

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieure et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE SAAD DAHLED DE BLIDA
Faculté des Sciences de l'ingénieur
Département d'Aéronautique

009/011



PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN
AERONAUTIQUE

OPTION : PROPULSION
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

THEME
Analyse et Comportement des Matériaux Soumis a des
Contraintes Axial et Thermique Par CND

Réalise par :

NEFOUCI Soumia

Proposé et dirigé par :

Dr. ZERGOUG Mourad

2010/2011

RESUME

Notre travail à pour objectif d'étudier les contraintes interne et la propagation des fissures subie dans les matériaux sous l'effet de la chaleur, en l'occurrence l'Aluminium 2024 et le Titane TA6V, ainsi que l'acier noir XC38 (non galvanisé et galvanisé) par les méthodes du contrôle non destructif, en précisant les courants de Foucault, les Bruits de Berkhausen et la thermographie infrarouge, en appliquant les essais de tractions a hautes températures sur des éprouvettes normalisées . Les résultats obtenus sont très satisfaisantes par rapport aux cas de validation

Abstract

Our work aims to study the internal stresses and crack propagation in material incurred as a result of heat. in this case aluminum 2024 and titanium TA6V, and the black steel XC38 (not galvanized and galvanized) by the methods of nondestructive testing, specifying the eddy current noise Berkhausen and infrared thermography, using tensile tests at high temperature on the standard specimens. The results obtained are very satisfactory compared to the case of validation.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الاجهادات الداخلية وانتشار التصدعات التي تتعرض لها المعادن تحت تأثير الحرارة ناخذ الالومنيوم 2024 والتيتان TA6V وايضا الصلب الأسود XC38 (المجلفن و الغير المجلفن) بأساليب غير تدميرية مع تحديد تيارات Foucault وضوضاء Berkhausen و ترموغرافية الأشعة ما تحت الحمراء. مع تطبيق التجارب التمدد تحت درجات حرارة عالية على نماذج محددة، النتائج المتحصل عليها جد مرضية مقارنة مع الحالات المصادق عليها.

TABLE DES MATIERES

RESUME

TABLEAU DES MATIERES

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures et tableaux

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : CONTROL NON DESTRUCTIF

| | |
|--|----|
| Introduction | 01 |
| 1-1- Objectifs du cnd | 01 |
| 1-2- . Principales méthodes de contrôles non destructifs | 01 |
| 1-2-1 Les méthodes de surfaces | 01 |
| 1-2-1-1 Le Contrôle Visuel | 01 |
| 1-2-1-2. le Ressuage | 02 |
| 1-2-1-3 Méthode magnétique | 03 |
| 1.COURANTS DE FOUCAULT | 06 |
| a. Magnétisation et démagnétisation des pièces | |
| b. Mode d'aimantation | |
| 2. Magnétoscopie | |
| a. Détection visuelle par révélateur | |
| b. Procédés à détection automatique de flux de fuite | |
| 3.Bruit de berkhausen | |
| 4.Cycle d'hystérésis | |
| 1-2-1-4. COURANTS DE FOUCAULT | 08 |
| 1. Principe de la détection par courants de Foucault | 08 |
| 2. Répartition des courants de Foucault | 09 |
| a. Loi fondamentale | |
| b. Diagramme d'impédance | |
| 3. Mise en œuvre du sondage par courants de Foucault | 09 |
| a. Principaux paramètres | |
| 4. Montage des sondes | 12 |
| a. Bobine émettrice-réceptrice | |
| b. Bobines différentielles | |
| c. Disposition des bobines | |
| 1-2-1-5. RADIOGRAPHIE | 11 |
| 1-2-2 Les Méthodes de volumétries | 11 |
| 1-2-2-1 ULTRASONS | 12 |
| I. 2. 2. 2. La Thermographie : | 13 |

CHAPITRE II MATERIAUX ET TRAITEMENTS THERMIQUES

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION | 16 |
| I.1. LES ACIERS | 16 |
| II.1.1. Aciers fortement alliés | 16 |
| II.1.2. Aciers de construction non alliés et faiblement alliés | 17 |
| II.1.2.1. Acier noir XC38 | 17 |
| II.2. L'aluminium | 17 |
| II.2.1. Propriétés de l'aluminium et applications | 18 |
| II.2.1.1. Caractéristique physique (pour métal à 99%) | 18 |
| II.2.1.2. Caractéristique mécaniques | 18 |
| II.2.2. Les alliages d'aluminium | 18 |
| II.3. Traitement Thermique | 19 |
| II.3.1. Le but du traitement thermique | 21 |
| II.3.2. La classification des traitements thermiques | 21 |
| II.3.3. Choix de la température | 22 |
| II.3.4. Temps de réalisation d'un traitement thermique | 23 |

CHAPITRE III : CONTRAINTE ET DEFAUTS

III.1. ESSAIS DE TRACTION

| | |
|--|----|
| Introduction | 24 |
| III.1.1. Principe | 24 |
| III.1.2. Eprouvettes | 24 |
| III. 1.3. diagramme contrainte-déformation en traction d'un métal : | 25 |
| III. 1. 4. Courbe réelle ou rationnelle | 27 |
| III. 1. 5. Influence de la température sur Re et Rm : | 28 |
| III. 2. LES DEFAUTS | 28 |
| III.2.1. Défauts de traitements thermiques | 28 |
| III.2.1.1. Hétérogénéité de dureté : | 28 |
| III.2.1.2. Déformation : | 29 |
| III.2.1.3. Tapes de trempes superficielles : | 29 |
| III.2.1.4. Augmentation des concentrations de contraintes sur défauts préexistants. | 29 |
| III.2.1.5. Contamination | 29 |

CHAPITRE IV APPROCHE EXPERIMENTALE

| | |
|---|----|
| Introduction | 30 |
| IV.1. Matériaux Utilises | 30 |
| IV.2. Réalisation Des Eprouvettes | 30 |
| IV.3 . Réalisation Des Essais | 32 |
| IV. 3. 1. machine de traction | 33 |
| IV. 3. 2. Logiciel d'exploitation de la machine de traction (ZWICK Z1011) | 33 |
| IV. 3. 3. Les systèmes de chauffages | 33 |
| IV. 3. 3. 1. Le système de chauffage de la machine de traction : | 34 |
| IV. 3. 3. 2. Le système de chauffage réalisé : | 34 |
| IV.4. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURES | 35 |
| IV.4.1. Méthode des Courants de Foucault : | 35 |
| IV. 4. 1. 1. Réalisation des sondes | 36 |
| IV. 4. 1. 1. Appareils de mesure : | 37 |
| IV.4 .2 . Méthode de Bruit de BARKHAUSEN : | 37 |
| IV.4 .2 .1 . Equipement et Paramètre de Mesure: | 38 |
| IV.5. LES ESSAIS | 39 |
| IV. 5. 1. Aluminium 2024 | 39 |
| IV. 5. 2. Titane | 40 |
| IV. 5. 3. Acier XC 38 galvanisé | 41 |

CHAPITRE V INTERPRETATION DES RESULTATS

| | |
|---|----|
| Introduction | 43 |
| V. 1. Interprétation des CF | 43 |
| V.1. 1. Influence de la Température | 43 |
| V. 1. 1. 1. L'aluminium | 43 |
| V. 1. 1. 2. Le Titan TV6A | 44 |
| V. 1. 1. 3. L'Acier noir XC38 non galvanisé | 44 |
| V. 1. 1. 4. L'Acier Noir XC38 Galvanisé | 44 |
| V.2. Interprétation Des BN | 45 |
| V. 2. 1. Acier Noir Galvanisé | 45 |
| V. 2. 1. 1. Introduction | 45 |
| V. 2. 1. 2. Analyse Et Interprétation Des Résultats | 50 |
| V. 2. 2. Acier noir galvanisé | 52 |
| V.3. interprétation thermographique | 54 |

CONCLUSION

55

BIBLIOGRAPHIE

56

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATION

| | |
|--------------------|---|
| M | L'aimantation magnétique |
| H | Le champ d'excitation magnétique |
| χ | La susceptibilité magnétique |
| B | L'induction magnétique |
| μ_0 | La perméabilité à vide |
| μ_r | La perméabilité relative |
| N | Nombre d'atome |
| λ | Coefficient de déformation |
| ΔL | Variation de la longueur dans la direction de magnétisation |
| E_{el} | L'énergie élastique |
| α_1 | Cosinus directeur de l'aimantation |
| α_2 | Cosinus directeur de l'aimantation |
| α_3 | Cosinus directeur de l'aimantation |
| H_{ef} | Le champ effectif |
| H_a | Champ magnétique appliqué |
| H_d | Champ démagnétisant |
| a | Paramètre de la maille |
| c | Paramètre de la maille |
| I | L'intensité des courants de Foucault |
| δ | Le profondeur de pénétration standard |
| j_0 | Densité du courant de surface |
| j_x | Densité du courant a profondeur x |
| ω | La pulsation |
| β | Le Déphasage des courants de Foucault |
| Z | L'impédance |
| R | La partie active de l'impédance |
| L | La partie réactive de l'impédance |
| B_r | L'induction rémanente |
| H_s | Le champ coercitif |
| B_s | L'induction à coude de saturation |
| ρ | La résistivité |
| H_m | Fini valeur du champ correspondant au maximum du pic; |
| A_m | Amplitude du pic |
| S_{en} | Surface sous la courbe |
| L_m | Largeur à mi-hauteur |
| λ_s | Coefficient de magnétostriction à saturation |
| H_σ | Le champ fictif |
| BMM | Le bruit magnétomécanique |
| λ_x | La longueur d'onde des rayons X |
| d_{hkl} | La distance interréticulaire d'une famille de plan (Mcl) |
| θ | L'angle d'incidence |
| d_0 | La distance interréticulaire |
| $\Delta 2\theta$ | La variation de position du pic |
| $\Delta 2\theta_0$ | La variation de position du pic de référence |
| ϵ_x | La déformation de la maille |
| A_x | L'allongement rémanent |
| F | La charge unitaire appliqué |
| S_0 | La section initiale |
| L_0 | La longueur initiale entre les repères |

| | |
|----------------------|--|
| L_u | La longueur entre repères après rupture de l'éprouvette |
| A | L'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture |
| C_s | Le coefficient de striction |
| Z_u | L'allongement de striction |
| C_{su} | Le coefficient de striction a la rupture |
| R_m | La résistance a la traction |
| R_e | La limite d'élasticité d'écoulement |
| R_{eH} | La limite supérieure d'écoulement |
| R_{eL} | La limite inférieure d'écoulement |
| R_r | La limite d'allongement rémanent |
| R_p | La limite conventionnelle d'élasticité |
| $R_{p0,2}$ | La limite conventionnelle d'élasticité correspond un allongement non proportionnel égal a 0,2% |
| A_{02} | L'allongement rationnel |
| B | La contrainte mécanique |
| $\bar{\sigma}^I$ | La contrainte résiduelle d'ordre I |
| $\bar{\sigma}^{II}$ | La contrainte résiduelle d'ordre II |
| $\bar{\sigma}^{III}$ | La contrainte résiduelle d'ordre III |
| BN | Le bruit de Barkhausen |
| L_c | La longueur calibrée |
| L_t | La longueur totale |

INTRODUCTION

On regroupe sous le vocable **essais non destructifs** ou encore **contrôles non destructifs** (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la **santé** d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des **altérations préjudiciables** à leur utilisation ultérieure.

Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les **défectuosités** susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

En ce sens, le contrôle non destructif (**CND**) apparaît comme un élément majeur du **contrôle de la qualité** des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de **détecter des hétérogénéités et anomalies** plutôt que de **mesurer** des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce.

Notre travail consiste à réaliser des essais de traction sous hautes température et interpréter les résultats des essais par trois méthodes différentes

Le Chapitre I : on va déterminer les différentes méthodes de CND en se basant sur celle qu'on a pratiqués ; le contrôle par courant de Foucault, Le bruit de Berkhausen et la thermographie infrarouge.

Le Chapitre II : comprendra les propriétés des métaux utilisés ainsi qu'une étude de traitement thermique ;

Le Chapitre III: comprendra les contrainte uni axiales et types de défaut issus du traitement thermique vue que notre étude est réalisée sous l'effet de la chaleur.

Le chapitre IV : parlera sur l'approche expérimental et en fin le Chapitre V celui des interprétations

Et enfin une conclusion qui synthétisera l'ensemble de notre travail.

Chapitre I

Control Non Destructif

INTRODUCTION

Les principes physiques à la base de contrôles non destructifs (atténuation des ultrasons, diffraction des rayons X, Courants Foucault sous champ magnétique, thermographie...) peuvent servir à caractériser les métaux (gros grain, anisotropie, dureté, contraintes...) cependant on entend par contrôle non destructif, un contrôle d'homogénéité.

Une telle méthode de contrôle est fondée sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité ; c'est l'exploitation d'un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un métal.

I.1.OBJECTIFS DU CND

Le contrôle non destructif a pour objectif de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles :

- l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'un revêtement, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau.
- il s'agit en général de la détection de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités ou de la fatigue mécanique.

I.2. 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. Les **méthodes de surfaces**, (anomalies en surface extérieure) sont les suivantes :

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

Les **méthodes volumétriques** (anomalies au sein de la pièce) sont les suivantes :

- ultrasons ;
- rayonnements ionisants.

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.

I.2.1 Les méthodes de surfaces :

I.2.1.1.Le Contrôle Visuel :

C'est bien entendu la méthode la plus simple, la plus ancienne et la plus répandue, en plus l'emploi d'aides optiques permet à présent :

- D'améliorer la résolution (loupe, binoculaires) ;
- D'atteindre les endroits d'accès difficile (endoscopes, fibres optiques).

L'éclairage est très important. Lorsque les défauts ont tous une même orientation, on choisit un éclairage directif, en observant à peu près dans la direction de réflexion spéculaire. Pour des défauts très superficiels, l'éclairage sera rasant. Mais, quand on

recherche des défauts variés, il vaut mieux utiliser un éclairage diffus. Pour éviter la fatigue oculaire, l'éclairement ne doit pas dépasser 750 lux environ.

Il est maintenant possible de remplacer l'œil par une cellule photo-électrique, qui analyse un faisceau laser balayant la pièce au défilé, ou par une caméra qui scrute automatiquement toute la surface des pièces à contrôler. Deux types de caméras sont disponibles :

- Les caméras de télévision: qui présente l'avantage d'un cout réduit et d'une bonne fiabilité ;
- Les caméras à transfert de charge (CCD) : qui utilisent des matrices de photodiodes pour former directement une image numérique. La numérisation de l'image permet un traitement informatisé (sélection de niveaux par seuils, élimination du bruit par corrélation spatial ou temporelle).

I.2.1.2. le Ressuage :

Le contrôle par ressauge est limité à la détection de défauts débouchant à la surface des pièces. Il consiste à révéler le défaut à l'aide d'un liquide pénétrant et d'un révélateur. Son efficacité est fonction de la taille du défaut recherché. Plus celui-ci est fin plus la détection est difficile.

Principales étapes de Ressauge (figure I. 1) :

Cette méthode est déterminée par quatre phases :

- D'abord nettoyer soigneusement la pièce pour enlever les salissures, les traces de graisse.
- Appliquer le produit pénétrant, au pinceau ou par immersion, ou nébulisation.
- Eliminer l'excès de pénétrant avec un produit adapté.
- Appliquer un révélateur compatible par immersion ou nébulisation, en une couche mince et uniforme.

Au début se forment de larges taches pales, dues à la rugosité de la pièce et aux traces de pénétrant restant, puis le révélateur aspire le pénétrant contenu dans les fissures à la manière d'un buvard. Pour dessiner une sorte de tireté entouré d'un halo. Qu'il faut distinguer de tache du début entouré d'un halo, qu'il faut distinguer des taches du début (fig. I.1.2). Il est déconseillé de poursuivre l'examen au delà de trente minutes. Les colorées en rouge ou bien chargée de produit fluorescents; dans ce dernier cas, l'examen devra être effectué sous un éclairage dans le proche ultra-violet. Le révélateur est une poudre blanche utilisée à sec ou en suspension

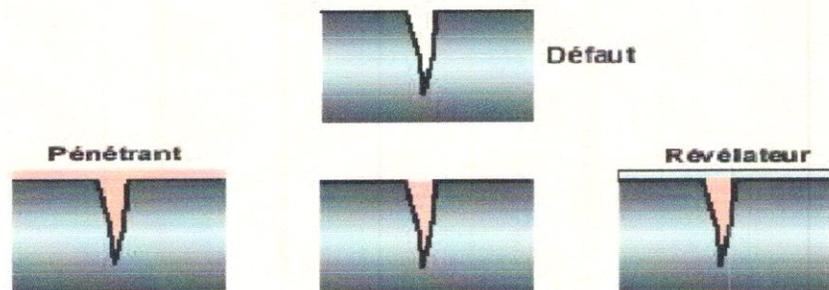


Figure I. 1 : méthode de ressauge.

I.2.1.3. Méthode magnétique :

Cette méthode se base sur les forces magnétiques et ne permet de mettre en évidence que des défauts situés à la surface des matériaux magnétiques. En magnétisant la pièce à contrôler, les lignes de forces sont perturbées à l'endroit de chaque discontinuité dans les propriétés magnétiques (fissure ou inclusion non-magnétique). Les petites particules de fer d'une suspension de limaille de fer (révélateur), répandue sur la surface, se concentrent là où les lignes de forces émergent. Le contrôle non destructif par magnétoscopie a pour objectif de détecter les défauts de surface ou sous-jacents (figure I.2).

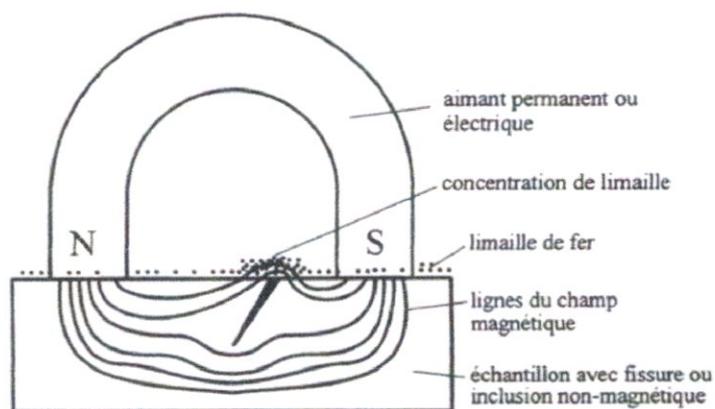


Figure I.2 : control magnétique.

1) magnétisme

a) Magnétisation et démagnétisation des pièces

La sensibilité de détection des défauts en magnétoscopie dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce, qui doit bien entendu être elle-même ferromagnétique, donc, en pratique, en acier quelle qu'en soit la nuance, à l'exclusion des aciers austénitiques inoxydables qui sont amagnétiques bien que contenant du nickel, et de certaines nuances au chrome-molybdène dont le ferromagnétisme est insuffisant pour obtenir une d.p.m. suffisante.

La première chose à noter est que le champ magnétique à considérer est celui qui s'exerce à proximité et en surface de la pièce ; il devra être perpendiculaire à la direction présumée des fissures recherchées, sinon l'effet d'entrefer sera minimisé, et même annulé s'il s'agit de directions parallèles. Le contrôle de l'orientation du flux magnétique et de son intensité s'effectue par la mesure du champ magnétique tangentiel, à l'aide d'un appareil à sonde de Hall que l'on déplace sur la surface de la pièce.

