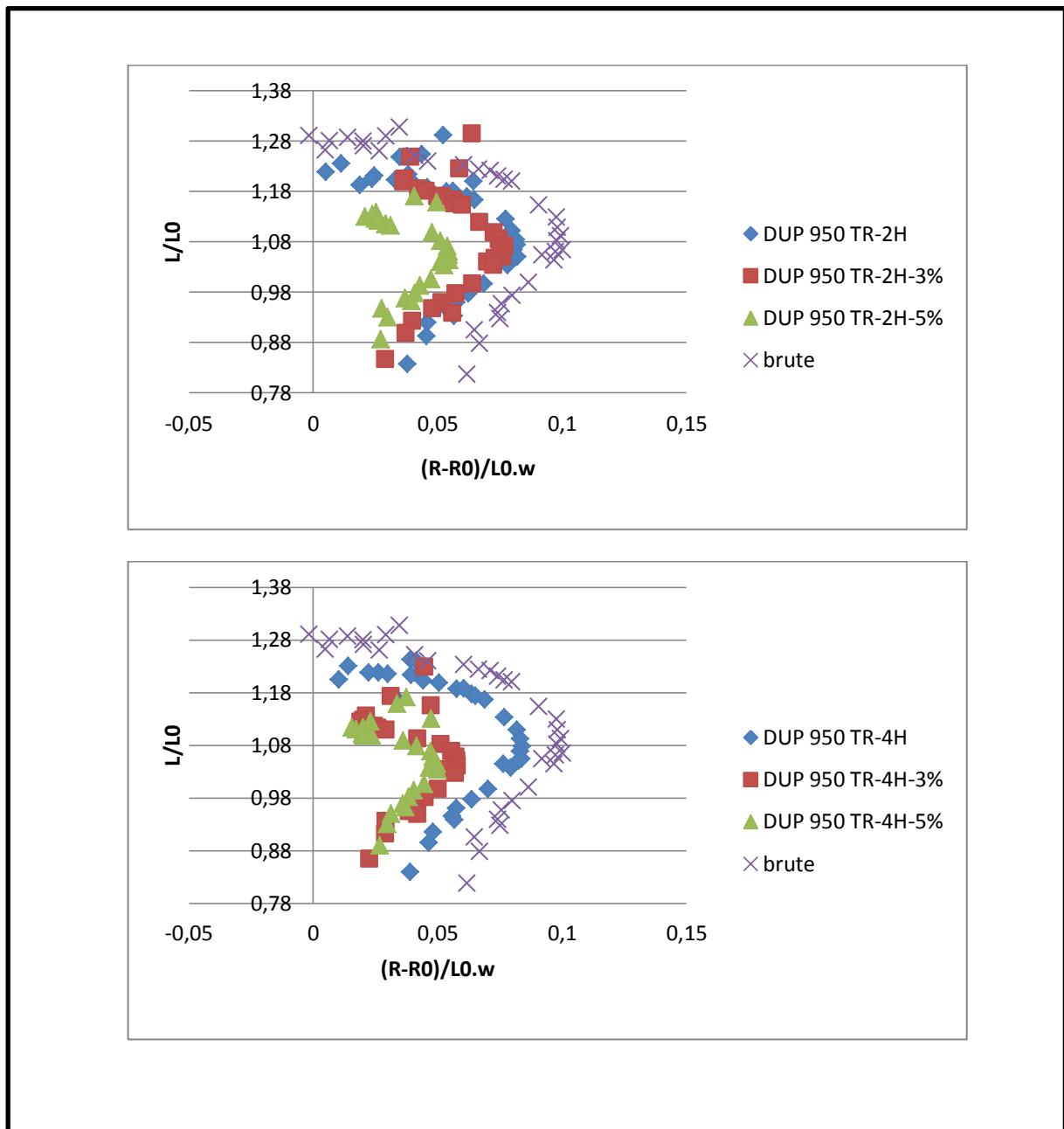


Figure IV-20: superposition de diagramme d'impédance Duplex traité thermiquement a 950°C avec refroidissement à eau