Pour les pièces de forme complexe, on doit vérifier qu'en tout point le champ magnétique atteint la fourchette de valeurs que l'on s'est fixée pour l'essai. Un champ trop faible, hors de la zone du début de saturation sur la courbe d'hystérésis du produit, ne pourra pas provoquer un effet de flux de fuite suffisant pour être mis en évidence ; à l'inverse, un champ trop fort risque de provoquer de fausses indications et un trop grand bruit de fond. Pour le contrôle magnétoscopique, les valeurs de champ tangentiel recommandées par les nombreuses normes et spécifications sont en fait très étalées, variant de moins de 800 à 12000 A/m (10 à 150 œersteds) en fonction de la nature de la pièce et de la finesse des défauts recherchés. A titre d'exemple les figures I.3 et I.4 illustrent les cycles d'hystérésis et les courbes de perméabilité relative de quelques aciers.

b) Mode d'aimantation

La nature et l'orientation générale du champ magnétique vont dépendre de celles du courant électrique utilisé pour le produire soit par magnétisation directe à l'aide d'un électroaimant, soit par le passage du courant lui-même dans la pièce à contrôler (délivrant un champ circonférentiel). Un courant continu produira un champ magnétique continu favorable à la détection des défauts

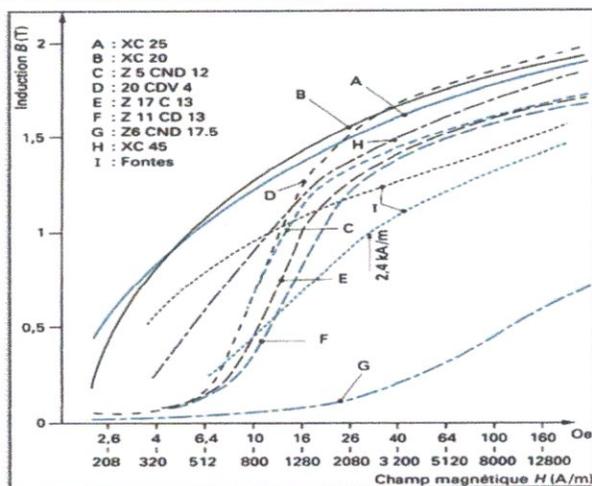


Figure I.3 : Courbes d'induction d'aciers de construction mécanique

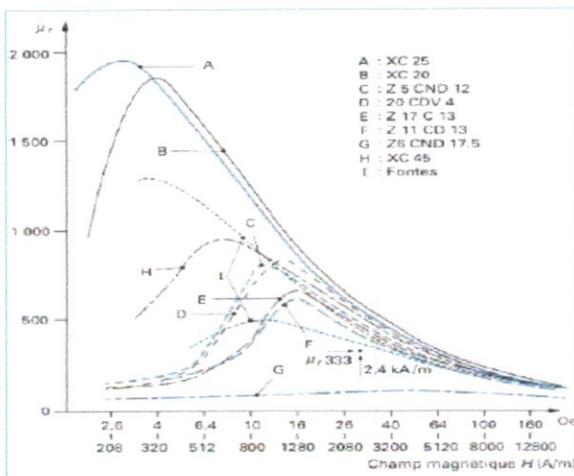


Figure I.4 : Courbes de perméabilité d'aciers de construction mécanique

2) Magnétoscopie

a) Détection visuelle par révélateur

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

Les produits, qui doivent être répartis uniformément sur la surface de la pièce pendant la magnétisation, se présentent soit sous forme de poudre sèche, soit beaucoup plus fréquemment sous forme d'une encre magnétique. Le support liquide le plus utilisé est le pétrole ; cependant, son emploi implique certains risques (incendie, allergie, odeur, stockage) et son rejet à l'égout est interdit ; c'est pourquoi on utilise parfois des encres à l'eau dont le pouvoir mouillant est accru par l'ajout d'agents tensio-actifs adéquats. Certains types d'encres à l'eau comportent en outre des agents anti moussants et des inhibiteurs de corrosion.

La **sensibilité de détection** est liée en partie à la granulométrie des particules de fer ou d'oxyde, qui doivent être de toute façon très homogènes. Pour une recherche de très fins défauts, on choisira des poudres de moins de $1 \mu\text{m}$, alors qu'on minimisera le bruit de fond lors du contrôle d'une pièce brute en choisissant une poudre de 50 à $100 \mu\text{m}$.

Les liqueurs magnétiques évoluent dans le temps, s'épuisent et se polluent lors de l'utilisation, aussi est-il nécessaire de les contrôler régulièrement ; la concentration des particules est le paramètre le plus important à contrôler ; elle se situe selon les types de révélateurs entre $0,5$ et 10 g/L et s'évalue soit par décantation d'un volume donné pendant un temps suffisant (plusieurs dizaines de minutes), soit, plus rapidement, par comparaison avec un révélateur de référence sur une « balance magnétique »

b) Procédés à détection automatique de flux de fuite

La grande sensibilité de la magnétoscopie traditionnelle est altérée par un certain manque de fiabilité de l'inspection visuelle qui la caractérise et prend sa source dans la fatigue rapide de

l'œil et les moments toujours possibles de distraction de l'opérateur. Pour les pièces de formes complexes, il n'est guère possible d'échapper à la procédure d'examen visuel ; par contre, pour les pièces de forme simple, et en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, il est possible de scruter la surface à l'aide de capteurs électriques sensibles aux faibles champs magnétiques, les capteurs de flux de fuite.

3) Bruit de berkhausen

Comme il a été décrit précédemment, la structure en domaines s'établit spontanément pour diminuer l'énergie totale du système. L'application d'un champ extérieur entraîne un réarrangement de ces domaines. Cette modification d'organisation est essentiellement due aux déplacements des parois qui limitent les domaines, de telle sorte que les domaines bien orientés augmentent de volume au détriment des domaines mal orientés. Les parois ne se déplacent pas librement, elles sont accrochées sur toutes les micro- hétérogénéités présentes dans la matière (dislocations, précipités, joints de grain, ...) Ceci correspond à un phénomène d'ancrage des parois. Le déplacement des parois est donc discontinu ; il se fait par sauts, les parois s'arrachent ancrages pour se bloquer sur de nouveaux obstacles et ainsi de suite...

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.

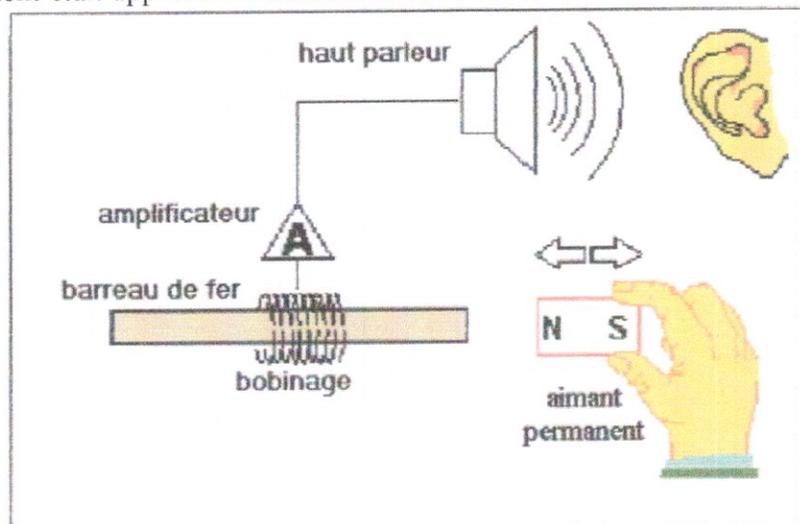


Figure I.5 : expérience de BERKHAUSEN.

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.

4) Cycle d'hystérésis

Dans le cas du cycle d'hystérésis, 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 : r 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.

Il est aussi courant d'observer le paramètre F , la perméabilité magnétique relative du matériau, qui correspond à la pente de la courbe mesurée au voisinage du champ coercitif.

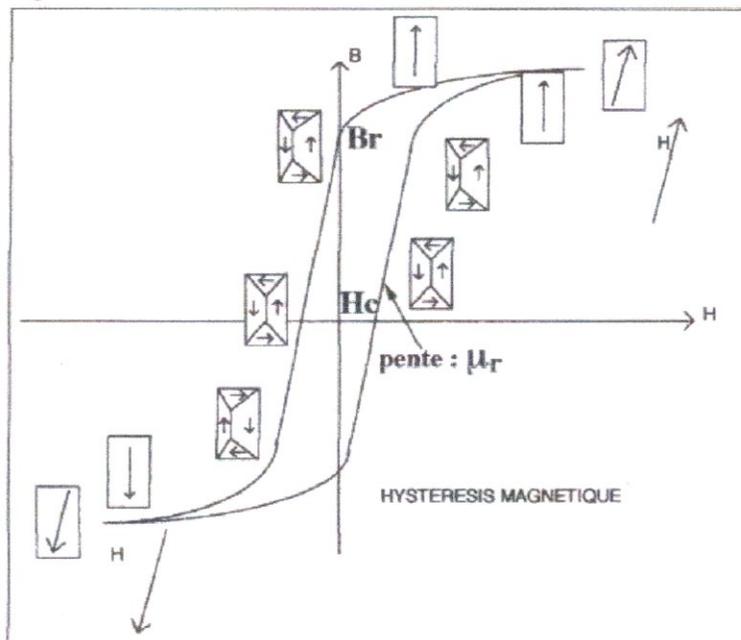


Figure I.6 : schéma d'un cycle d'hystérésis

I.2.1.4. COURANTS DE FOUCAULT

1) Principe de la détection par courants de Foucault

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819-1868).

Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifient par là-même l'impédance de cette bobine. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation (ou de tout autre bobinage situé dans le champ).

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des **défauts superficiels**, dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau).

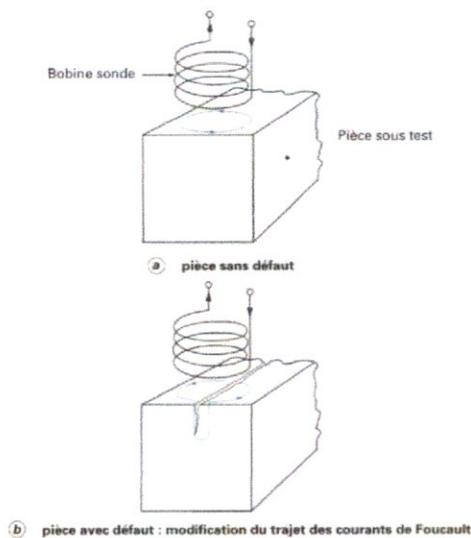


Figure I. 7 : Principe de la détection par courants de Foucault

2) Répartition des courants de Foucault

a) Loi fondamentale

La répartition des champs magnétiques et des courants induits dans un matériau conducteur, et éventuellement magnétique, est régie par les lois fondamentales de l'électromagnétisme dont la formulation la plus générale est donnée par les équations de Maxwell :

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div } \vec{B} &= 0 \\ \text{rot } \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

Avec \vec{H} et \vec{B} : Vecteurs champ et induction magnétiques,
 \vec{E} et \vec{D} : Vecteurs champ et induction électriques
 \vec{J} : Vecteur densité de courant,

Sachant par ailleurs que l'on a les relations :

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu(H) \vec{H} \\ \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad (\text{loi d'Ohm}) \end{aligned}$$

Avec $\mu(H)$ perméabilité absolue du matériau pour le champ H ,
 ϵ permittivité du matériau,
 σ conductivité du matériau.

On peut résoudre ce système d'équations dans deux cas simples qui s'approchent assez bien des deux principales configurations du contrôle industriel par courants de Foucault
 - Le cas d'une bobine encerclant une barre pleine (ou un tube) ;

- Le cas d'une bobine disposée à plat près de la surface d'un corps massif.

b) Diagramme d'impédance

Si, pour les deux configurations précédentes, on suppose que les paramètres électromagnétiques sont constants et que le corps conducteur est isotrope et homogène, de longueur ou de profondeur infinies, que le courant d'excitation est sinusoïdal de pulsation ω , on peut alors calculer l'induction et la densité de courants induits.

Diagramme de fonctionnement Effets des courants induits sur une bobine

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 (figure II-8). Il est utile, pour

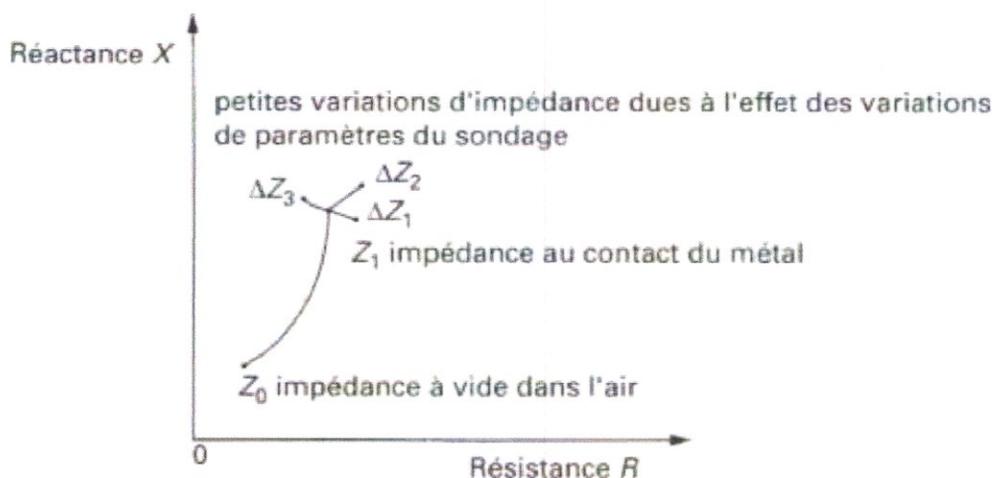


Figure I.8. : Représentation des variations d'impédance d'une bobine

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 II-9 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).

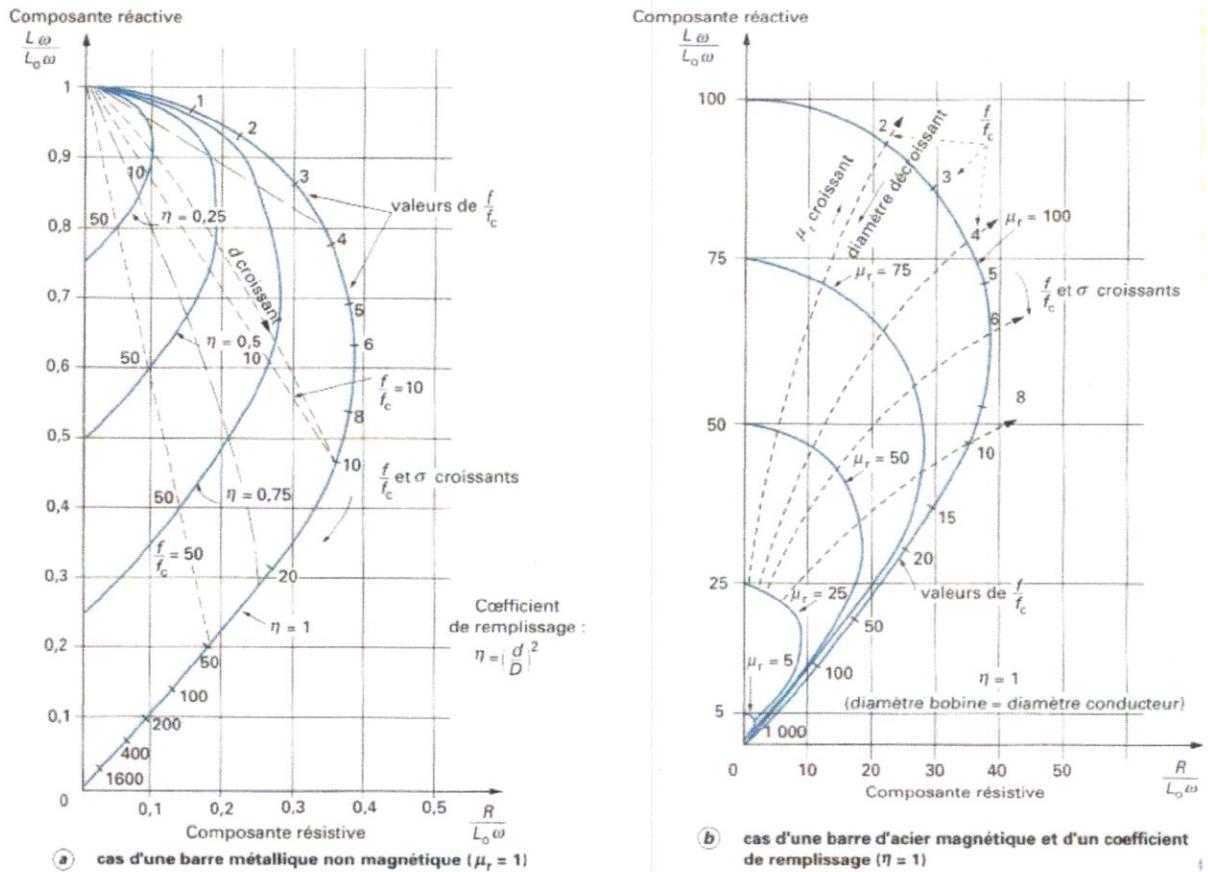


Figure I.9.: Diagrammes théoriques de l'impédance normalisée d'une bobine de diamètre D encerclant une barre métallique ferromagnétique ou non de diamètre d

3) Mise en œuvre du sondage par courants de Foucault

a) Principaux paramètres

Les principaux paramètres à prendre en compte pour un contrôle résultent des considérations précédentes et peuvent se répartir en pratique en trois catégories.

- **Paramètres liés au matériau à sonder** outre ceux liés à sa forme géométrique (diamètre), ce sont sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ dont il importerait de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraînant un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde.
- **Paramètres liés au montage** qui gouvernent le couplage entre la ou les bobines et le matériau : il s'agit soit du coefficient de remplissage pour les bobines en cerclant, rapport entre la section de la barre et celle de la bobine; soit du *lift-off*, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce au-dessus de laquelle elle évolue. La constance de ces paramètres est aussi à rechercher pour éviter des effets perturbateurs trop importants sur le point moyen de fonctionnement.
- **Paramètres électriques** c'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, paramètre dont on est maître et qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat eu égard en particulier à la profondeur des défauts, et d'un point de

fonctionnement sur le diagramme complexe permettant une bonne discrimination des différents paramètres perturbateurs de l'impédance Z . L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité électrique envoyée dans la bobine, n'est pas un facteur déterminant du contrôle, dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non-linéarités rendant inextricable l'exploitation des signaux, et suffisamment forte pour que le rapport signal sur bruit soit convenable au niveau des amplifications et autres traitements électroniques.

4) Montage des sondes

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les montages de base à partir desquels d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler.

a) Bobine émettrice-réceptrice Le montage le plus simple est celui du capteur à double fonction constitué d'une seule bobine émettrice-réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa tension complexe. Le capteur à fonctions séparées, à l'inverse, est constitué de 2 bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau. Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1\ 000$ Hz).

b) Bobines différentielles Dans de nombreux cas de contrôle, il est très difficile de neutraliser les effets perturbateurs qui brouillent les signaux de défauts, tels que les variations locales de *lift-off* ou de perméabilité magnétique par exemple. Une solution élégante pour contourner cette difficulté inhérente à l'emploi d'une bobine unique est d'utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques placées côte à côte et montées en différentiel électrique, de telle façon que les variations locales de propriétés électromagnétiques aient tendance à affecter les deux sondes et ne créent pas de déséquilibre, alors qu'un défaut unitaire affectera une bobine à la fois et pourra être détecté grâce au double signal de déséquilibre ainsi engendré (figI.10).

c) Disposition des bobines On rencontre en pratique essentiellement trois types de capteurs à courants de Foucault :

- **les capteurs encerclants** destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques ; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit, afin d'obtenir un coefficient de remplissage (fig. 10) le plus voisin possible de l'unité ; cette condition est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop fort apportant une dégradation du rapport signal/bruit.