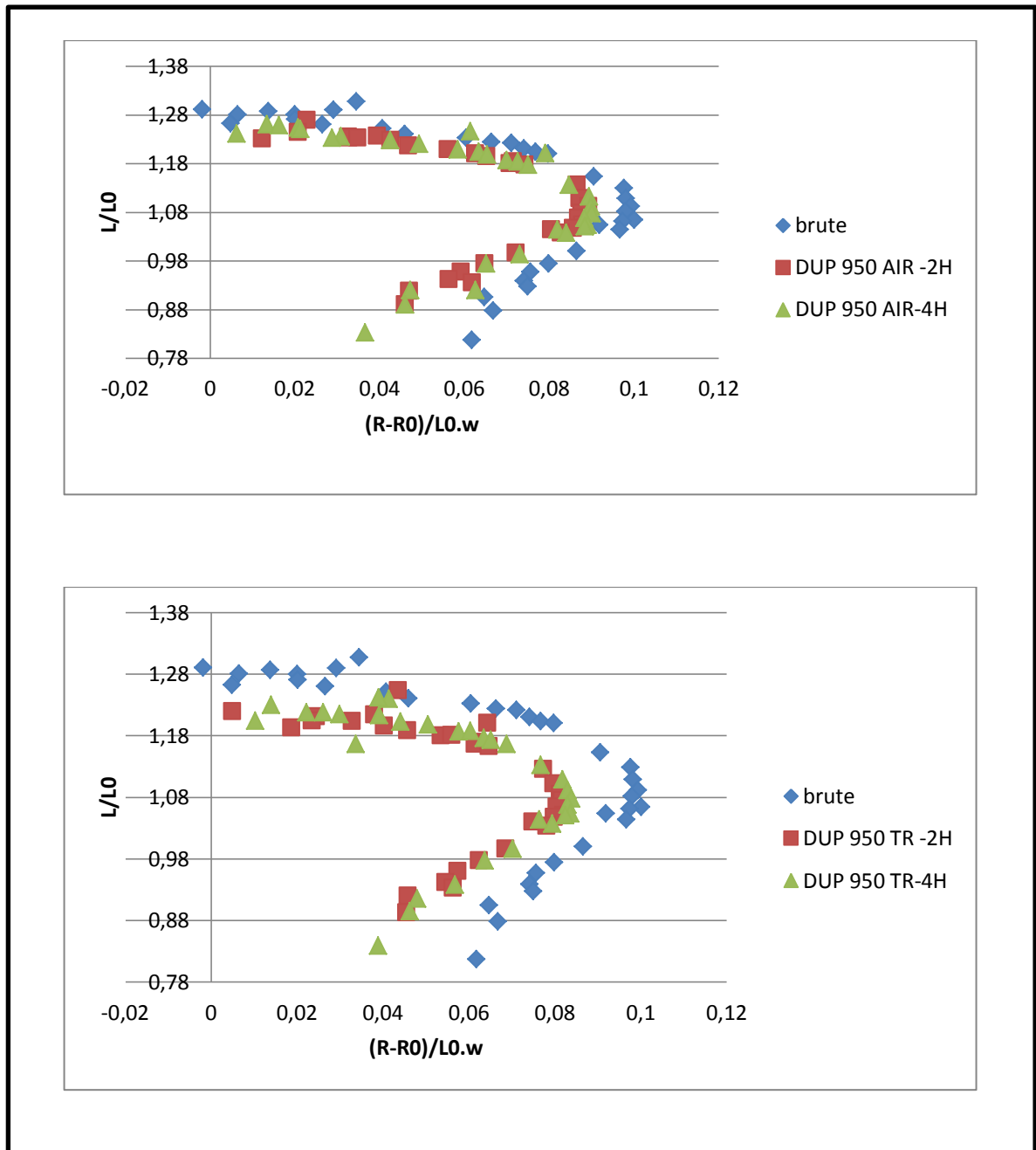


Figure IV-21: superposition de diagramme d'impédance Duplex 2205 traité thermiquement a 950°C avec refroidissement à air et trompé avec temps de maintien 2h et 4h

- Duplex 2205 à 1150°C-Air :

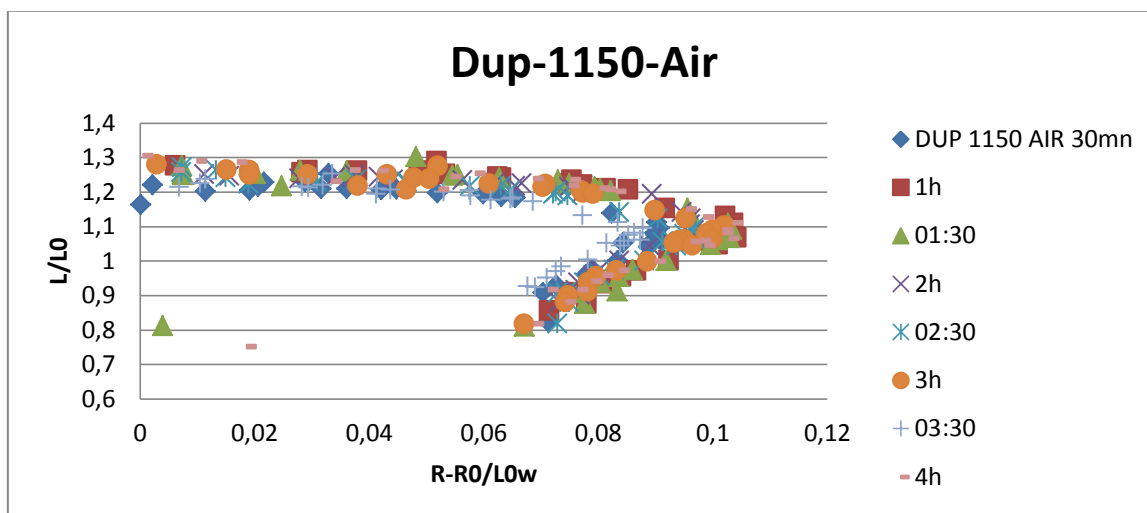


Figure IV-22: superposition de diagramme d'impédance Duplex 2205 traité thermiquement à 1150°C avec refroidissement à air

- Duplex 2205 à 1150°C- Tr :

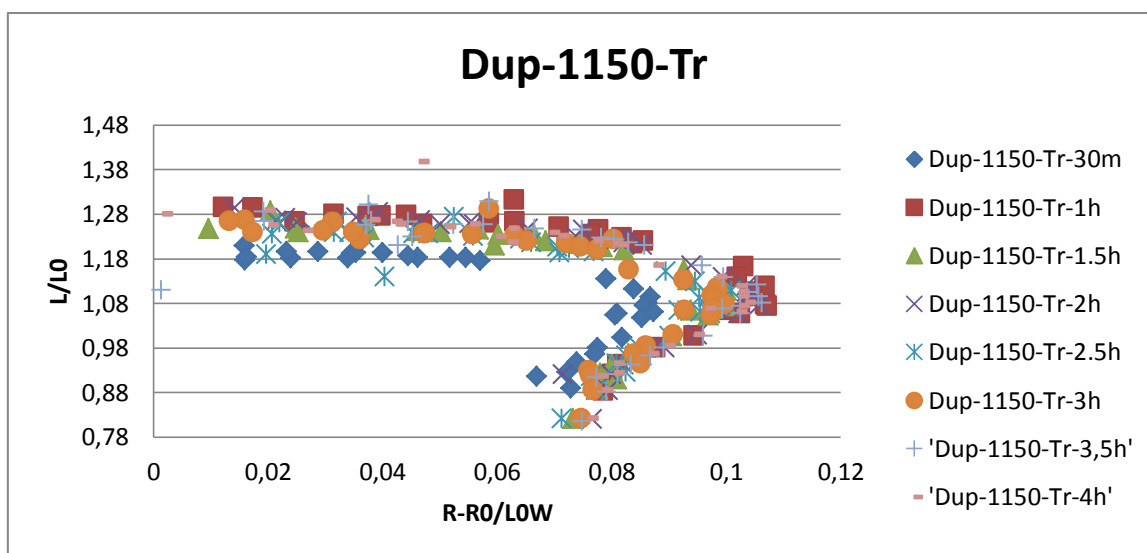


Figure IV-23: superposition de diagramme d'impédance Duplex 2205 traité thermiquement à 1150°C avec refroidissement à eau

Pour le Duplex le traitement thermique affecte les trajectoires de D.I. Ils sont différents selon le traitement défini indiquant que le matériau a subi des modifications microstructurales. Les trajectoires de D.I d'échantillons émergé dans HCL 3% et 5% pendant 15 jours sont très éparpillées à cause d'attaque corrosif malgré c'est un matériau inoxydable.

IV.2.4. Résultats de cycle d'hystérésis par le VSM :

- Duplex 3%:

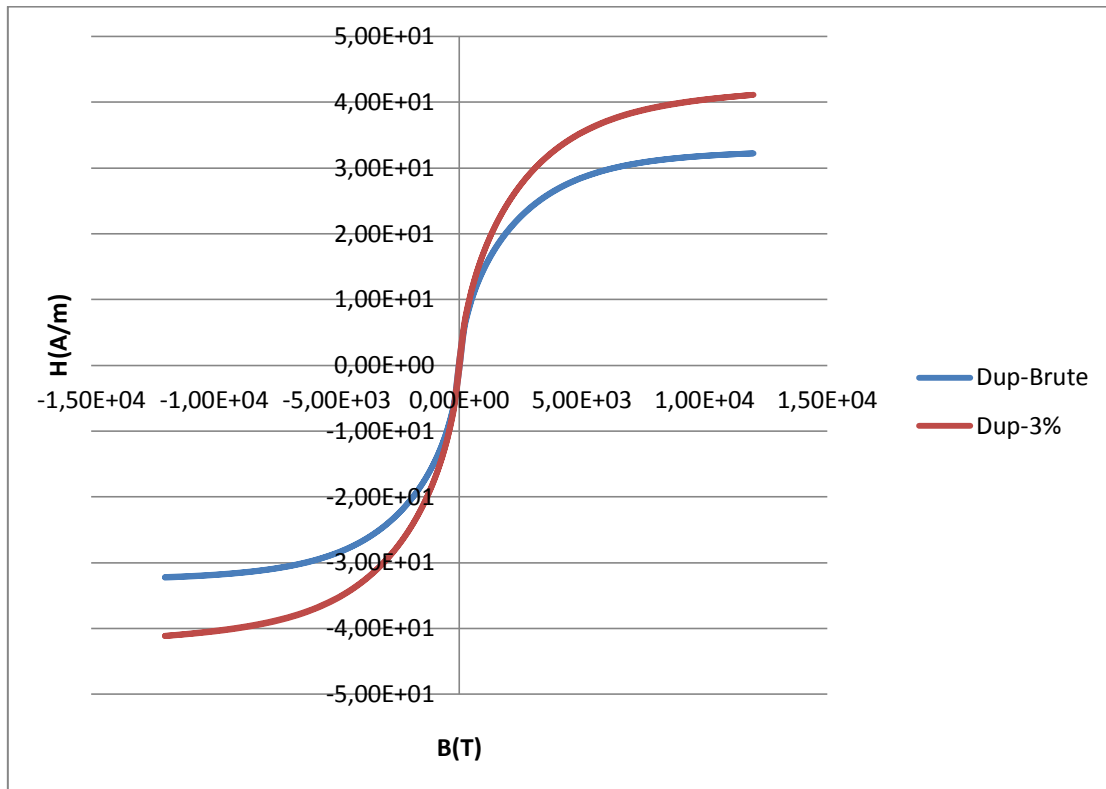


Figure IV-24: superposition des cycles d'hystérésis duplex brute et après l'émersion dans HCL 3%

L'attaque chimique à 3% est constituée dans la variation du cycle d'hystérésis à savoir que la saturation magnétique est différente entre l'échantillon brut et celui soumis à une corrosion.

- **Duplex 950°C-Tr :**

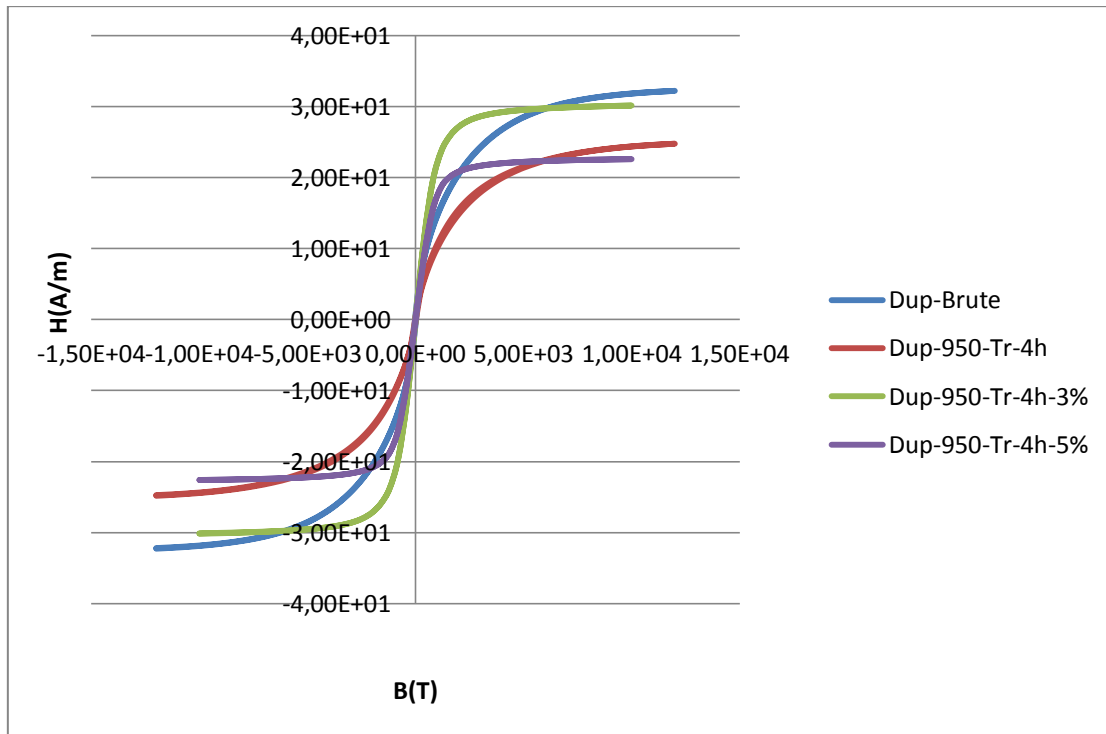


Figure IV-25: superposition des cycles d'hystérésis duplex brute et après le traitement thermique dans 950°C pendant 4h avec l'émergée dans HCL 3% et 5%

Une remarque importante est à considérer dans le cas en plus de l'état aléatoire des saturations est le coude de saturation qui diffèrent .les échantillons ayant subi une attaque corrosive ont un coude de saturation situé avant les échantillons non traité chimiquement, cela à la température de 950°C.

- Duplex 950°C-Air :