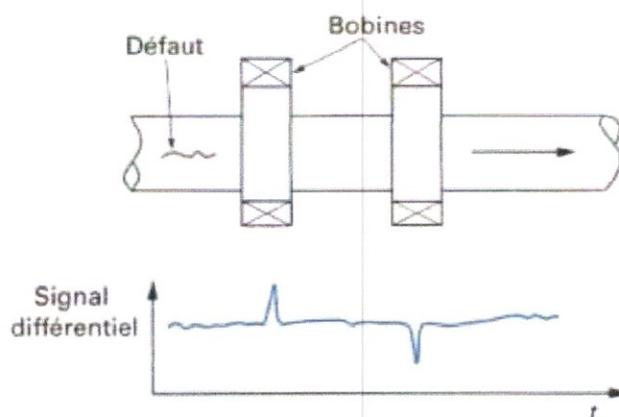


Figure I.10. : Détection d'un défaut avec une sonde encerclant différentielle

- **Les capteurs internes** pour le contrôle des tubes par l'intérieur, pour lesquels les bobines sont aussi moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit ; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire.
- **les capteurs-sondes** adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique ; ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages moulés généralement sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs et dont le rôle est de permettre d'éloigner les enroulements de la surface à contrôler, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins.

I.2.1.5. RADIOGRAPHIE

L'examen de la structure ou de la santé interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la (figure I. 11). Selon le même principe, on peut obtenir des images en utilisant d'autres particules que les photons et ainsi mettre en œuvre des techniques comme la neutronographie.

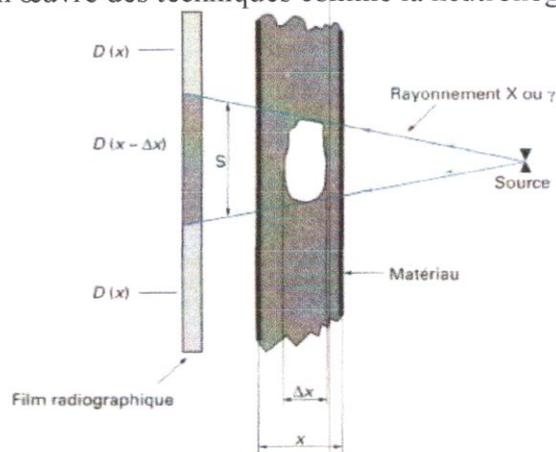


Figure I.11. : Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut

Rayonnements X et gamma

Les rayons X et Y sont des vibrations électromagnétiques, d'origine respectivement atomique et nucléaire, qui se propagent donc en ligne droite à la vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8$ m/s dans le vide. Pour les applications à la radiographie industrielle, leur longueur d'onde λ , est comprise entre 0,05 et 500 pm. Mais on les caractérise plutôt par leur énergie E calculée par la relation d'Einstein :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12,4 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{eV}}{\lambda}$$

I.2.2. Les Méthodes de volumétries

I.2.2.1. 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 10^9 à 10^{13} Hz (1 GHz - 10 GHz).

Les fréquences utilisées lors d'examen 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 $c = 5000$ 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, à comme effet d'augmenter l'absorption et donc de limiter la profondeur accessible aux ultrasons.

1) Différents types d'ondes (fig.12)

Les ondes ultrasonores, vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du support matériel. Ainsi, dans les liquides et les gaz, qui sont des milieux n'offrant aucune résistance au cisaillement, les ondes ultrasonores sont essentiellement des vibrations longitudinales, les particules matérielles se déplaçant, par rapport à leur position d'équilibre, parallèlement à la direction de propagation de l'onde, engendrant des fronts de compression-décompression, eux-mêmes perpendiculaires à cette direction. Ce type d'onde se retrouve dans les solides et est d'ailleurs le plus utilisé en pratique.

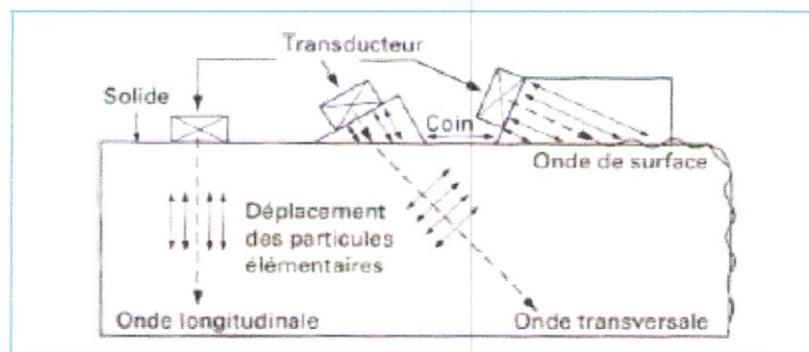


Figure I.12 : Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons

Ces deux types d'ondes, les plus couramment rencontrés en contrôle non destructif, sont des ondes de volume ; il est possible aussi de générer d'autres types d'ondes dont l'existence dépend en particulier de la configuration du support de propagation. Il y a tout d'abord les ondes de surface, ondes composites constituées à la fois par des déplacements longitudinaux et transversaux, et dont les plus connues et utilisées sont les ondes de Rayleigh ; d'autres modes sont possibles et connus : ondes rampantes de Love, ondes de Bleustein – Gulyaev. Lorsque le support a des dimensions du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, cela génère des modes vibratoires particuliers : ondes de Lamb dans les tôles, il s'agit d'ondes dispersives avec mode de vibration symétrique ou antisymétrique ; ondes guidées dans les tiges et barres. Les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites.

I. 2. 2. La Thermographie :

1) Historique :

C'est en 1800 que Sir William HERCHEL découvrit l'existence d'un rayonnement thermique en dehors du spectre de la lumière visible.

A l'aide d'un thermomètre placé au delà du rayonnement rouge d'un spectre solaire obtenu à travers un prisme dispersif, HERCHEL met en évidence la présence d'un rayonnement non perceptible par l'œil et porteur d'une énergie se manifestant par son effet calorifique.

Par la suite, il a prouvé que ce rayonnement, baptisé infrarouge, obéit aux mêmes lois que la lumière visible.

Il faut attendre 1830 pour voir se développer les premiers détecteurs de ce type de rayonnement, basés sur le principe des thermocouples, appelés thermopiles.

De 1870 à 1920, les progrès de la technologie permettent le développement des premiers détecteurs quantiques basés sur l'interaction du rayonnement et de la matière.

1930 -1944 : Développement des détecteurs au (Pbs), essentiellement pour les besoins militaires. Ces détecteurs sont sensibles dans la bande 1,5 à 3 μm .

1940 -1950: Extension du domaine spectral vers l'infrarouge moyen de 3 à 5 microns par les détecteurs à l'Antimoniure d'Indium (InSb). 1960 exploration de l'infrarouge lointain de 8 à 14 par détecteurs au tellure de Calcium Mercure (Hg Te Cd).

1970 à 1990.

2) Principe de la thermographie:

Dans sa norme expérimentale A 09-400, l'AFNOR définit la thermographie comme une (technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge) .

Cette définition nous renvoie immédiatement à celle de scène thermique et d'image thermique. Toujours selon la même norme, la scène thermique est la << partie de l'espace objet observable >> au moyen de l'appareillage, ce qui appelle naturellement la notion d'espace image qui est <<la répartition structurée des données représentatives du rayonnement infrarouge en provenance d'une scène thermique >>.

La fonction fondamentale de l'appareillage de thermographie est donc d'assurer la projection d'un espace objet dans l'espace image, en mettant à profit le rayonnement thermique des corps, du fait de leur température. Nous verrons que cette image peut être utilisée à des fins d'observation et même, dans certaines conditions que nous précisons, de mesurage.

Précisons que si la thermographie comme la thermométrie trouvent leur origine dans la chaleur des corps, les principes de ces deux techniques diffèrent fondamentalement. En

effet, tandis que la thermométrie est, par définition, une méthode de mesurage par contact, l'observation ou le mesurage par thermographie s'effectuent par détection du rayonnement émis. Ceci en constitue évidemment l'un des avantages, mais il en résulte aussi des restrictions comme nous le verrons par la suite.

Pour opérer le transfert des informations de l'espace objet où les phénomènes sont d'origine thermique, dans l'espace image où les grandeurs sont de nature différentes (signal électrique ou lumineux), l'appareillage doit réaliser simultanément deux opérations qui sont :

- une projection géométrique.
- une conversion énergétique.

L'organisation générale de ce processus est représentée par la figure I. 13 .

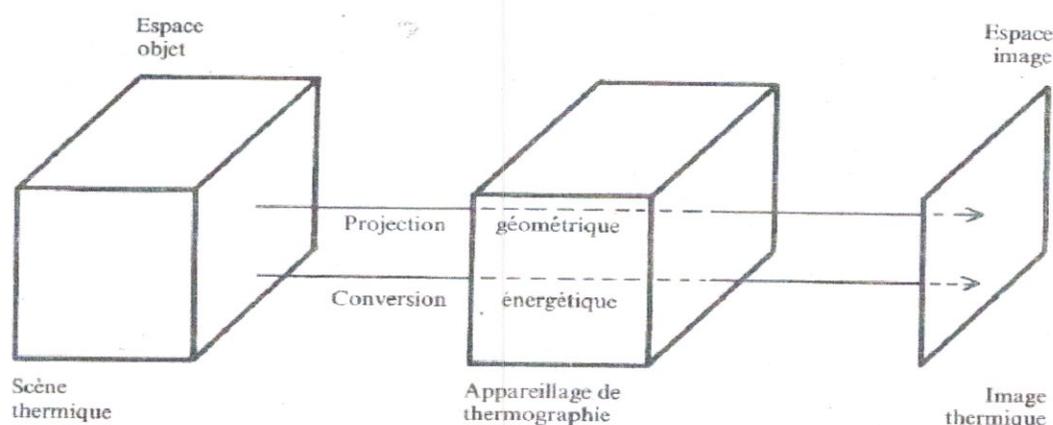


Figure I. 13 : transfert des données de l'espace objet dans le plan image.

3) Méthode de mesure thermographique

La méthode de mesure (détection et quantification) de flux de rayonnement et, a fortiori, de la température de la matière qui émet ce flux, est une méthode de mesure directe : la valeur d'une grandeur caractéristique de l'élément-détecteur de la caméra est une fonction de la valeur du flux que reçoit cet élément ; la température du corps observé en est déduite par calcul.

4) Thermographie et thermique. Interprétations

La thermographie illustre l'échange d'énergie par rayonnement. Les autres formes d'échange d'énergie (convection, conduction) ne relèvent pas de notre propos. Ainsi, la thermographie constate l'état instantané, statique, stationnaire ou transitoire, de la répartition spatiale des flux en provenance d'une scène thermique. Elle est donc un outil pour le thermicien ou pour l'opérateur, technique qui vise à obtenir une carte de luminances ou un thermogramme en vue de son interprétation.

Il y a donc deux types d'interprétation : l'interprétation thermographique qui porte sur la validité et la pertinence des flux ou des températures mesurées et l'interprétation thermique qui justifie de cette répartition des températures. La première relève d'une technique et d'un savoir-faire instrumental. La seconde se base sur la première ; elle sort ici de notre propos.

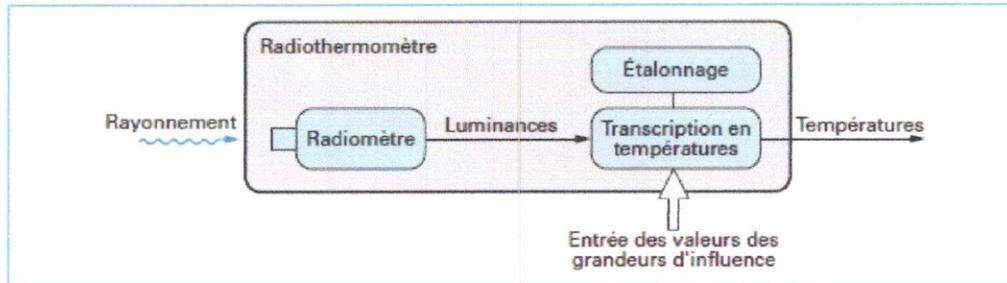


Figure I. 14 : Radiomètre, Radio Thermomètre et Grandeurs d’Influence.
Transcription en Température

5) Spectre de rayonnement :

La figure I. 14 présente le spectre des rayonnements électromagnétiques. L’unité pratique est la longueur d’onde, en micromètre (mm). L’agitation des molécules de la matière se traduit par l’émission d’un flux de rayonnement électromagnétique fonction de la température de la matière ; c’est le rayonnement thermique.

Le rayonnement thermique couvre approximativement la gamme de 0,1 à 1 000 μm. La thermographie infrarouge classique va de 2 à 14 μm.

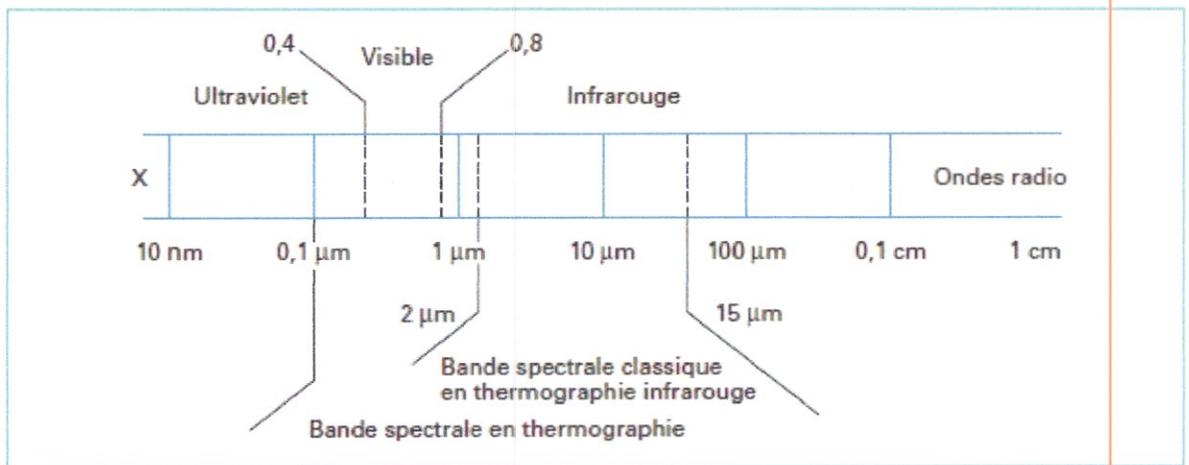


Figure I. 15 : Spectre des rayonnements électromagnétiques

Chapitre II

Matériaux

Et

Traitement

Thermique

INTRODUCTION

Les matériaux utilisés en aéronautique sont des matériaux spéciaux qui doivent résister aux conditions extrêmes (résistance à la variation de température, à la pression,...), pour cela nous avons choisis quelques matériaux comme l'aluminium qui est utilisé en aéronautique pour sa légèreté et sa résistance à la corrosion, le titane pour sa résistance à la haute température, à la corrosion et pour faire une comparaison avec d'autres matériaux comme l'acier noir (galvanisé et non galvanisé).

I.1. LES ACIERS

L'acier est fondamentalement un alliage de fer et de carbone contenant des éléments considérés comme :

- impuretés: soufre, phosphore ;
- éléments résiduels issus de son (histoire n : chrome, nickel, cuivre... en faible quantité, provenant principalement des ferrailles de base ;
- éléments d'accompagnement utiles à son élaboration : silicium, manganèse, aluminium, titane ;
- éléments d'addition destinés à améliorer ses propriétés à l'état naturel et/ou modifier son comportement lors des traitements thermiques.

L'acier est l'alliage métallique qui offre la plus large gamme de propriétés mécaniques et la plus large possibilité de variation de ses caractéristiques par les traitements thermiques, ce qui explique son succès en mécanique. Il présente également un bon compromis entre résistance et rigidité élastique (modules d'élasticité), que les matériaux dits nouveaux , (plastiques et composites) ne permettent pas d'atteindre.

Il existe une très large gamme d'aciers disponibles faisant l'objet d'une classification normalisée que l'on peut diviser en deux grandes catégories :

- **Aciers fortement alliés :**
 - destinés à l'outillage (aciers pour travail à froid, pour travail à chaud, pour coupe rapide) ;
 - inoxydables (austénitiques, martensitiques, ferritiques, austéno-ferritiques);
 - réfractaires.
- **Aciers de construction non alliés et faiblement alliés :** parmi lesquels on distingue les aciers spéciaux destinés aux traitements thermiques. Les normes recommandent certaines nuances pour un emploi particulier (exemples : aciers pour chaîne, pour roulements, pour boulonnerie...) ou pour un traitement spécifique (exemples : aciers pour cémentation et carbonituration, pour nitruration, pour trempe superficielle...).

II.1.1. Acier noir XC38**1) Acier noir XC38 (non galvanisé) :**

C'est un acier de construction mécanique courante (arbres, vilebrequins, bielles), faiblement allier, fins de composition chimique très bien définie (0,38 % de carbone)

2) Acier noir XC38 (galvanisé) :

C'est un acier faiblement allier qui a subi une galvanisation à fin de durcir sa surface.

La galvanisation :

Le procédé de revêtement de l'acier par immersion dans un bain de zinc fondu a été breveté par un ingénieur français, Stanislas SOREL, en 1837. L'utilisation, dans le brevet, des termes "effet galvanique", "galvaniser", est liée aux découvertes de GALVANI et VOLTA sur l'obtention d'électricité par le contact de métaux différents et de DAVY qui observa que dans la pile de VOLTA (zinc-cuivre) l'un des deux métaux était toujours préservé de l'oxydation et proposa l'application de ce principe "pour la conservation du fer" par le zinc.

Le traitement de galvanisation est opéré habituellement à une température comprise entre 445 et 455°C. Les épaisseurs de revêtements obtenues, leur structure et leur aspect vont dépendre principalement de la composition de l'acier.

1. **Galvanisation à chaud** : recouvrement par immersion dans un bain de zinc fondu. Les produits ainsi revêtus sont appelés produits galvanisés.
2. **Zingage par projection à chaud** : recouvrement par projection de zinc fondu au pistolet. Les produits ainsi revêtus sont appelés métallisés au zinc.

II. 1. 2. L'aluminium**II. 1. 2.1. Propriétés de l'aluminium et applications****1) Caractéristique physique (pour métal à 99%) :**

| | |
|--|--------------------------------|
| Masse volumique..... | 2.7 Kg/dm ³ |
| Point de fusion..... | 658 °C |
| Point d'ébullition..... | 2 000 °C |
| Enthalpie de fusion..... | 92 cal/g |
| Chaleur massique à 0°C..... | 0.22 cal/g.K |
| Conductibilité thermique..... | 210 SI |
| Facteur total d'émission (tôle polie)..... | 0.06 |
| Résistivité..... | 2.7x10 ⁻⁶ ohm-cm |

La faible masse volumique de l'aluminium le fait employer pour la construction du matériel aéronautique à fin de diminuer le poids.

- Le point de fusion relativement bas associé à un point d'ébullition élevé et à une parfaite stabilité à toute température, rend aisée la fusion et la coulée d'aluminium.
- Résistance à la corrosion : les alliages d'aluminium résistent bien à la corrosion, grâce à la couche d'oxyde (Al_2O_3) qui se forme à leur surface.
- Conductivité électrique ; sa haute conductibilité électrique (62% de celle du cuivre) et son absence de magnétisme trouvent leurs emplois dans l'industrie électrique (transport d'énergie ou construction de matériel).
- Le faible facteur d'émission de l'aluminium permet de l'utiliser comme isolant thermique.

2) Caractéristique mécaniques :

| | Coulé | laminé recuit |
|--|----------|---------------|
| Résistance à la traction (N/mm ²) | 70 à 100 | 70 à 90 |
| Limite apparente d'élasticité (N/mm ²) | 30 à 40 | 30 à 40 |
| Allongement (%) | 25 à 15 | 40 à 30 |
| Dureté Brinell | 15 à 25 | 15 à 25 |
| Module d'élasticité (N/mm ²) | 67 500 | 67 500 |

3) Les alliages d'aluminium

Il existe une large gamme d'alliages d'aluminium dont un certain nombre peut être valorisé par des traitements thermiques. Les éléments d'alliage varient selon le mode d'élaboration de l'alliage par corroyage ou par fonderie. On trouve principalement les alliages Al-Si, Al-Mg, N-Zn, Al-Cu et combinaisons croisées de ces différents éléments.

On dispose aujourd'hui d'alliages à haute résistance, ($\sigma > 600$ MPa) après application de traitements thermiques adaptés. Sous réserve de pouvoir accepter un niveau de module de rigidité, (module d'élasticité) égal au tiers de celui des aciers, ces alliages sont une solution concurrente des aciers sur des pièces relativement peu chargées, avec en plus l'avantage de la légèreté et de la résistance à la corrosion facilement bonifiable par oxydation anodique. L'oxydation anodique dure permet de leur conférer des caractéristiques d'usure et de frottement.

Il existe de nombreux alliages d'aluminium que soient corroyés ou de fonderie. Les alliages corroyés : sont classés en alliages non rampants des séries 1000, 3000 et 5000 ainsi que les alliages à durcissement structural des séries 2000, 6000 et 7000.

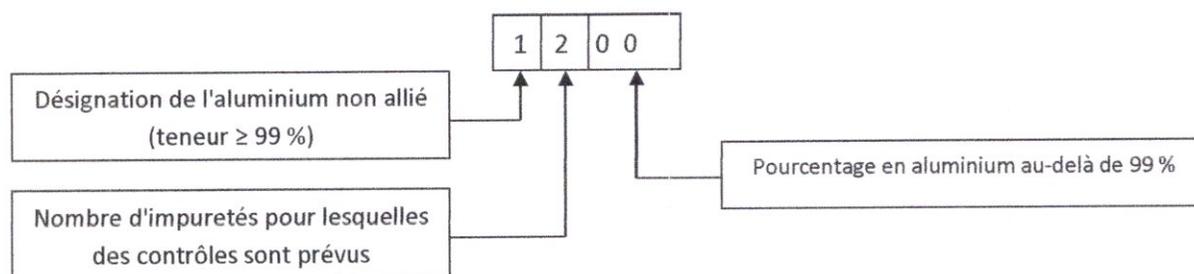


Figure II. 1 : Aluminium non-allié

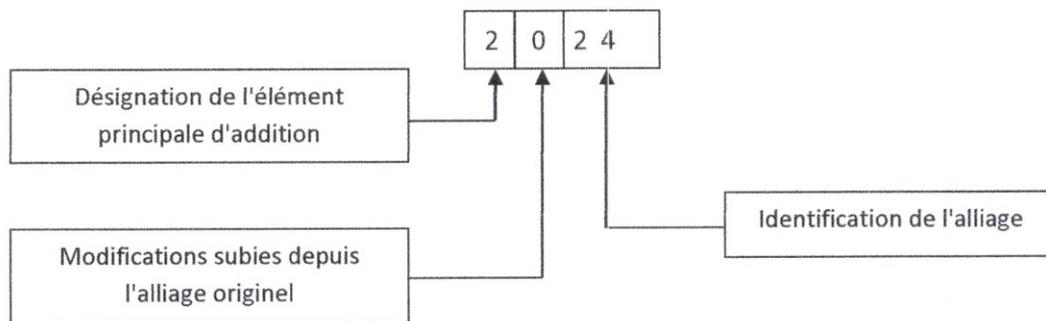


Figure II.2. : Aluminium allié

Désignation des éléments principale

2 : Cuivre

3 : Manganèse

4 : Silicium

5 : Magnésium

6 : Magnésium et silicium

7 : Autres éléments

Dans notre étude on a travaillé avec un alliage de série 2000, qui est l'alliage 2024.

4) Définition de la série 2000 (Al Cu et Al-Cu-Mg)

- **Éléments de base** : Les teneurs en Cu sont comprises entre 2,6 et 3,6% et, quand ils en contiennent, leurs teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5%. Le durcissement structural qui est dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 , leur confère d'excellentes propriétés mécaniques.
- **Additions diverses** : L'addition de Silicium et de manganèse, à des teneurs inférieur à 0,8%, favorise la formation de composés quaternaires qui, par dispersion, améliorent les propriétés de la matrice. La présence du Fer est souvent nuisible, car, à cause de la formation de Cu_2FeAl_7 , le Fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural. Si on plus de Fer, on ajoute du Nickel, il y a une formation du composé Al_9FeNi , qui donne à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (par exemple Al2618 qui est utilisable pour la fabrication des moteurs à turbine et des structures d'avions supersonique).

Les caractéristiques mécaniques de cette série est motionnés dans ce tableau:

| | Etat | Re 0.2 (Mpa) | Rm (Mpa) | A (%) | Résistance à la fatigue | Principaux domaines d'utilisations | e (mm) |
|--------------------------------------|------|-----------------|-------------|----------|----------------------------|--|--------------|
| 2024 4,4 Cu- 1,5 Mg- 0,6 Mn | 0 | 105 | 190 | 20 | 90 | Aéronautique, Charpente, visseries | 0,35- 3,2 |
| | T3 | 320 | 460 | 20 | 140 | | 0,35-6 |

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques de l'Al 2024

II. 1. 3. Le Titane (TA6V) :

1) Caractéristique physique du titane :

| propriété | valeur |
|--------------------------|-------------------------|
| Numéro Atomique | 20 |
| Masse Atomique | 47.9 g |
| Masse Volumique | 4.507 g.cm ³ |
| Température de fusion | 1670 C° |
| Température d'ébullition | 3535 C° |
| Conductivité thermique | 16.7 W.m-1.K-1 |
| Coefficient de poisson | 0.33 |

Tableau II. 2. Caractéristique physique du Titane.

2) Caractéristique mécanique :

| propriétés | valeurs |
|-------------------------------|--------------------------|
| Résistance à la traction | 450 (N/mm ²) |
| Limite apparente d'élasticité | 350 |
| allongement | 28 % |
| Dureté Brinell | 200 |
| Module d'élasticité | 110 000 MPa |

Tableau II. 3. Caractéristique mécanique du Titane.

II.3. Traitement Thermique

Les traitements thermiques sont des opérations destinées à modifier les propriétés des matériaux en faisant intervenir, selon la norme EN 10052 : (une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux (métallique) solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure D.

Il apparaît donc que les paramètres importants des traitements thermiques sont d'une façon générale, pour chaque cycle (figure 3.I) :

- la vitesse et le mode de mise en température (avec ou sans étapes) ;
- le temps et la température de maintien ;
- la vitesse et le mode de refroidissement (avec ou sans étapes).

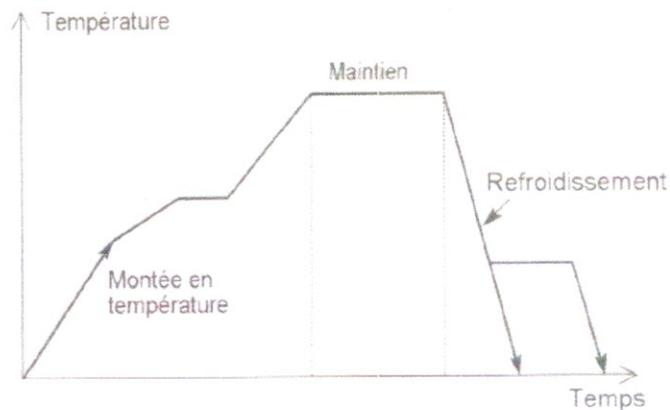


Figure II.3. Diagramme de Base d'un Traitement Thermique

II.3.1. Le but du traitement thermique

Les opérations de traitement thermique sont destinées à modifier les caractéristiques métalliques.

Elles agissent principalement sur :

- la dureté ;
- la résistance à la rupture ;
- la résilience ou la ductilité.

Elles ont aussi un effet sur :

- les propriétés tribologiques (frottement) ;
- la résistance à la corrosion ;
- les propriétés magnétiques ;
- la stabilité dimensionnelle.

Les traitements thermiques se répartissent en deux grandes catégories :

- les traitements de durcissement ;
- les traitements d'adoucissement.

II.3.2. La classification des traitements thermiques :

Ils se classent également selon qu'ils ont (Figure II.4) :

- pour effet de modifier en profondeur les propriétés du matériau dans toute la section ou toute la masse du produit traité : **traitement dans la masse** ;
- pour effet de modifier superficiellement les propriétés du matériau, sur une profondeur limitée : traitements superficiels ou **traitements thermiques de surface**.

La science des traitements thermiques repose sur l'existence et sur la possibilité de provoquer des transformations métallurgiques dans la structure cristalline des matériaux par application de cycles thermiques.

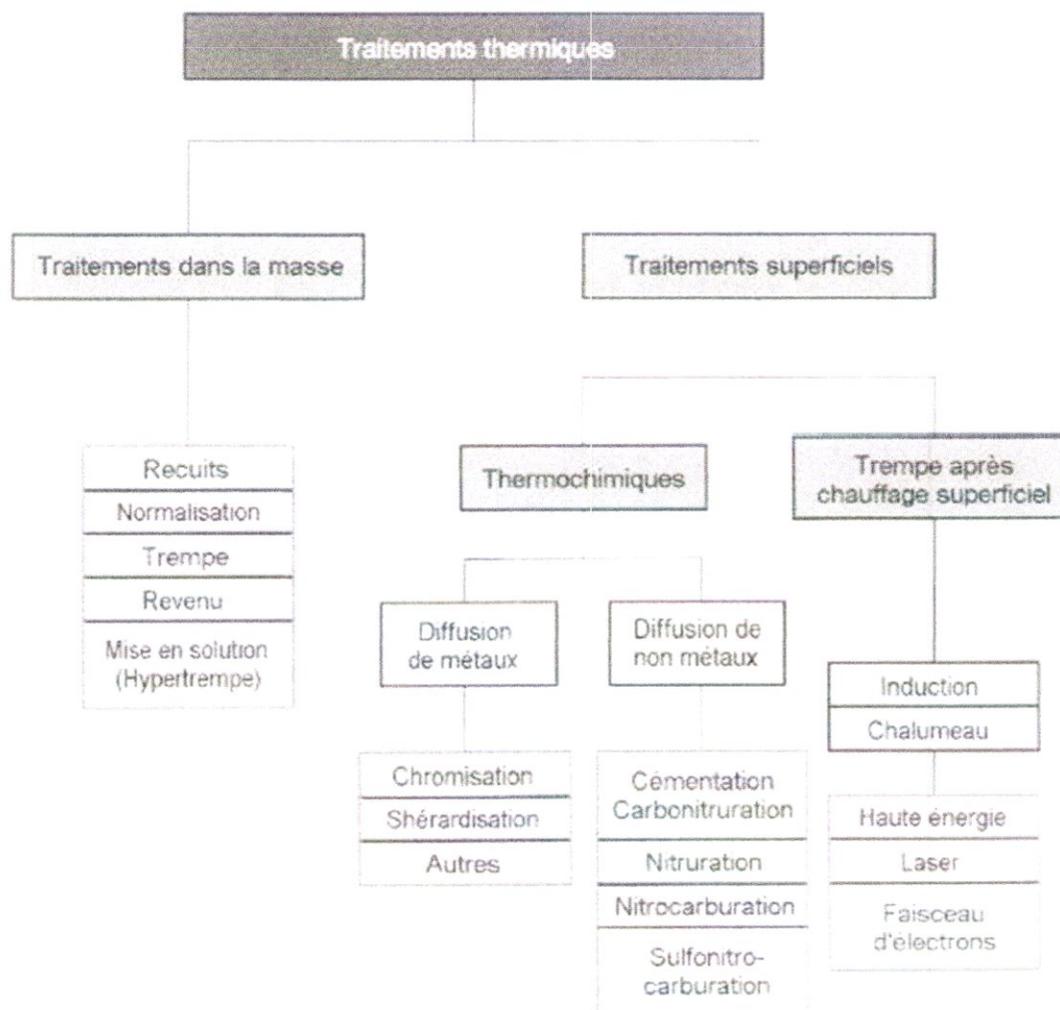


Figure II.4 Classification des traitements thermiques

- 1) **Trempe** : le principe consiste à chauffer le métal (alliage) à une température au-dessus du point de transformation jusqu'à l'obtention de l'état d'équilibre correspondant en suit refroidir brutalement.
- 2) **Recuit** : le principe consiste à chauffer le métal (alliage) une température située au-dessus et près du point de transformation puis laisser refroidir lentement.
- 3) **Revenu** : après une trempe le métal est chauffé jusqu'à une température judicieusement choisie en dessous du point de fusion puis refroidie immédiatement.

II.3.3. Choix de la température :

La température à laquelle un traitement thermique est réalisé est un des paramètres essentiels de sa réussite Elle détermine différents comportements liés à des phénomènes métallurgiques ou mécaniques. La température a une influence sur la géométrie de la pièce traitée :

- plus la température est élevée, plus il y aura de risque de fluage du matériau et plus le choc thermique au refroidissement sera grand, surtout si celui-ci est rapide ;

- le choix de la plus basse température possible est favorable au maintien des caractéristiques géométriques.
- La température a un effet sur les transformations métallurgiques au chauffage et au refroidissement: il peut être nécessaire d'atteindre un certain niveau de température pour obtenir une transformation allotropique (changement de phase cristalline) qui permettra d'obtenir une nouvelle répartition des constituants de la structure ou autorisera une diffusion thermochimique (cémentation des alliages fer-carbone) et permettra d'obtenir une transformation au refroidissement (trempe) ; il peut y avoir obligation de limiter la température d'un traitement afin de ne pas détruire les effets d'un traitement préalable (exemple : nitruration d'un acier trempé revenu).

II.3.4. Temps de réalisation d'un traitement thermique

Les traitements thermiques comportent une succession d'opérations de chauffage à une ou des températures définies, suivies d'un maintien pendant une durée fixée par la nature même du traitement, puis d'un refroidissement selon une loi imposée, entrecoupé si nécessaire d'un ou plusieurs paliers d'interruption de ce refroidissement.

Le temps technique d'un traitement thermique est donc la somme des temps nécessaires pour :

- l'éventuelle préchauffe ;
- la montée à la température de palier ; la durée est fonction de la massivité des pièces (ordre de grandeur du temps de chauffage : 2 minutes par mm), du moyen et du milieu de chauffage (convection plus ou moins efficace ou rayonnement), de l'alliage qui peut imposer une loi de montée en température ;
- le palier de maintien qui peut être déterminé par le temps nécessaire pour assurer une bonne homogénéité, pour obtenir une diffusion des éléments (exemple : dissolution des carbures).

La durée du palier est extrêmement variable selon les traitements, de quelques minutes à quelques dizaines d'heure. I

Chapitre III

Contrainte

Et

Défauts

INTRODUCTION :

Le plus souvent, on choisit un matériau pour ses qualités de tenue mécanique dans les conditions d'emploi prévues : déformation élastique (élasticité) ou plastique (ductilité) sans rupture, résistance à la pénétration (dureté), au choc (ténacité) ou à la fatigue (endurance). Ces propriétés complexes dépendent fortement de l'état structural du matériau, de la forme de l'éprouvette utilisée et des conditions d'essai (température, pression, ...). C'est pourquoi les essais mécaniques ont un caractère largement conventionnel. Mais leur bonne représentativité des conditions réelles de l'emploi des matériaux les rend particulièrement utiles à l'ingénieur.

Les essais mécaniques sont en effet distingués à simuler, aussi fidèlement que possible mais de façon simplifiée et reproductible, ces conditions d'emploi pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau et prévoir ainsi son comportement en service. La plupart des simulations réalisées par ces essais nécessitent la confection d'éprouvettes normalisées.

Ces essais sont donc destructifs et ne peuvent guère être effectués que sur un prélèvement ne constituant pas un échantillon statistique. On distingue les essais ou le temps n'a pas d'influence directe (traction, résilience, dureté) et ceux qui dépendent du temps (fluage, fatigue).

Dans notre étude on s'intéresse aux essais de traction des métaux fissurés dans des conditions extrêmes en occurrence la haute température, pour cela on déterminera dans ce chapitre l'essai de traction et les différents types de défauts issus du traitement thermique.

III.1. Essais de Traction

III.1.1. Principe

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'**essai de traction**. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.

III.1.2. Eprouvettes

Les éprouvettes de traction (figure. III.1) adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

III. 1. 5. Influence de la température sur Re et Rm :

Les définitions de Re ou Rm sont conventionnelles car elles dépendent de la section initiale de l'éprouvette (surtout Rm), de la qualité de l'extensomètre (Re), de la vitesse de mise en charge et de la température d'essai: ce ne sont pas des contraintes vraies.

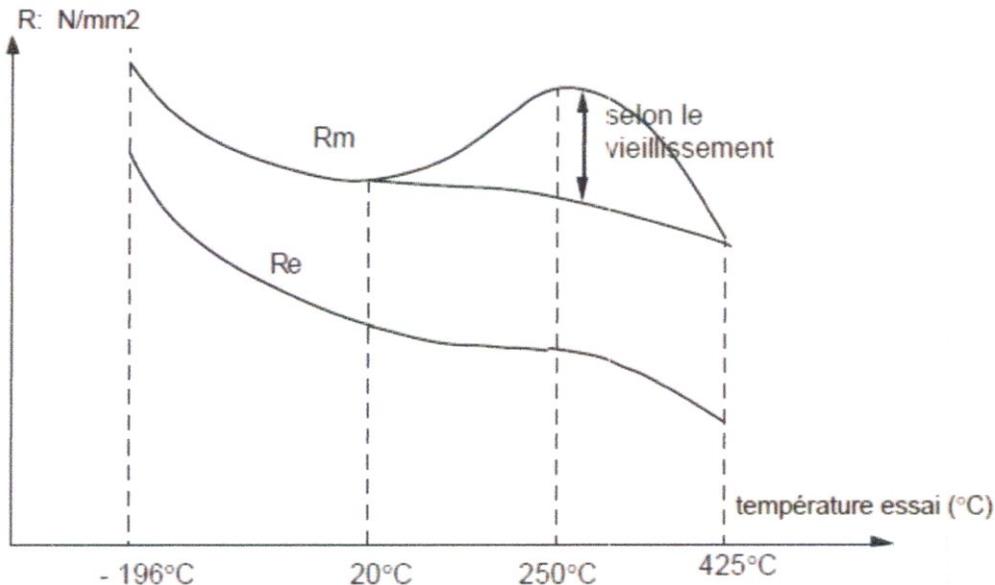


Figure III. 6 : Evolution de Re et Rm pour un acier en fonction de la température (selon L'essai de traction - Grumbach-Otua).