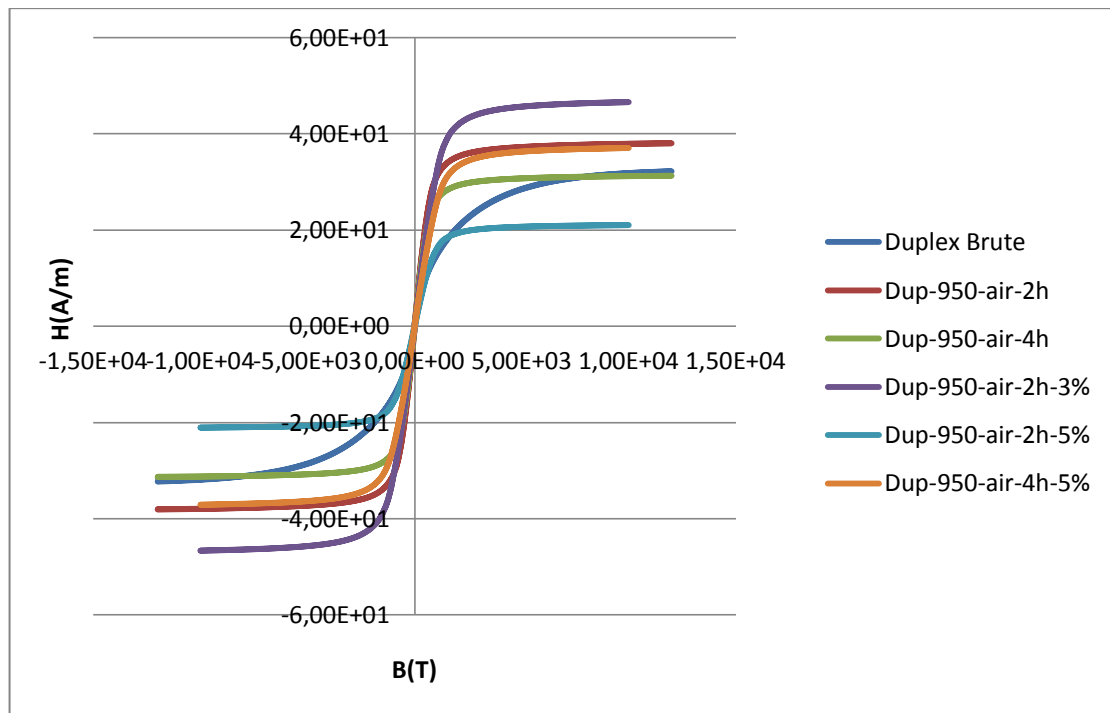


Figure IV-26: superposition des cycles d'hystérésis duplex brute et après le traitement thermique dans 950°C pendant 4h et 2h avec l'émergence dans HCL 3% et 5%

Dans le matériau n'ayant pas subi de trempe, nous remarquons que les coudes de saturation sont au même champ magnétique. Mais pour la saturation une étude statique doit être en refaire pour le cas à 950°C contrairement au 1150°C où l'évolution de courbe est nette.

Une étude métallurgique est nécessaire.

- **Duplex 1150°C-Tr :**

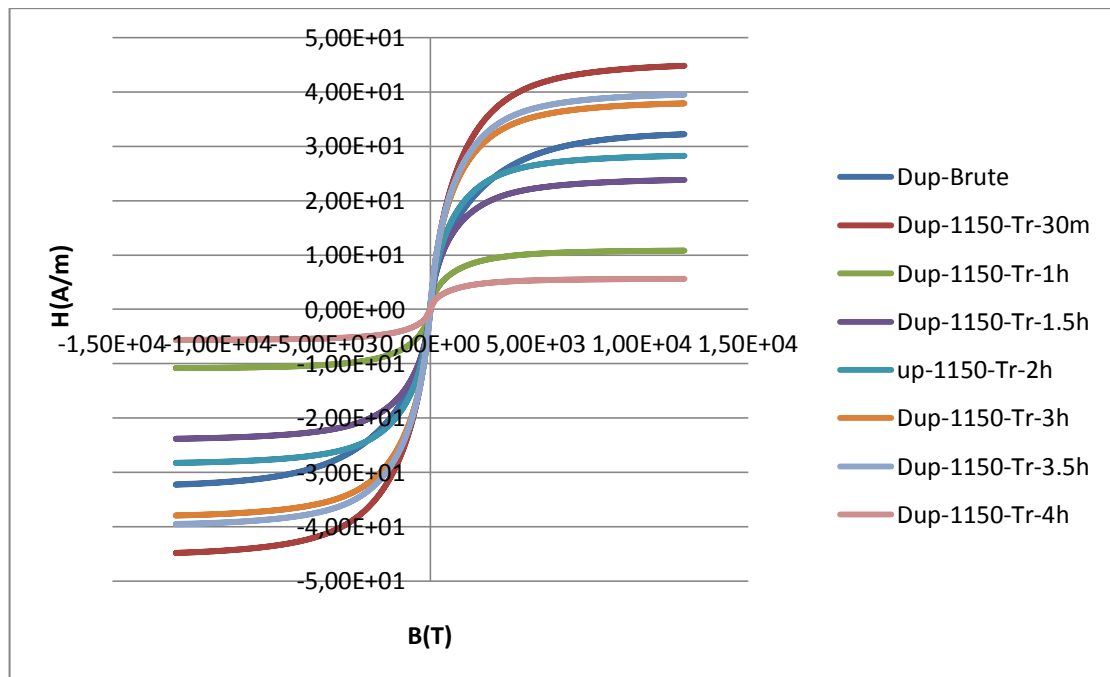


Figure IV-27: superposition des cycles d'hystérésis duplex 1150 trempé chaque 30 mn pendant 4 heures

Une représentation graphique des cycles d'hystérésis montre que les matériaux trempés à différents temps de maintien en chauffe ont subi énormément de variation microstructurale liée au paramètre magnétique par la saturation. En effet, on remarque que les saturations sont aléatoires en fonction du temps de maintien, ce qui montre qu'on a procédé à des affectations au niveau des états de germination des grains (Phase). Une étude comparative avec les micrographies est nécessaire.

- Duplex 1150°C-Air :

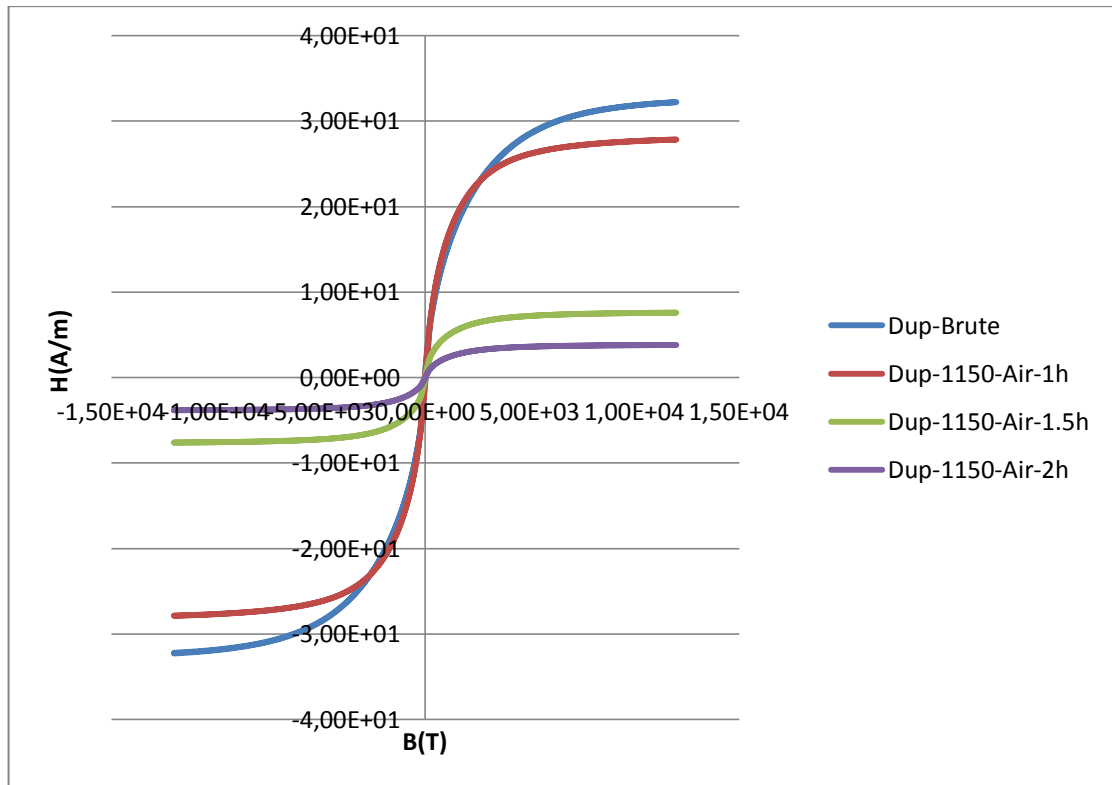


Figure IV-28: superposition des cycles d'hystérésis duplex brute et avec traitement thermique 1150 °C refroidie à air de différents temps de maintien

Les échantillons trempés soumis à de temps de maintien sont en relation avec le comportement magnétique du matériau. Les matériaux ayant subi des temps de maintien élevé perdent de leurs qualités magnétiques.

La saturation devient plus faible et n'atteint pas de valeur élevée.

CONCLUSION

Trois nuances de l'alliage ont été étudiées. La nuance de l'aluminium 2024 est un alliage standard pour les applications aéronautiques, le titane TA6V qui bien que développé au départ pour des applications aéronautiques, représente aujourd'hui l'essentiel du marché du fait de la bonne maîtrise de sa métallurgie, ainsi l'alliage duplex 2205 le matériau présent beaucoup plus dans les pièces de frottement. L'objectif était d'étudier le comportement des matériaux revêtus vis-à-vis de l'oxydation à haute température et dans des milieux corrosifs en appliquant un contrôle non destructif sur nos échantillons. Les matériaux traités ont été testés à deux températures : 950°C, 1150°C avec plusieurs temps de maintien et refroidie selon deux mode : rapide et lent.

Dans le cas d'aluminium 2024, le matériau à l'état initial a représenté une faible résistance à la corrosion dans le milieu acide, il a subit une dissolution complète dans moins de 72 heures d'émersion.

Les propriétés de résistance à la corrosion de l'alliage de titane (TA6V) lui confèrent des bonnes propriétés en milieux hostiles, le secteur aéronautique est le plus grand consommateur d'alliages de titane, et son activité règle le marché financier du titane.

L'explosion des matériaux composites dans l'aéronautique pourrait laisser croire à une baisse de l'utilisation du titane dans le futur. En réalité, les alliages de titane vont voir leur utilisation croître, car les alliages d'aluminium et les fibres de carbone composant les tissus composites sont électrochimiquement incompatibles, créant un couple galvanique s'ils sont en contact. La conséquence de cette réaction chimique est l'accroissement de l'utilisation de titane, qui lui est stable au contact des fibres de carbone.

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est basée sur un alliage du chrome au fer, et dépend de la formation d'une couche de surface aux oxydes passive, qui se reconstruit spontanément lorsque endommagée mécaniquement.

Une variété de différents types de corrosion peut apparaître, tels que les piqûres, la contrainte, la corrosion intercrystalline ou vibrationnelle. Une résistance améliorée à toute forme d'attaque spécifique peut être prodiguée en ajoutant des éléments d'alliage autres que le chrome, par exemple le molybdène, qui améliore la résistance contre la corrosion par piqûres.

Dans ce mémoire nous sommes concentrés sur le contrôle non destructif et les besoins industriels croissants qui ont provoqué le rapide développement de ce domaine de recherche. L'intérêt est de pouvoir vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. En particulier, nous avons contrôlé nos matériaux par les courants de Foucault et le cycle d'hystérésis.

On peut dire que le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit aux cours de la production ou de l'utilisation. C'est ce qui a rendu le CND indispensable pour toute industrie pétrolière, automobile, aéronautique, aérospatiale.

Toutes les expériences de ce travail ont été réalisées au sein de centre de soudage et de control (CSC) Chéraga.

Les résultats par les méthodes de contrôle non destructif montré que ces matériaux ont subit des différentes variations importantes lors de l'accélération corrosive.

Enfin, ce travail nous a permis de travailler dans une équipe de recherche et d'approfondir nos connaissances en métallurgique, et d'assimiler les techniques de contrôle non destructif.

REFERENCE

- [1] Frédéric B "Déchirure ductile des tôles minces en alliage d'aluminium 2024 pour application aéronautique», 2004
- [2] COMBRES (Y.) et CHAMPIN (B.). "Traitements thermiques des alliages de titane". M 1 335. Traité Matériaux métalliques, volume M4, 1995.
- [3] J.Claude "Mémo, matériaux, métaux et alliages" : guide pratique, 2008.
- [4]: F. Prima "Etude métallurgique d'un nouvel alliage de Titane β -métastable" Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, 2000.
- [5] OUALI N "Comportement au vieillissement et à la restauration par traitement thermique de l'acier inoxydable austéno-ferritique 2205" 2012.
- [6] P. L.Veronique Nobel, 2004, Université pierre & marie curie, Paris, France
- [7] W.J. lorenz, F.Mansfeld, 1985, producers of the 16th European symposium on corrosion inhibitors, Ferrara,Italy.
- [8] D. Landot, 1993, corrosion et chimie de surface des métaux, presses polytechniques et universitaire de Romandes, Lausanne, France.
- [9]Chiara Z- "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques" : de l'expérience au modèle d'interaction, 2012
- [10]H.AMIROUCH Approche physique dans la détermination CND
- [11] Jack Blitz and Geoff Simpson "Ultrasonic methods of non-destructive testing" Chapman & Hall 1996
- [12] F. LESBRE "applications de la thermographie infrarouge au contrôle non destructif des matériaux composites utilisés en construction NAVAL" La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1.992
- [13] Aurélie Hugamarlic "Etude par mesure du bruit barkhausen de la microstructure et de l'état de contrainte d'acier biphasé mars 2007
- [14] AMIR BEN MENACER "Etude de la microdureté Vickers des poudres chimiques de Ni -P" Batna 2012