III. 2. LES DEFAUTS

L'utilisation rationnelle des techniques de contrôle non destructif nécessite une bonne connaissance des défauts existants dans une pièce et de leur origine dans le processus de fabrication. Dans notre étude on se base sur les différents types de défauts issus du traitement thermique qu'on va déterminer.

III.2.1. Défauts de traitements thermiques

Ces défauts de traitement thermique sont essentiellement consécutifs à la trempe qui, par suite d'inégalité des vitesses de refroidissement et du changement de volume de certains constituants, engendrent les défauts suivants :

III.2.1.1. Hétérogénéité de dureté :

Liée aux conditions de chauffage. Contraintes mécaniques résiduelles dues aux écarts de dilatation entre couche sphérique externes et volume interne.

III.2.1.2. Déformation :

Telles que cintrage et voilage, due à une répartition inégale des contraintes.

III.2.1.3. Tapures de trempes superficielles :

Décohésion brusque due aux contraintes internes développées par les variations de volume décelées dans le temps : les contraintes se développent généralement du cœur de la pièce vers la périphérie provoquant ainsi des criques en surface extérieur.

III.2.1.4. Augmentation des concentrations de contraintes sur défauts préexistants.

Le traitement thermique fera apparaitre de nouveaux défauts dont l'existence était latente, ex : criques de forge.

III.2.1.5. Contamination :

La surface extérieure des pièces soumises au traitement pourra s'oxyder ou se décarburer suivant le degré de pureté de l'ambiance du four utilisé.

Dans le cas des aciers Ferritiques recuits, les interactions carbone - dislocations peuvent induire une anomalie de limite d'élasticité (figure III.4).

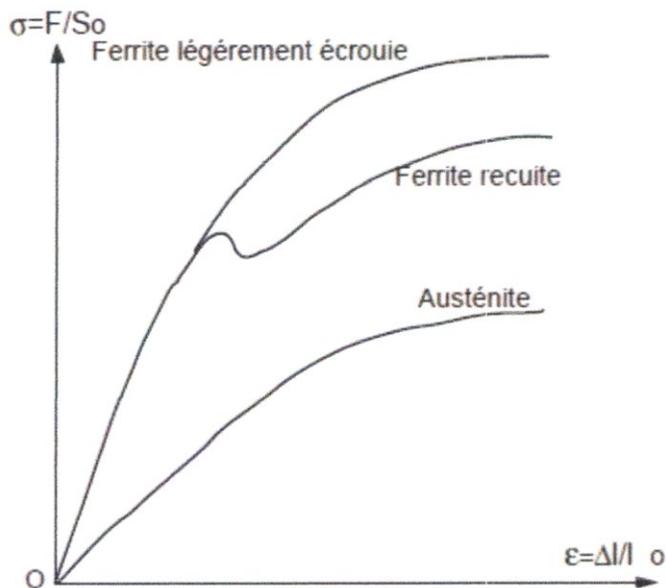


Figure III. 4. courbes de traction avant striction pour des aciers inoxydables.

III. 1. 4. Courbe réelle ou rationnelle

Dans la réalité, la section varie à chaque instant et s'éloigne de sa valeur initiale. Il en va de même pour l'allongement relatif réel.

On peut tracer la courbe de traction vraie, ou rationnelle, qui utilise les sections et déformations réelles à chaque instant et met en évidence le durcissement du matériau (écrouissage) au cours de la déformation plastique.

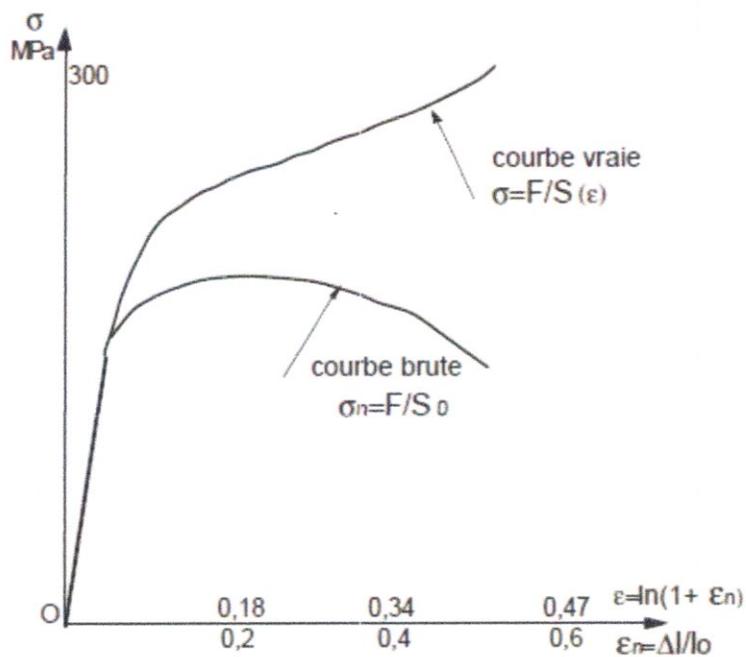


Figure III.5 : courbe réel ou rationnelle.

Le diagramme de traction (figure III. 3) ce présente comme suite :

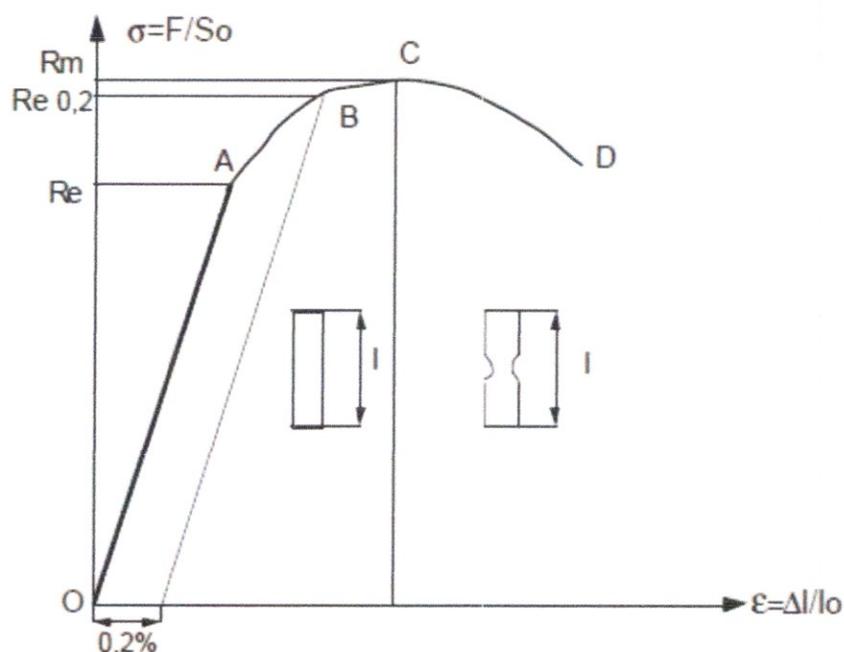


Figure III. 3. diagramme contrainte-déformation en traction d'un métal.

- La droite **OA** correspond à la déformation élastique réversible.
- La courbe **AC** est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à **OA** et il reste une déformation permanente.
- Pour **CD**, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît.
- En **D** il y a rupture de l'éprouvette.
- **Re** (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. **Re** correspond au seuil d'écoulement plastique.

$$Re = Fe / S_0$$

- **Rm** est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue (Figure III. 3) **Re** est atteint quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai.

$$Rm = Fm / S_0$$

- En l'absence de ce phénomène, quand **OA** n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité **Re0,2** qui correspond à un allongement plastique de 0,2% (Figure III. 3).

Les aciers austénitiques ont une limite élastique plus faible qui conduit en pratique à utiliser **Re0,2**.

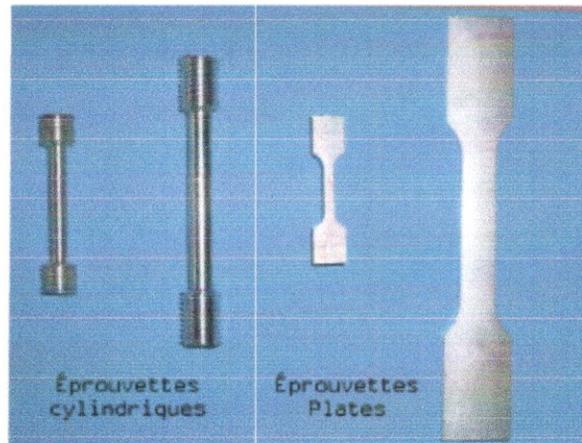
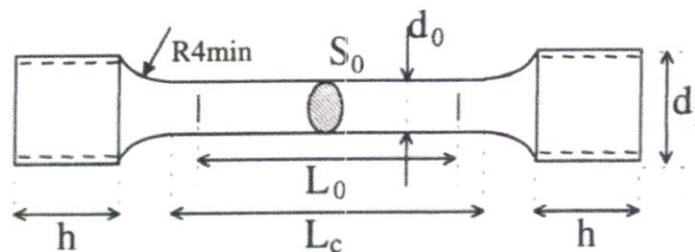


Figure III. 1 : Types d'éprouvettes.

➤ **Forme générale :**

Les éprouvettes peuvent être usinées ou brutes. Elles comportent une partie calibrée et très généralement deux têtes d'amarrage.



d_0 : \emptyset partie calibrée ;
 d_1 : \emptyset des têtes filetées;
 L_0 : longueur entre repère = $5 d_0$;
 L_c : longueur calibrée;
 H : longueur des têtes.

Figure III.2 : exemple d'éprouvette.

III. 1.3. diagramme contrainte-déformation en traction d'un métal :

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$



INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons mettre en pratique l'étude théorique des essais de traction sous hautes températures, contrôlés par les courants de Foucault et la méthode de Barkhausen (BN) ainsi que la méthode de thermographie infrarouge à fin de décrire les différentes étapes et les moyens de mises en œuvre des essais.

Le but des essais effectués est de contrôler par courants de Foucault, la méthode des BN et la thermographie plusieurs échantillons métalliques sollicités par une machine de traction pendant un temps déterminé.

IV.1. MATERIAUX UTILISES

Les matériaux utilisés dans notre étude comme mentionné précédemment sont l'Aluminium 2024, le titane (TA6V), et l'Acier Noir XC38 (Galvanisé et non galvanisé).

IV.2. REALISATION DES EPROUVETTES

- L'aluminium

La tôle d'aluminium (figure IV. 1) est d'épaisseur $e=2$ mm, a été découpée avec une guillotine électromécanique à l'atelier de l'institut de mécanique de l'université de Blida, puis la mise en forme des éprouvettes était effectué à l'aide d'une fraiseuse équipé d'une fraise a lames en hydrocarbure pour acier dure dans l'atelier du C.S.C à Cheraga suivant la norme NF EN 10002-1.

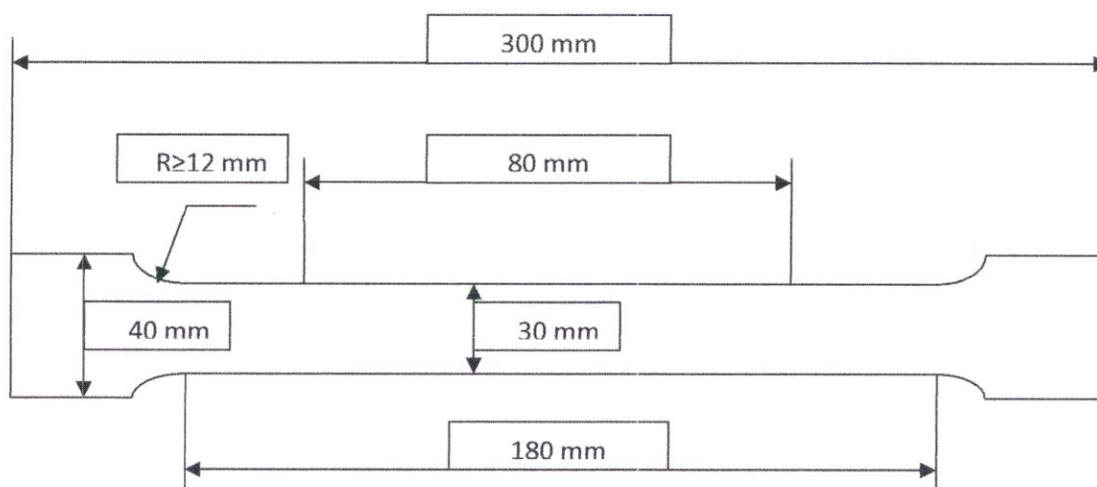


Figure IV. 1 : Epreuve d'Aluminium 2024.

- **Le Titane**

La tôle de titane (figure IV. 2) d'épaisseur $e = 2,7$ mm, a été découpé avec une guillotine électromécanique dans un atelier de construction mécanique situé dans la zone industriel de Blida, puis la mise en forme des éprouvettes était effectué a l'aide d'une fraiseuse équipé d'une fraise a lames en hydrocarbure pour acier dure dans l'atelier du C.S.C à Cheraga suivant la norme NF EN 10002-1.

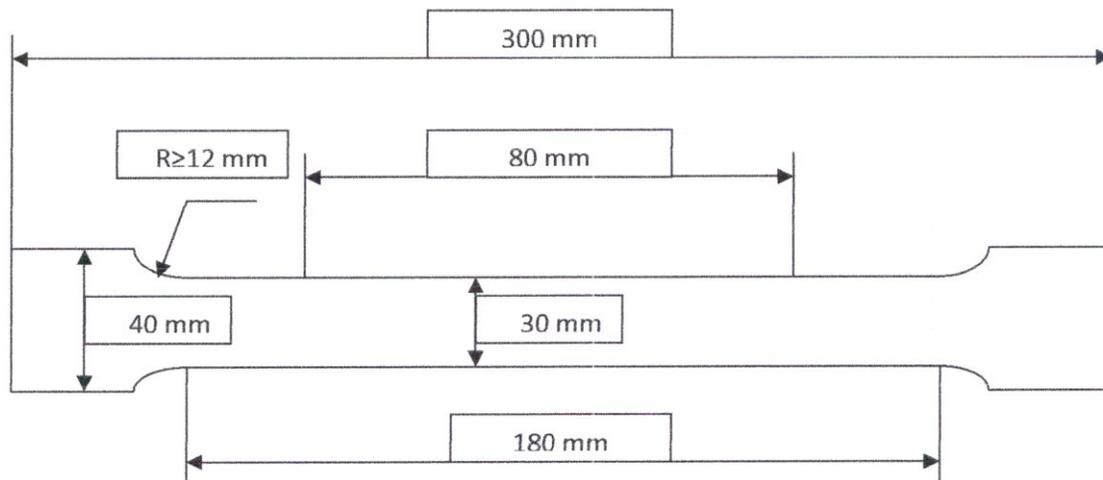


Figure IV. 2 : Epreuve de Titan TA6V.

- **Acier noir XC38 (Galvanisé et non galvanisé)**

La tôle d'acier(figure IV. 3) d'épaisseur $e = 3$ mm, a été découpé avec une guillotine électromécanique dans le laboratoire centrale de arcelore mittal, puis la mise en forme des éprouvettes était effectué a l'aide d'une fraiseuse équipé d'une fraise a lames en hydrocarbure pour acier dure dans l'atelier de société EL MAGHARIBIA, qui sont tous les deux situés a l'intérieur du complexe d'El-Hadjar a Annaba .

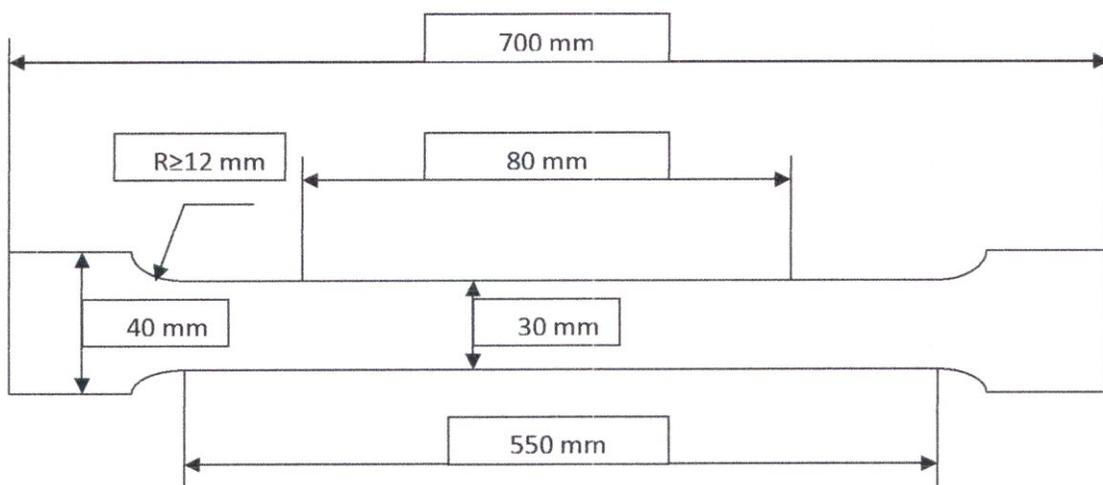


Figure IV. 3: Epreuve d'Acier XC 38 (galvanisé et non galvanisé)

N.B: Toutes les éprouvettes ont subies un pansage afin d'améliorer leur états de surfaces.

IV.3 . REALISATION DES ESSAIS

Les essais ont etait réalisés au URASM (direction des recherche appliquer -el hadjar-) à Annaba dans le laboratoire des essais mécaniques, la réalisation de ces expériences nécessite (figure IV.4) :

- Une machine de traction, avec un appareille de mesure et un ordinateur qui traduit les résultats,
- Un ensemble de mesure des CF comprend : une sonde qui prélève les données,t un appareil de mesure pour enregistrer les d et un ordinateur pour traduire résultats ;
- Un ensemble de mesure des BN qui comprend : un capteur émeteur – récepteur pour prélevé les donnés, une chaine de mesure pour la traduction des données et un oscilloscope pour les affichés et les enregistré ainsi qu'un ordinateur pour traduire les résultats ;
- Un ensemble de mesure de thermographie qui comprend : camera infrarouge et un ordinateur pour traduire les résultats.