ANNEXE

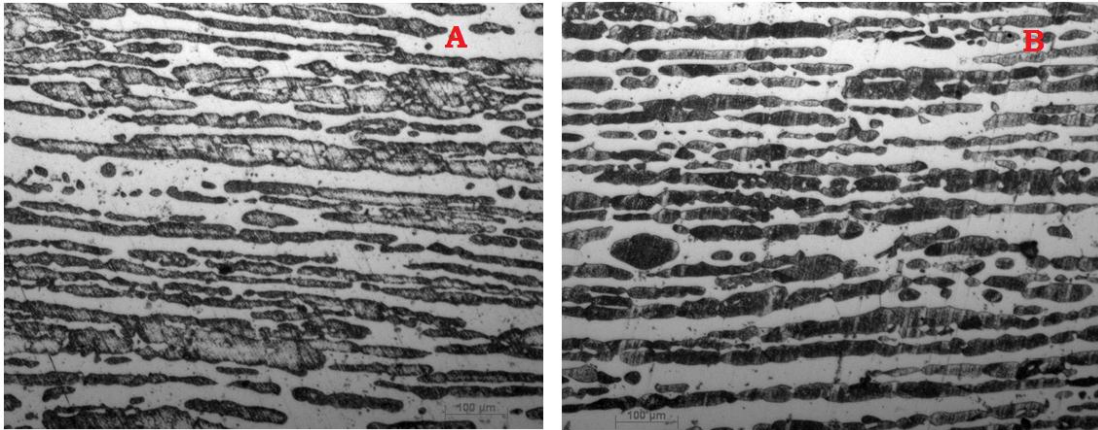


Figure: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a air, **A** : 2 Heure ; **B** : 4 Heure (agrandissement X200)

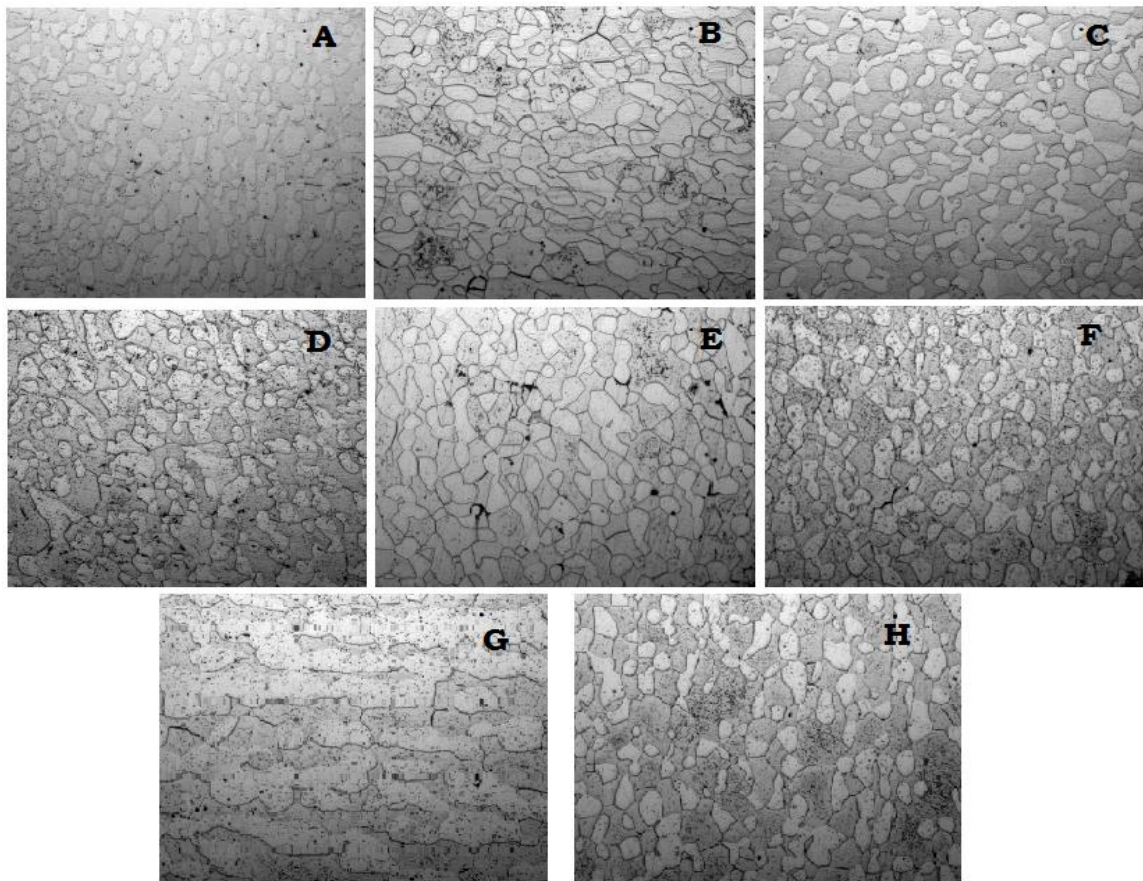


Figure: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement a Air, **A** : 30mn ; **B** : 1h ; **C** : 1.5h ; **D** : 2h ; **E** : 2.5h ; **F** : 3h ; **G** : 3.5h ; **H** : 4h (agrandissement X200)

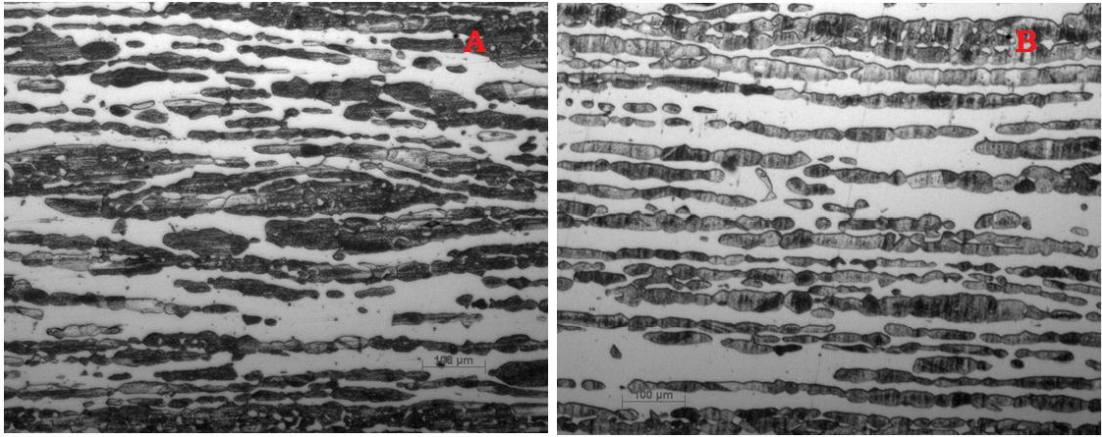


Figure: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a eau, **A** : 2 Heure ; **B** :4 Heure (agrandissement X200)

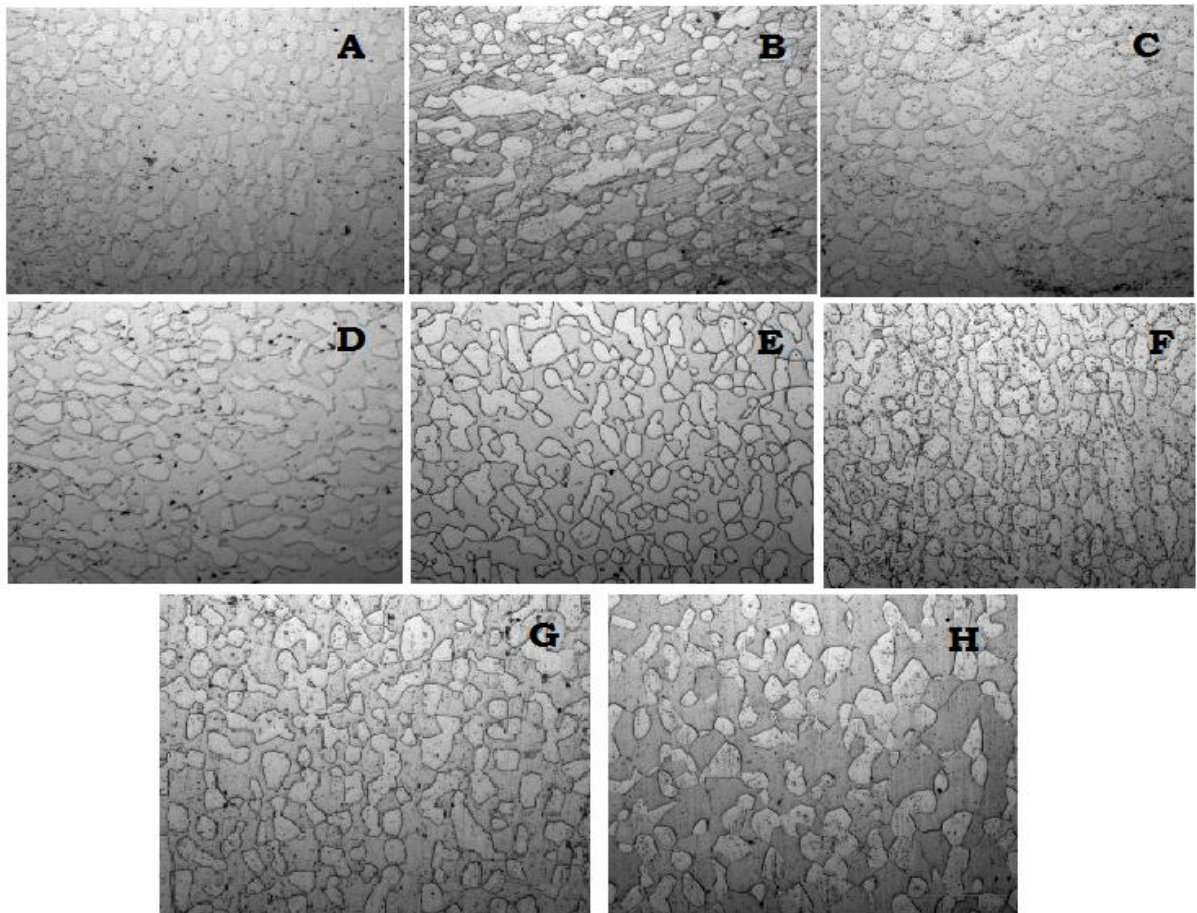


Figure: Microstructure Duplex 2205 subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement a eau,
A :30mn ; **B** :1h ; **C** :1.5h ; **D** :2h ; **E** :2.5h ; **F** :3h ; **G** :3.5h ; **H** :4h
 (agrandissement X500)

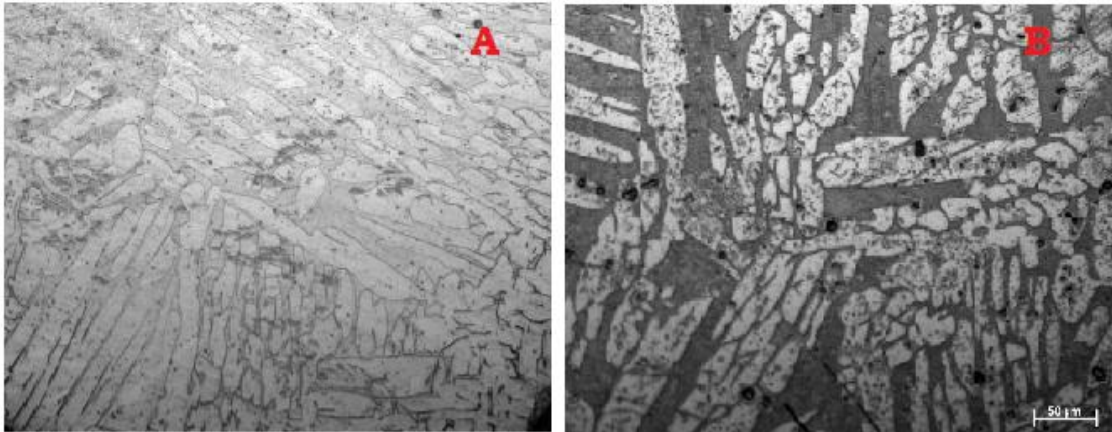


Figure : Microstructure TA-6V a subit a un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a air, **A** : 2 Heure ; **B** : 4 Heure (agrandissement X200)