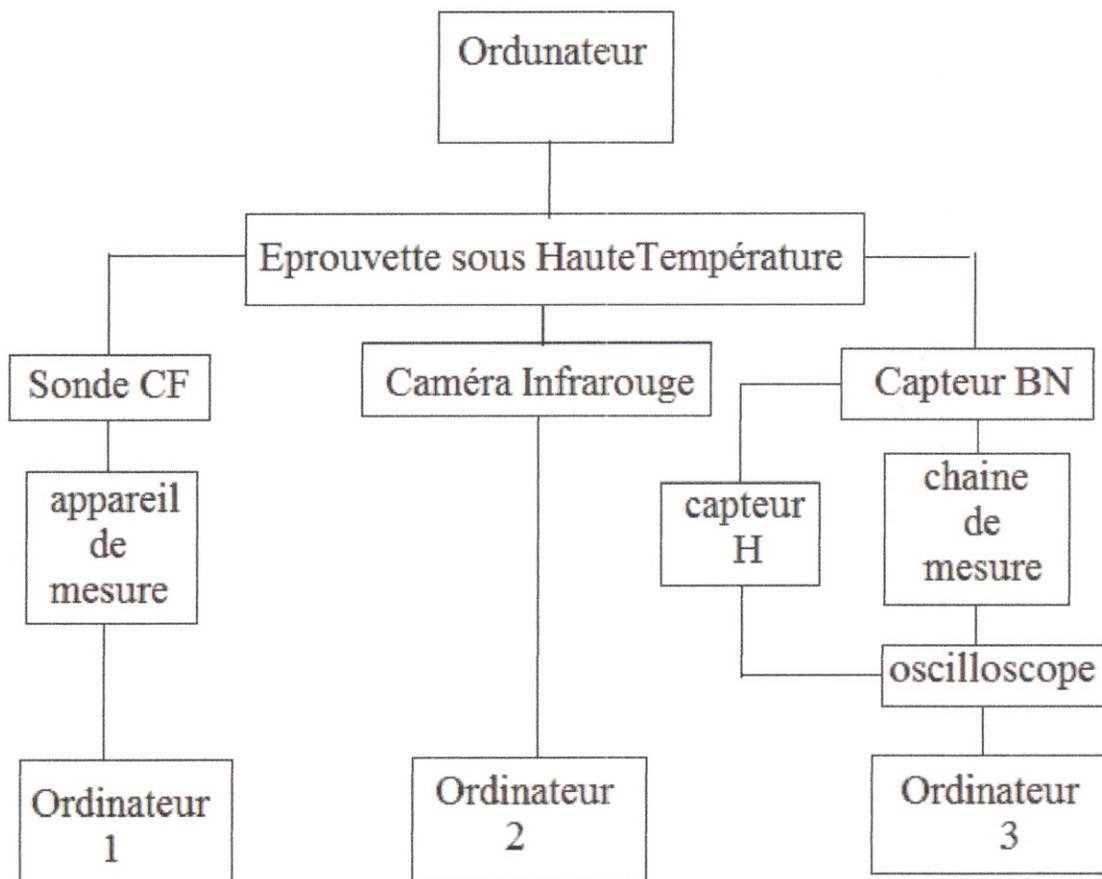


Figure IV. 4 : Organigramme de la chaîne de montage.

IV. 3. 1. machine de traction

C'est une machine servohydraulique de marque (ZWICK) de fabrication allemande (figure IV. 5), qui fait des essais de : traction, compression et pliage. A noter que la machine est équiper d'un four a résistane pour les essais a haute température.

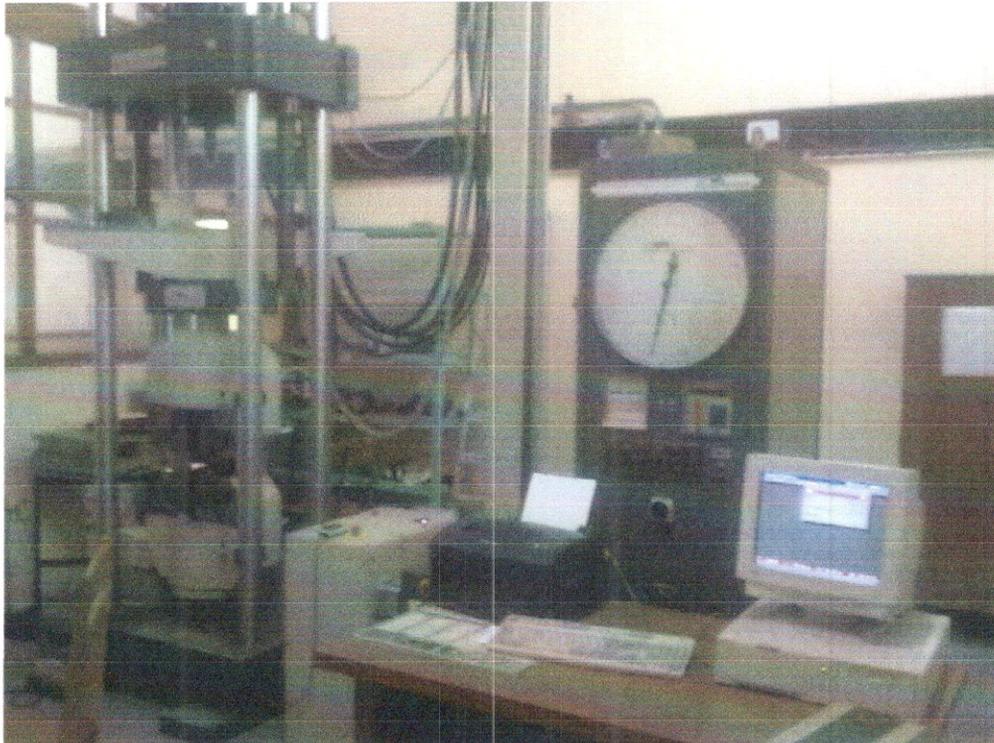


Figure IV. 5 : machine de traction (ZWICK).

IV. 3. 2. Logiciel d'exploitation de la machine de traction (ZWICK Z1011)

Le logiciel qui contrôle la machine de traction est fourni avec la machine par le constructeur (Zwick Z1011), qui permet de contrôler la machine, de tracer la courbe de traction et de calculer certains coefficients tels que l'allongement total de la zone de calibre ou le module de YOUNG.

IV. 3. 3. Les systèmes de chauffages

Nous avons utilisés deux fours, celui de la machine pour les éprouvettes d'acier noir galvanisé et le non galvanisé, et un petit four qu'on a réalisés nous-mêmes pour les éprouvettes de l'aluminium 2024, et le titane TA6V.

IV. 3. 3. 1. Le système de chauffage de la machine de traction :

C'est un four tubulaire à six résistances électrique placées en parallèle de part et d'autres et qui chauffes par radiation. L'ensemble de résistance est entouré par un isolant qui protège les six thermocouples reliés au régulateur de température, l'ensemble est encadré par une tôle très épaisse en virons 3 cm (figure IV.6).

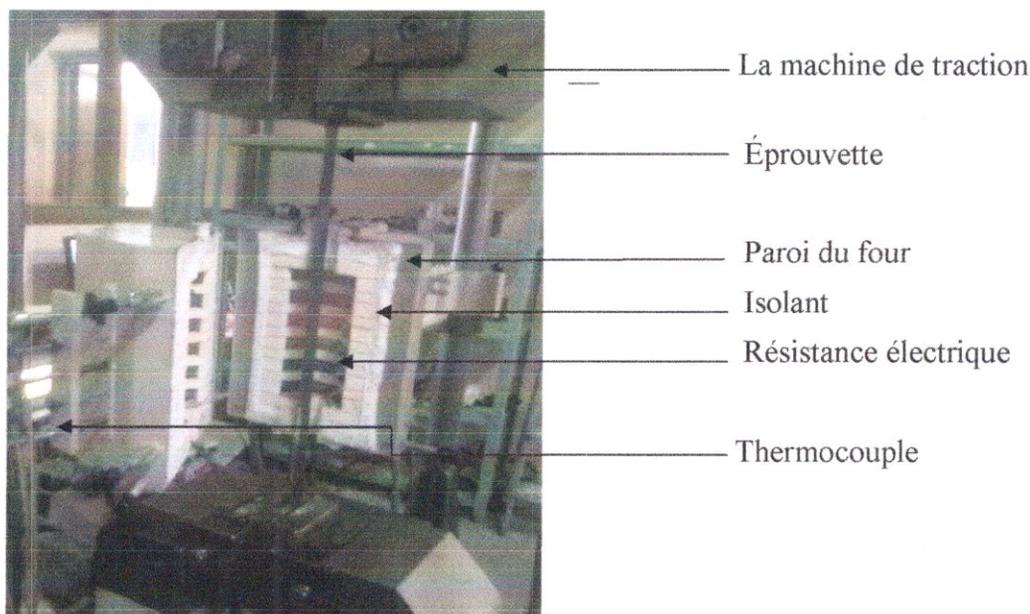


Figure IV. 6 : le four de la machine de traction.

IV. 3. 3. 2. Le système de chauffage réalisé :

Ce système est constitué d'une résistance bobinée de 1500 Watt autour d'un isolant en porcelaine supporté par un gabarit en tôle. L'ensemble est isolé de l'extérieur par une épaisseur d'environ cinq centimètre de brique réfractaire, La cohésion de l'ensemble est assurée par un cadre en tôle. Les bornés au nombre de deux sont boulonnés sur un des coté de l'isolant extérieur (figure IV. 7).

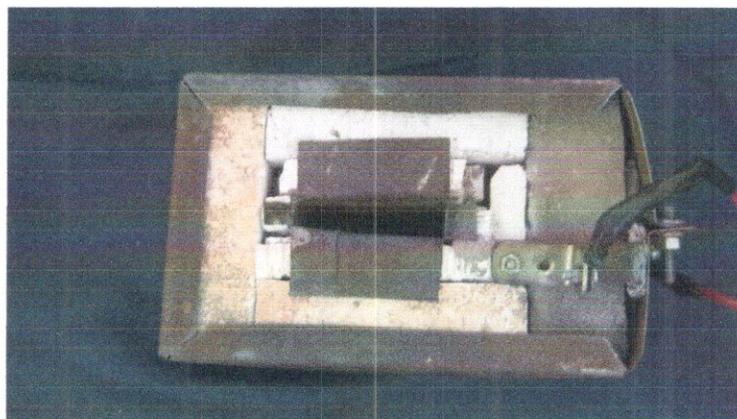


Figure IV. 7 : système de chauffage réalisé.

IV.4. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURES

IV.4.1. Méthode des Courants de Foucault :

IV. 4. 1. 1. Réalisation des sondes

La sonde utilisée (figure IV. 8) dans la méthode des CF est de diamètre $D = 7$ mm. ET d'une longueur de $l = 10$ mm, à une ou plusieurs couches, avec noyau à section circulaire.

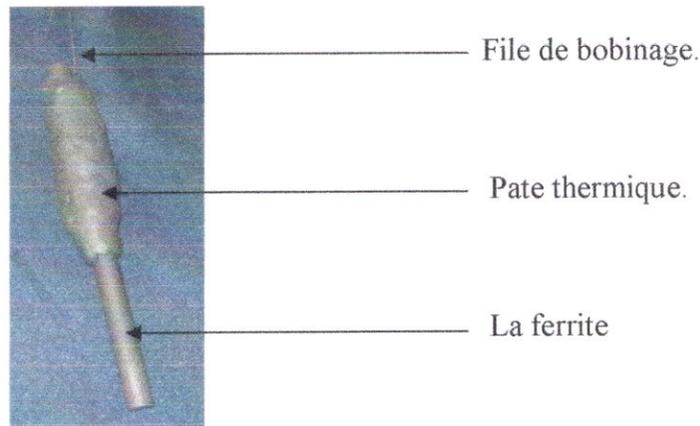


Figure IV. 8. : Sonde de CF.

a) Le choix du noyau de la sonde :

On a choisis la ferrite comme un noyau des sondes afin :

- ⊗ d'augmenter l'inductance magnétique (μ) à une valeur importante.
- ⊗ d'augmenter le flux magnétique.
- ⊗ ddiminuer la surface du contact pour focaliser le champ magnétique.

b) Méthode de fabrication de la sonde :

Nous avons procurés plusieurs échantillons de ferrite ($d = 10$ à 12 mm, $L = 7$ à 10 cm) chez les réparateurs de radio, puis on a usinés quelque échantillons avec une perceuse d'établie et du papier verre et d'autres avec une bobineuse (figure IV. 9) et papier verre a fin d'obtenir une forme cylindrique avec un petit diamètre. L'usinage c'est fait à une très basse vitesse de rotation a cause de la fragilité de la ferrite. Les échantillons usinés on étés bobinés d'un file de diamètre $d = 0,3$ mm sur l'un des extrémités du noyau en nombre de 100 spire sur 3couches avec enrobage de vernie sur chaque couche, a la fin, ces bobinage on était enveloppés par une pate thermique résistante a la haute température.



Figure IV.9 : la bobineuse.

IV. 4. 1. 1. Appareils de mesure :**a) Appareil de mesure (AGILEN) :**

Un appareil de mesure pour les paramètres électriques de marque française (AGILEN) qui permet de lire (pour nos essais) l'inductance (L) et la résistance (R) avec une précision de 10-12 pour des fréquences comprises entre 20 Hz à 1MHz qui sont prélevés par la sonde fixée sur l'éprouvette (figure IV. 10).



Figure IV. 10 : Appareil de mesure pour les C.F (AGILEN).

b) Ordinateur pour l'enregistrement des données :

L'appareil de mesure est relié avec un micro-ordinateur par le biais d'une interface GPIB.

Le logiciel développé doit alors assurer :

- ✧ Initialisation de la carte GPIB.
- ✧ Initialisation du mode opératoire de l'appareil.
- ✧ Transmission des fréquences de mesures.
- ✧ Acquisition des mesures et leurs stockages.

c) Procédure de mesure des sondes :

La première fenêtre appelée mesure manuelle assure :

- ✧ Initialisation de la carte GPIB : cette fonction est assurée automatiquement dès le début de l'acquisition par le bouton (Init).
- ✧ L'ouverture d'un fichier pour stocker les paramètres on cliquant sur le bouton (Man).
- ✧ Un simple clique sur la case à cocher permet de définir les paramètres désirés (l'impédance et la résistance).
- ✧ Définir les fréquences désirées pour le balayage.
- ✧ La mesure et le stockage des paramètres sont enregistrés dans un fichier dont le nom et la destination sont désignés dans la zone nom de Fichier.

IV.4 .2 . Méthode de Bruit de BARKHAUSEN :

IV.4 .2 .1 . Equipement et Paramètre de Mesure:

a) Oscilloscope (tektronix) :

Permet d'afficher et d'enregistrer les résultats sur des disquettes du cycle d'hystérésis et du bruit de Barkhausen (figure IV-11).

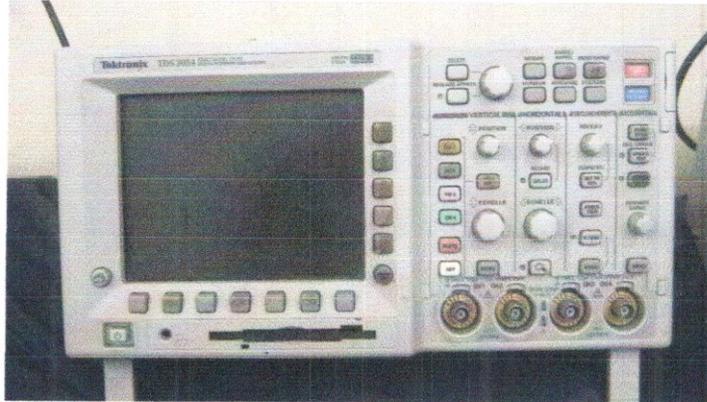


Figure IV. 11 : Oscilloscope (tektronix).

b) Chaîne de mesure BN et cycle d'hystérésis :

C'est un appareil relié a l'oscilloscope et qui mesure l'induction magnétique $B(t)$ et assure autres fonctions (figure IV. 12) :

- ⊗ Magnétisation de l'éprouvette (excitation) ;
- ⊗ Traitement des données du cycle d'hystérésis ;
- ⊗ Traitement des données des bruits de Barkhausen.



Figure IV. 12 : Chaîne de mesure BN et cycle d'hystérésis.

c) Alimentation stabilisée :

Alimentations stabilisées FI 1820 (alimentation simple 0-18 V/0-20 A) de marque française Elle est utilisée pour alimenter la chaîne de mesure (figure IV. 13).



Figure IV. 13 : Alimentation stabilisée.

d) Capteur BN:**IV.4 .3 . Méthode de thermographie infrarouge :**

Cette méthode comprend une caméra infrarouge (thermovision A 40) qui capte les rayonnements thermique infrarouge invisible à l'œil nu, et d'un ordinateur équipé d'un logiciel (FLIR Système) qui permet l'exploitation de la camera infrarouge (FLIR Système), il règle les différents paramètres de la caméra et il permet l'enregistrement et la visualisation des vidéos et images (figure IV. 14).

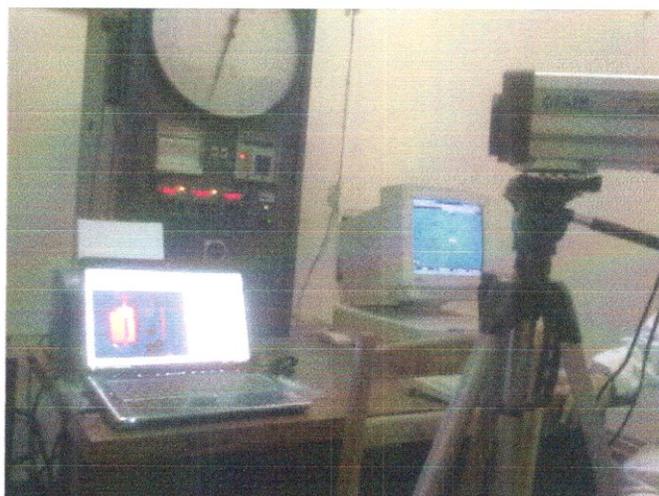


Figure IV. 14 : ensemble caméra infrarouge-ordinateur.

IV.5. LES ESSAIS

IV. 5. 1. Aluminium 2024

- Essai N° 1

On fait un essai de traction jusqu'à la rupture pour connaître les caractéristiques mécaniques du métal sa limite élastique et plastique.

| | | |
|----------------------|-----------------------------|--------------------|
| Eprouvette n° 1, n°2 | Longueur entre repères (L0) | 80 mm |
| | Largeur : b | 30 mm |
| | Epaisseur : e | 2 mm |
| | Longueur calibrée : Lc | 180 mm |
| | Section initiale : S0 | 60 mm ² |

Tableau IV. 1 : Dimension des éprouvettes d'Aluminium 2024.

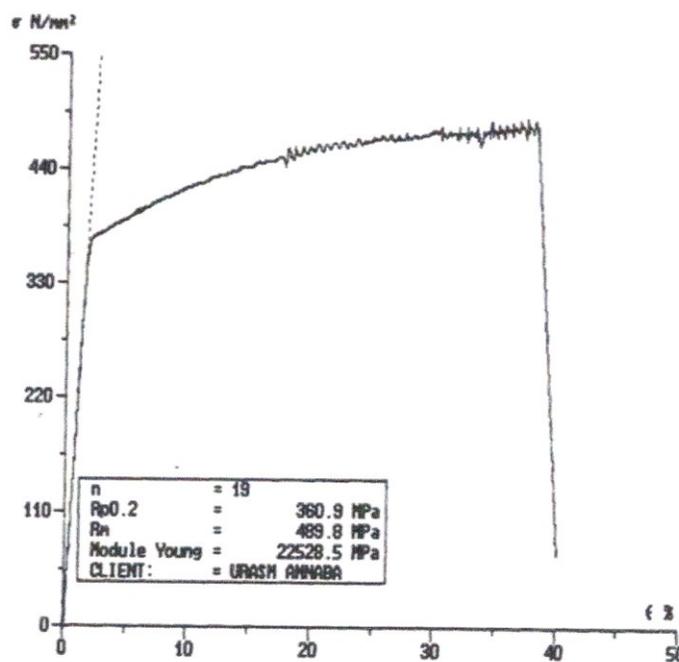


Figure IV. 15 : Diagramme de traction pour l'éprouvette d'Aluminium N° 1.

- Essai N° 2

On a placé une 2eme éprouvette qu'on a entaillés nous-mêmes dans le petit four que nous avons fabriqué, on augmente la température toute en prenant des mesures d'infrarouge et de CF chaque 10 minute (le temps nécessaire d'une prise de CF) jusqu'à ce qu'on atteint 350°C dans la zone élastique.

- Essai N°3

On applique une charge 21 KN sur La même éprouvette sous une température fixée 350° et on prend des mesures d'infrarouge et de CF chaque les 10 minutes dans la zone élastique.

IV. 5. 2. Titane

• Essai N° 1

Dans cet essai on fait une traction jusqu'à la rupture pour connaître les caractéristiques mécaniques du métal et la limite élastique et plastique.

| | | |
|-------------|-----------------------------|--------------------|
| Eprouvettes | Longueur entre repères (L0) | 80 mm |
| | Largeur : b | 30 mm |
| | Epaisseur : e | 2 mm |
| | Longueur calibrée : Lc | 180 mm |
| | Section initiale : S0 | 60 mm ² |

Tableau IV. 2 : Dimension des éprouvettes de Titane.

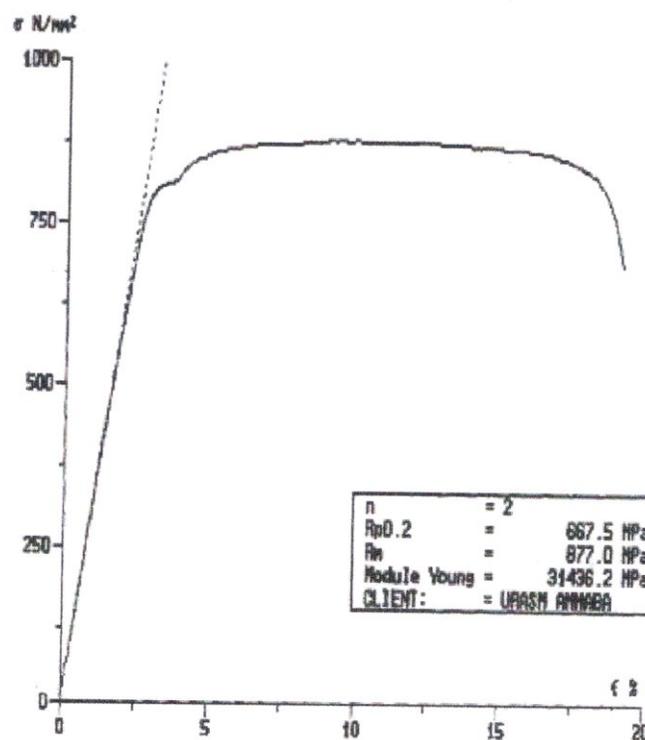


Figure IV. 16 : Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°1.

• Essai N° 2

On a placé une 2eme éprouvette qu'on a entaillés nous-mêmes dans le petit four que nous avons fabriqué, on augmente la température toute en prenant des mesures d'infrarouge et de CF chaque 10 minute (le temps nécessaire d'une prise de CF) jusqu'à ce qu'on atteint 350°C dans la zone élastique.

- **Essai N°3**

On applique une charge 21 KN sur La même éprouvette sous une température fixée 350° et on prend des mesures d'infrarouge et de CF chaque les 10 minutes dans la zone élastique.

IV. 5. 3. Acier XC 38 non galvanisé

- **Essai N° 1**

Dans cet essai on fait une traction jusqu'à la rupture pour connaitre les caractéristiques mécaniques du métal et la limite élastique et plastique.

| | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Eprouvettes n°1,n°2, | Longueur entre repères (L0) | 80 mm |
| | Largeur : b | 30 mm |
| | Epaisseur : e | 3 mm |
| | Longueur calibrée : Lc | 550 mm |
| | Section initiale : S0 | 90 mm ² |

Tableau IV. 3 : Dimension des éprouvettes d'acier noir XC 38 non galvanisé

Remarque :

Dans cet essais nous n'avons pas pue présenter le diagramme de traction pour des problèmes technique de la machine .

- **Essai N° 2**

On a placé une 2eme éprouvette qu'on a entaillés nous-mêmes dans le four de la machine de traction , on augmente la température toute en prenant des mesures d'infrarouge, de CF et de BN chaque 10 minutes (le temps nécessaire d'une prise de CF et de BN) jusqu'à ce qu'on atteint 350 °C dans la zone élastique.

- **Essai N°3**

On applique une charge 12 KN sur La même éprouvette sous une température fixée 350°C et on prend des mesures d'infrarouge et de CF et de BN chaque les 10 minutes dans la zone élastique.

IV. 5. 3. Acier XC 38 galvanisé

- **Essai N° 1**

Dans cet essai on fait une traction jusqu'à la rupture pour connaitre les caractéristiques mécaniques du métal et la limite élastique et plastique.

| | | |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Eprouvettes n°1,n°2,n°3 | Longueur entre repères (L0) | 80 mm |
| | Largeur : b | 30 mm |
| | Epaisseur : e | 3 mm |
| | Longueur calibrée : Lc | 550 mm |
| | Section initiale : S0 | 90 mm ² |

Tableau IV. 4 : Dimension des éprouvettes d'acier noir XC 38 galvanisé

Remarque :

Dans cet essais nous n'avons pas pue présenter le diagramme de traction pour des problèmes technique de la machine .

- **Essai N° 2**

On a placé une 2eme éprouvette qu'on a entaillés nous-mêmes dans le four de la machine de traction , on augmente la température toute en prenant des mesures d'infrarouge, de CF et de BN chaque 10 minutes (le temps nécessaire d'une prise de CF et de BN) jusqu'à ce qu'on atteint 650 °C dans la zone élastique.

- **Essai N°3**

On applique une charge 3 KN sur La même éprouvette sous une température fixée 650°C et on prend des mesures d'infrarouge et de CF et de BN chaque les 10 minutes dans la zone élastique.

Remarque

Dans cet essais nous n'avons pas pue augmenter les charges car la machine ne fonctionnée plus.

Chapitre V

INTERPRETATION

DES RESULTATS

Chapitre VI

APPROCHE EXPERIMENTALE

Introduction

Dans ce chapitre nous allons mettre en évidence les résultats des expériences citées précédâmes, dans le chapitre IV :

- ↷ les diagrammes d'impédance de chaque essai pour les CF, et donner leurs interprétations.
- ↷ le cycle d'hystérésis et les diagrammes: FFT, DSP et L'enveloppe du signal ainsi que La transformation temps- fréquence sans oublier le cycle d'hystérésis pour les BN et donner leurs interprétations.
- ↷ les diagrammes de la thermographie et leurs interprétations.

V.1. Interprétation des CF

Afin de pouvoir mettre en évidence l'effet des défauts sur le bruit de BN et la courbe de cycle d'hystérésis nous avons opté par une procédure expérimentale qui est la suivante :

- 1- Préparation des pièces à contrôler.
- 2- Contrôle des pièces préparées par BN et le cycle d'hystérésis.
- 3- Acquisition des résultats par la chaîne de contrôle et stockage sur un PC.
- 4- Traitement des résultats par un programme élaboré à cet effet, qui permet de calculer la FFT et la densité spectrale (DSP) des signaux de BN acquis et tracé du cycle d'hystérésis.

V.1. 1. Influence de la Température :

V. 1. 1. 1. L'aluminium :

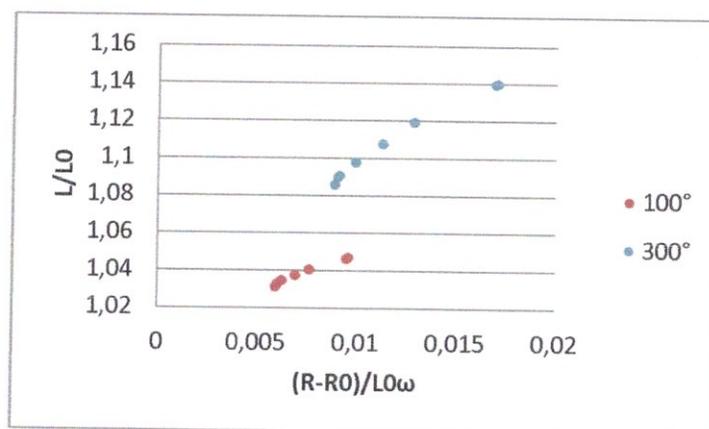


Fig. V. 1 : Diagramme d'impédance de l'influence de la température sur l'aluminium 2024

Il en est de même nous remarquons que pour les métaux non ferromagnétique a savoir l'aluminium, les deux trajectoires pour diagramme d'impédance pour les deux températures sont différents ce qui prouve que le comportement intérieure du métal est différents et comme nous travaillons avec des métaux non ferreux la seul variation est due a la conductivité du métal (σ).

V. 1. 1. 2. Le Titan TV6A :

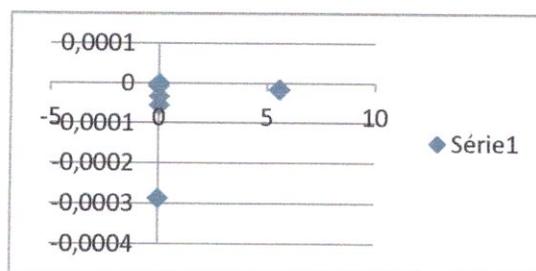


Fig. V. 2 : Diagramme d'impédance de l'influence de la température sur le titan TV6A.

Les résultats non pas était valable en cause de défaillance de la sonde des CF.

V. 1. 1. 3. L'Acier noir XC38 non galvanisé :

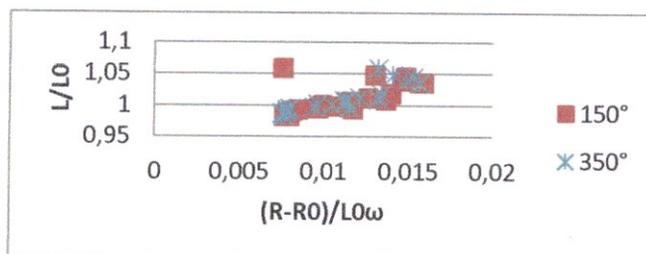


Fig. V. 3 : Diagramme d'impédance de l'influence de la température sur L'Acier noir XC38 non galvanisé.

Nous n'avons pas pue mètre en évidence les températures élevées mais au moins nous remarquons des résultats aléatoires (éparpier) ce qui prouve que le matériau subit une agitation électrique.

Nous remarquons qu'il y'a une variation des trajectoires de diagramme d'impédance lors de l'amorçage par un défaut, il est de même pour le non amorçage. La présence le l'amorçage n'a pas donner de variation visible par CF.

V. 1. 1. 4. L'Acier Noir XC38 Galvanisé :

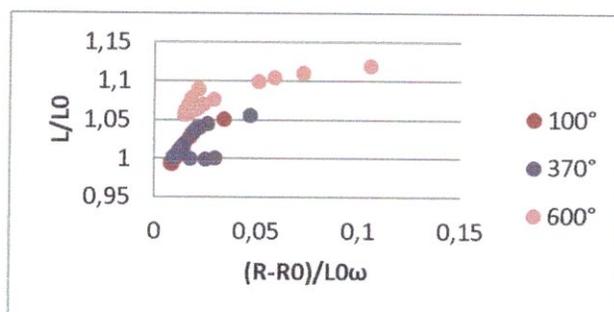


Fig. V. 4 : Diagramme d'impédance de l'influence de la température sur L'Acier noir XC38 galvanisé.

Nous remarquons que la température influe énormément sur le comportement du métal, en effet les valeurs de l'inductance et de résistance à $T = 600^{\circ}\text{C}$ normalisée sont nettement différentes à ceux de 100°C , par contre entre 100°C et 370°C la variation est nettement faible, ceci s'explique par l'agitation qui entraîne de se produire par l'effet de la température. Une comparaison n'a pas pu être effectuée avec un échantillon non amorcé pour des problèmes techniques.

V.2. Interprétation Des BN

V. 2. 1. Acier NoirXC38 Non Galvanisé

V. 2. 1. 1. Introduction :

Afin de pouvoir mettre en évidence l'effet des défauts sur le bruit de BN et la courbe de cycle d'hystérésis nous avons opté par une procédure expérimentale qui est la suivante :

- 1- Préparation des pièces à contrôler.
- 2- Contrôle des pièces préparées par BN et le cycle d'hystérésis.
- 3- Acquisition des résultats par la chaîne de contrôle et stockage sur un PC.
- 4- Traitement des résultats par un programme élaboré à cet effet, qui permet de calculer la FFT et la densité spectrale (DSP) des signaux de BN acquis et tracé du cycle d'hystérésis.

V. 2. 1. 2. Analyse et interprétation des résultats :

Les résultats trouvés montrent que la réalisation faite aussi que le soft développé permet de traiter les différentes caractéristiques de contrôle non destructif du matériau et d'aider dans le diagnostic final sur l'évaluation du défaut de l'échantillon étudié.

Les résultats sont obtenus grâce à la chaîne de mesure de barkhausen et au développement du programme élaboré.

A partir de l'acquisition de bruit de barkhausen et cycle d'hystérésis nous pouvons déterminer :

- **FFT et DSP** : qui permettent d'évaluer le nombre de pics et leurs positions ainsi que leurs amplitudes.
- **L'enveloppe du signal** : qui permettent de déterminer le nombre de pics ainsi que leurs amplitudes.
- **La transformation temps- fréquence** : elle permet de déterminer les fréquences qui correspondent à un maximum d'énergie dans le signal.
- **Cycle d'hystérésis** : grâce à ce dernier on peut déterminer les caractéristiques suivantes des matériaux : le champ coercitif (H_c), l'induction résiduelle (B_r), et l'induction de saturation (B_s).

1) Analyse par enveloppe :

L'analyse par enveloppe se fait par rapport à la partie positive du signal car on remarque qu'il y a une symétrie par rapport à l'axe de temps.

Dans le cas de l'enveloppe et en CND on s'intéresse à la forme de l'enveloppe et en particulier au décalage du pic.

La répétitive des résultats est obtenue. De plus l'amplitude et le nombre de sauts sont différents suivant le traitement métallurgique élaboré.

Les résultats obtenus sont importants, ils permettent d'interpréter un état de la pièce a contrôlée, l'amplitude et les sauts sont différents suivant la nature et la dimension du défaut.

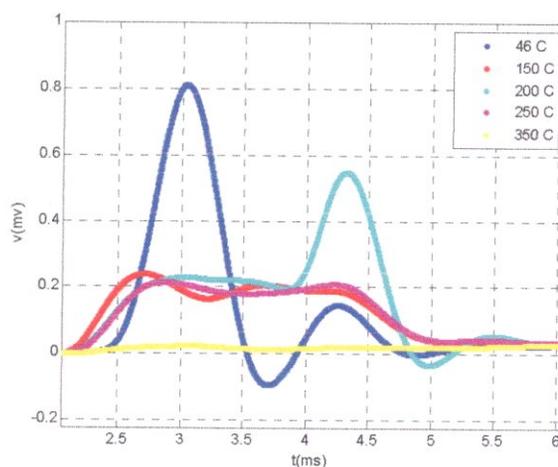


Figure. V. 5 : Effet température sur le PIC Barkhausen

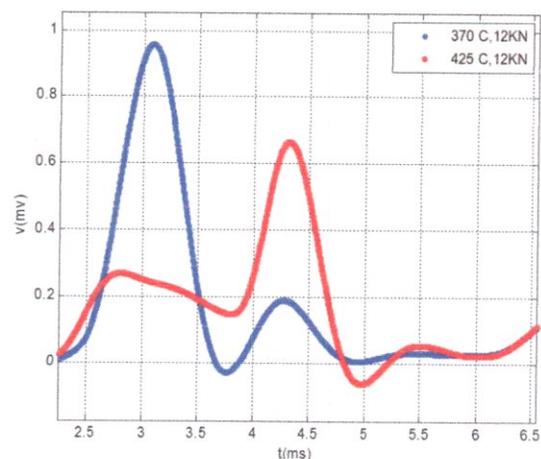


Figure. V. 6 : Effet de traction sur le PIC Barkhausen.

Les mêmes remarques sont obtenus pour la pièce traitées thermiquement, nous remarquons que les amplitudes diffèrent selon le temps de maintien et donc suivant la nouvelle configuration microstructurale.

Remarquons que l'application d'une contrainte de traction provoque l'augmentation de l'amplitude du pic.

2) Analyse par FFT et la DSP :

Les résultats obtenus sont satisfaisants dans le sens que la répétitivité des résultats aussi les amplitudes obtenus par FFT et DSP sont différentes suivant les traitements effectués.

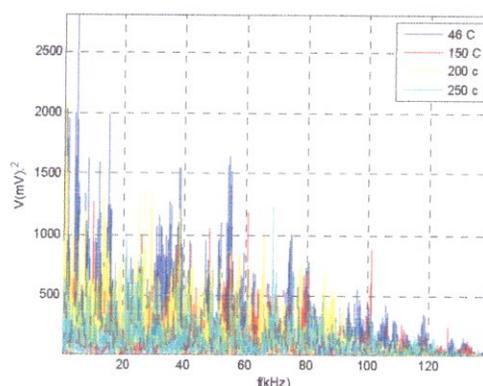


Figure V. 7 : Effet température sur le PIC FFT et DSP.

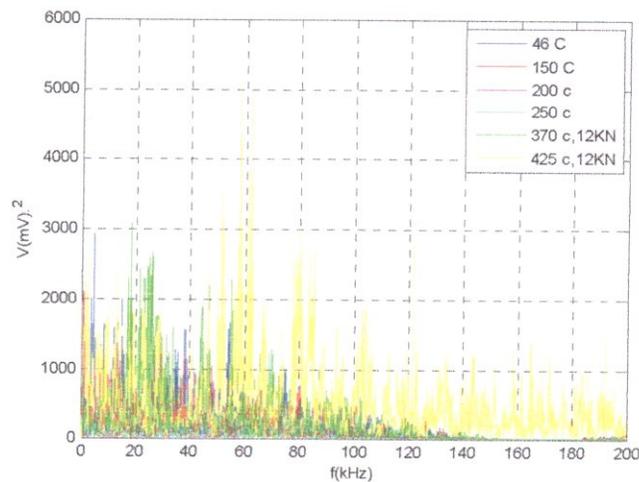


Figure. V. 8 : Effet traction sur le PIC FFT et DSP.

L'étude des amplitudes donne énormément d'information sur le caractère microstructurale du matériau.

De ces diagrammes nous déduisons les variations des FFT et DSP maximales relatives aux nuances étudiées en fonction du temps.

Nous Remarquons que l'application d'une contrainte de traction provoque l'augmentation de l'amplitude obtenue par FFT et DSP.

Pour le traitement thermique, on remarque que les amplitudes diminuent avec l'augmentation de température.

Le bruit Barkhausen contient beaucoup d'information cela dépend du niveau de traitement voulu. Pour la caractérisation microstructurale la FFT et DSP permettent de déterminer l'état du matériau.

Pour pousser l'étude métallurgique, nous avons réalisé d'autre moyenne de traitement numérique. En effet la caractérisation nano structurale nécessite des traitements plus poussés de façon à extraire l'information utile.