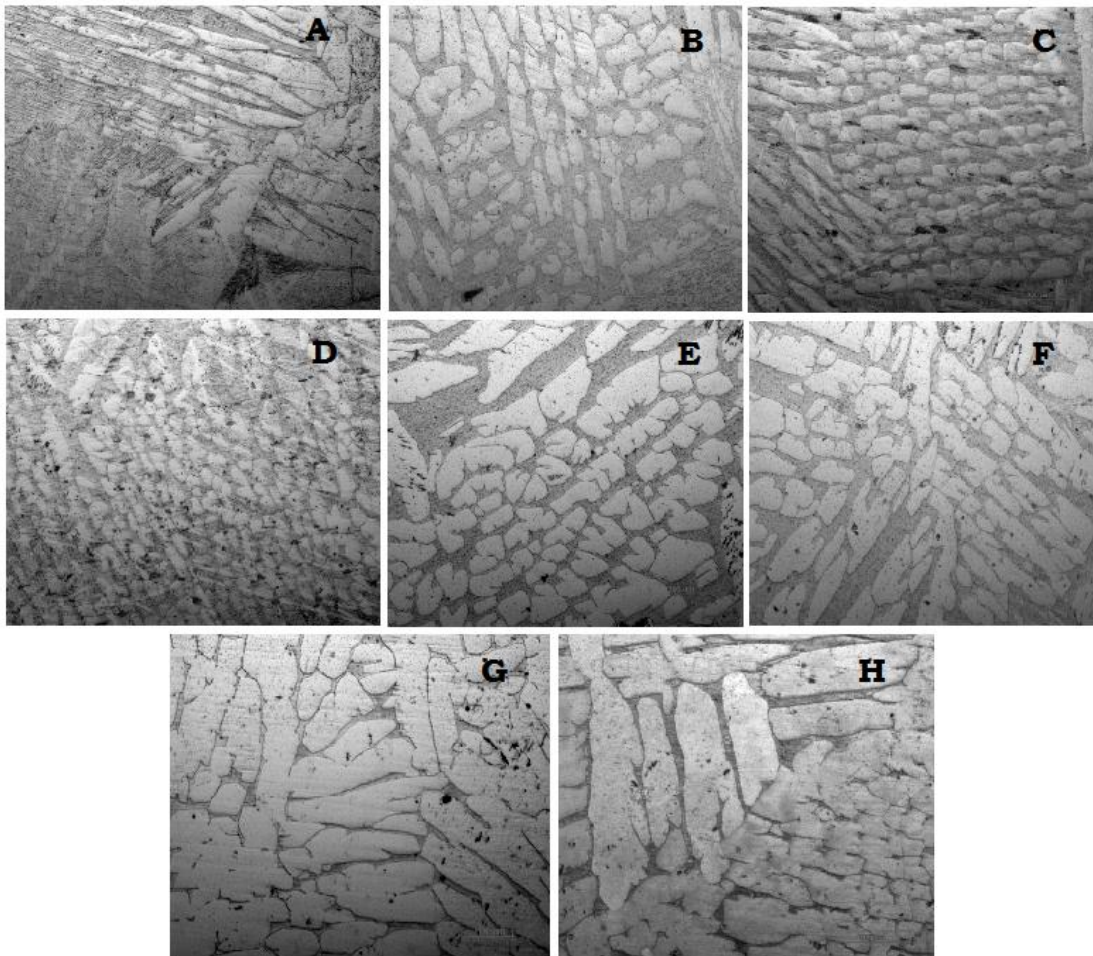


Figure: Microstructure TA6V subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement a Air, **A** :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h (agrandissement X200)

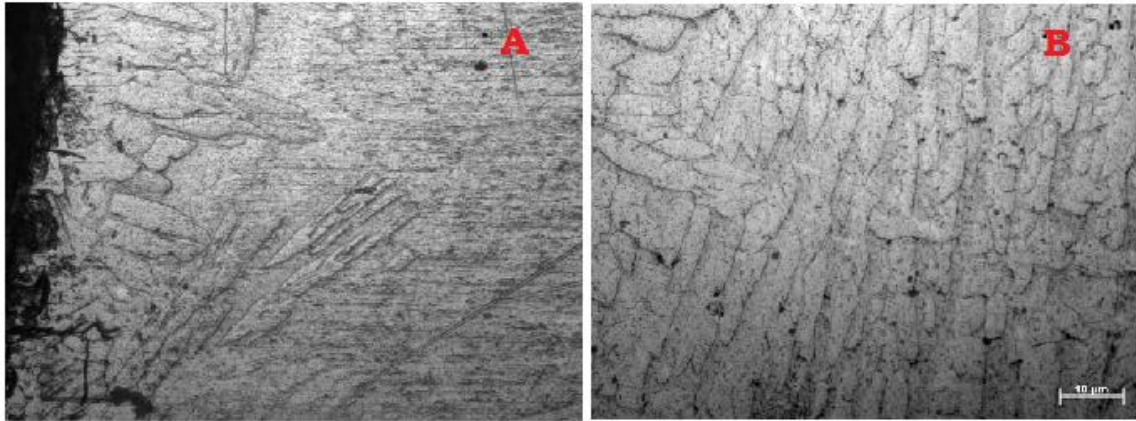


Figure: Microstructure TA-6V a subit a un traitement thermique (950°C) avec refroidissement a eau, **A** : 2 Heure ; **B** : 4 Heure (agrandissement X200)

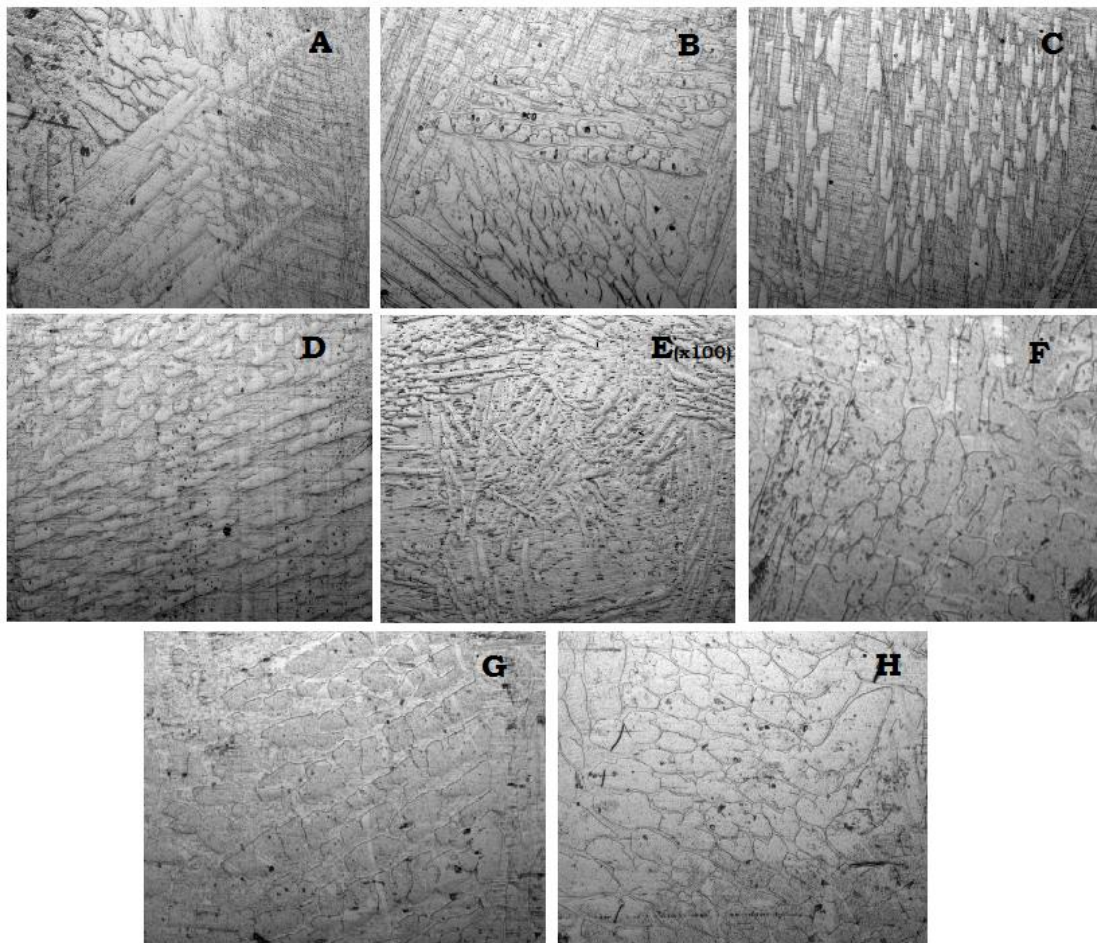


Figure: Microstructure TA6V subit à un traitement thermique (1150°C) avec refroidissement a eau,
A :30mn ;**B** :1h ;**C** :1.5h ;**D** :2h ;**E** :2.5h ;**F** :3h ;**G** :3.5h ;**H** :4h
 (agrandissement X200)