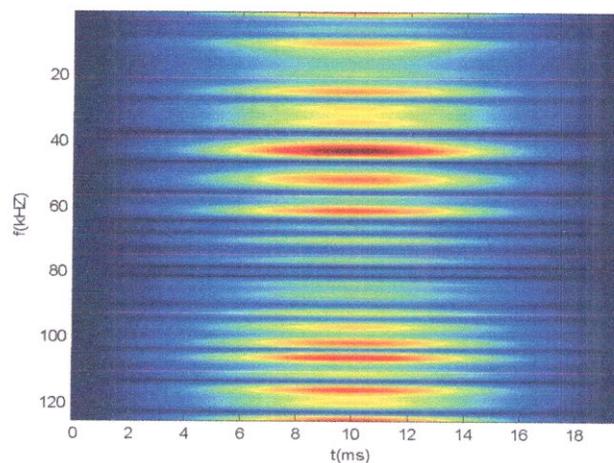


Figure. V. 9 : représentation temps/fréquence pour $T=46C^{\circ}$

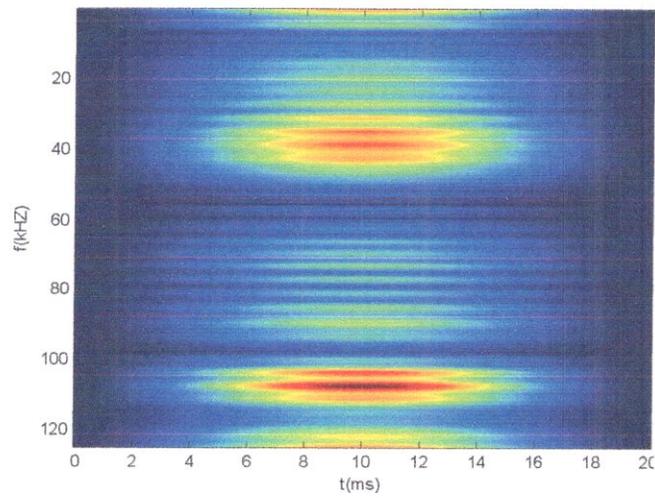


Figure. V. 10 : représentation temps/fréquence pour $T = 350^{\circ}\text{C}$

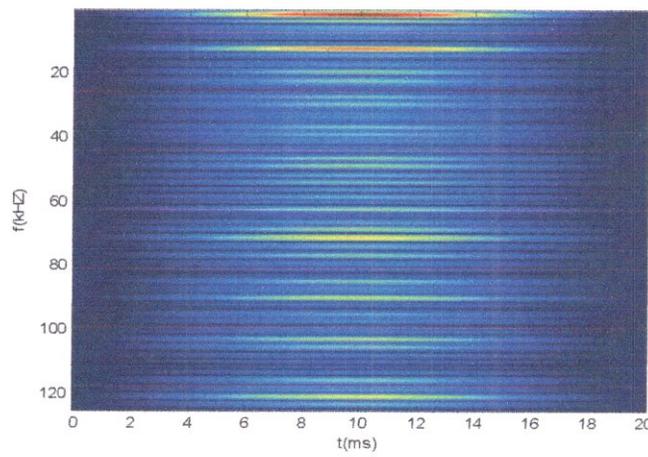


Figure. V. 11 : Représentation Temps / Fréquence : $T=370^{\circ}\text{C}$, $F=12\text{KN}$

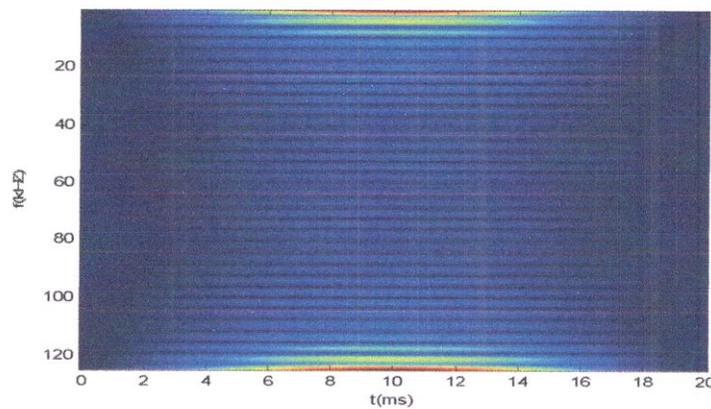


Figure V. 12 : représentation temps / fréquence : $T=425^{\circ}\text{C}$, $F=12\text{KN}$

3) Analyse par La transformation temps- fréquence :

Les résultats obtenus par cette méthode permettent de déterminer les fréquences correspondantes à des amplitudes déterminées.

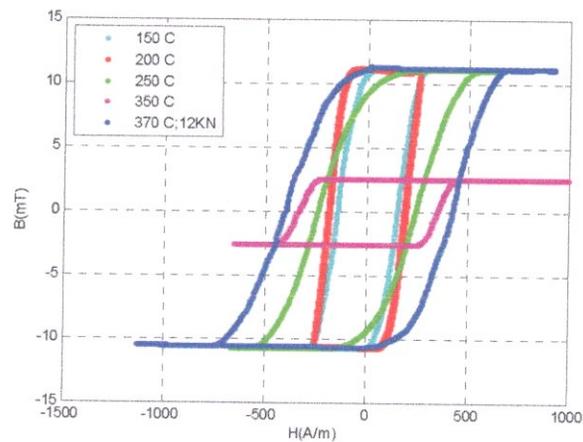


Figure 13 : Effet température et traction sur la forme de cycle.

Nous remarquons que les résultats sont différents suivants les traitements effectués ce qui montrent que les signaux obtenus sont différents en fonction de la modification microstructurale.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'analyser la réponse microstructurale du matériau.

4) Analyse par Cycle d'hystérésis :

Concernant les résultats obtenus par le cycle d'hystérésis sont intéressantes, elles sont influençable par le traitement subi et elles sont reproductible, pour chaque échantillon nous avons réalisé plusieurs tests et les courbes obtenus étaient différentes.

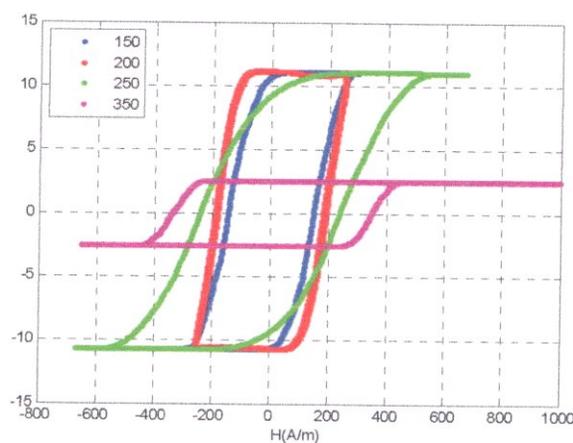


Figure V. 14 : effet température et traction sur la forme de cycle.

Nous remarquons également que la forme du cycle d'hystérésis change d'une nuance à une autre, les modifications apportées à la microstructure expliquent cette

variation des paramètres essentiels : champ coercitif (H_c), l'induction remanente (B_r), et l'induction de saturation (B_s).

Les résultats obtenus à travers nos acquisitions montrent que les signaux correspondant au cycle d'hystérésis pour chaque type de traitement (traitement thermiques, application de traction) sont différents. Cela montre que cette étude présente des résultats satisfaisants.

On remarque que pour le cycle en rouge (application d'une force de traction de 12KN et le matériau chauffé a 425°C), on a pas arrivé a saturé notre matériau .

Les pièces ayant subi des traitements leurs cycles sont différents comparativement a la référentielles.

V. 2. 1. 3. Conclusion :

Les différents programmes de traitement du signal développés (FFT, DSP, temps – fréquence, enveloppe du signal) permettent la caractérisation de l'état métallurgique de la pièce étudiée ainsi que sa classification, et la méthode de cycle d'hystérésis permet de donner un référence sur la nano structure des spécimens. La chaîne de contrôle (BN) est très sensible aux de différents paramètres qui interviennent lors d'un contrôle. Les résultats obtenus sont intéressants et prometteurs.

V. 2. 2. Acier Noir XC38 Galvanisé

1) Acier Galvanisé ($T=650\text{ C}^0$)

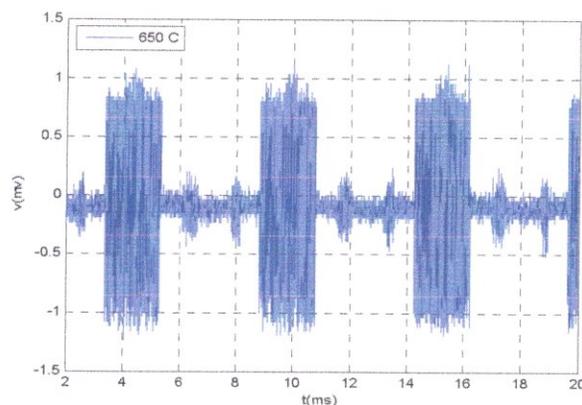


Figure V. 15 : BN

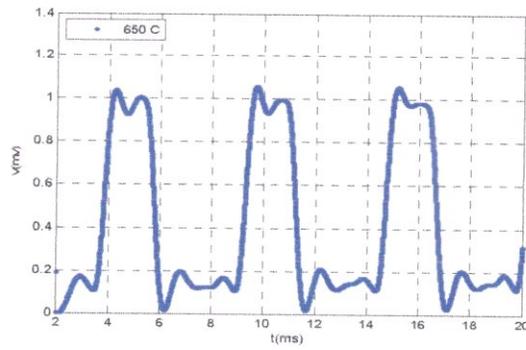


Figure. V.16 : Enveloppe

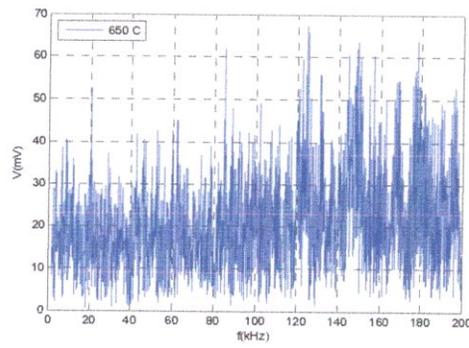


Figure. V.17 : FFT

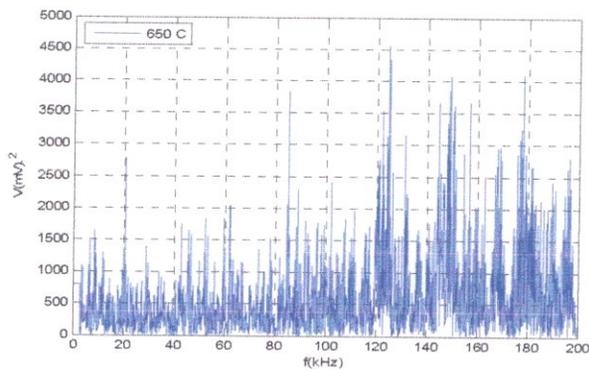


Figure. V.18 : DSP

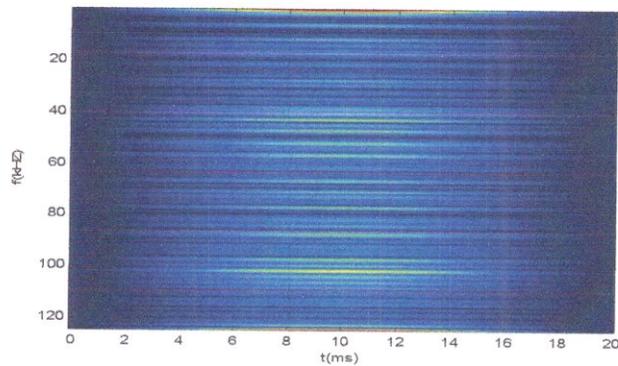


Figure. V.19 : Temps/fréquence

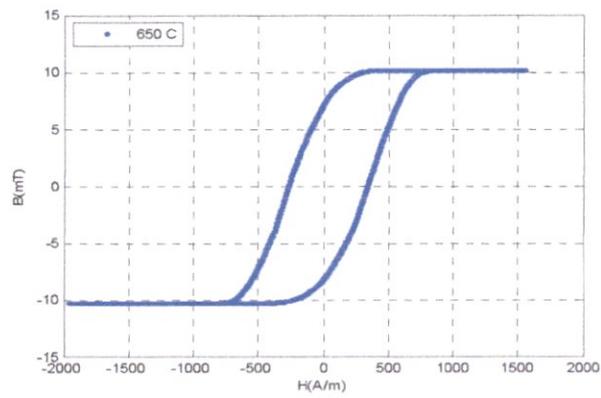


Figure. V.20 : Hystérésis

2). acier galvanisé (T=650 C⁰ ,F=3000N)

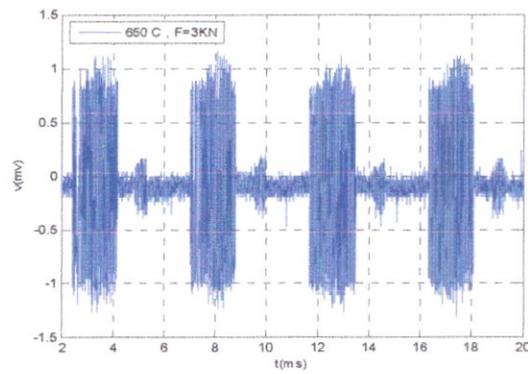


Figure. V. 21 : BN

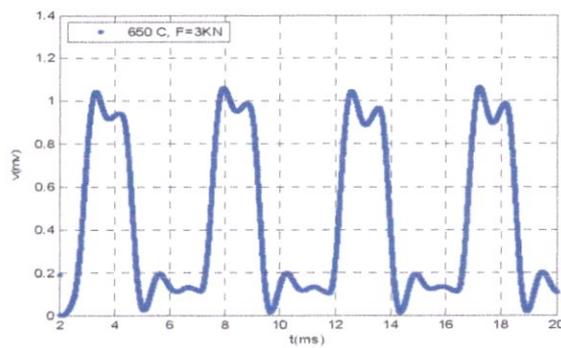


Figure. V. 22 : Enveloppe

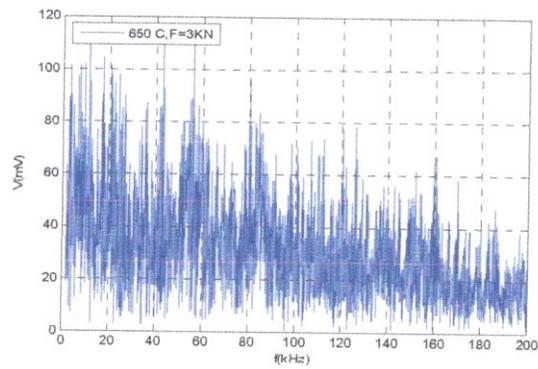


Figure. V. 23 : FFT

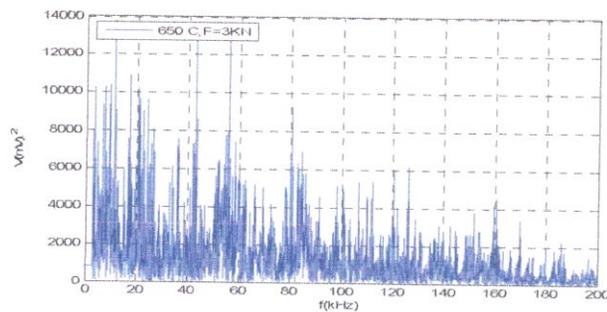


Figure. V. 24 : DSP

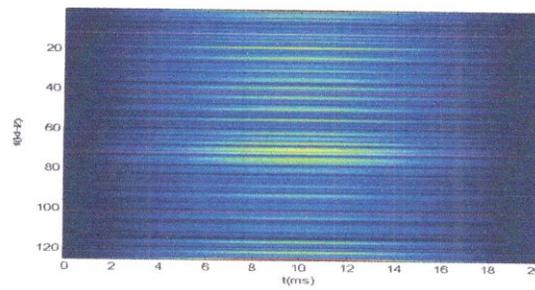


Figure. V. 25 : Temps /fréquence

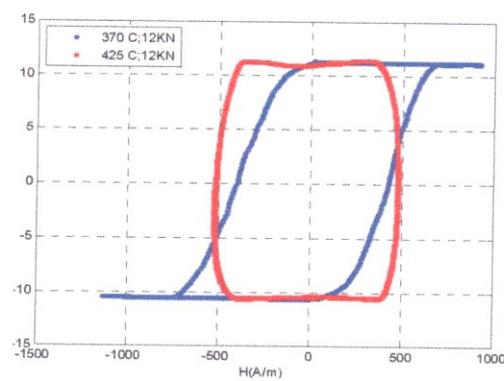
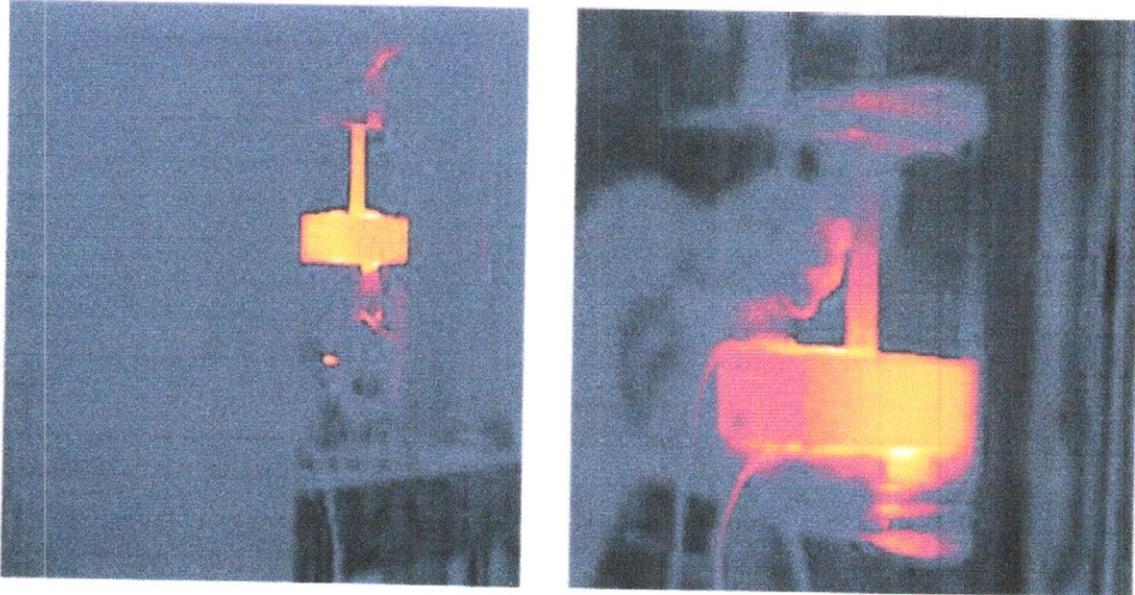


Figure. V. 26 : Hystérésis

V.3 Interprétation des résultats de la thermographie

Le graphe montre un contrôle thermographique sur une contrainte axiale.

CONCLUSION

Le contrôle et l'évaluation non destructifs par procédé magnétique des matériaux sont très demandés dans l'industrie grâce au gain économique et au gain temporel en plus de l'augmentation de la durée de vie de l'installation et de la minimisation du risque d'accident. La recherche et l'investigation dans ce domaine étant très compétitives, la technique de contrôle par courants de Foucault, tient par sa sensibilité une place importante qui la sollicite pour résoudre des problèmes complexes dans l'aérospatiale. La simplicité de cette technique et les divers avantages qu'elle offre dans la détermination des propriétés intrinsèques des matériaux.

En effet, ces techniques font appel à diverses disciplines, et ainsi la coopération de plusieurs laboratoires de différents domaines. Sans oublier que les travaux de recherche et de développement nécessitent des moyens technologiques très grands. Dans le contrôle par courant de Foucault, le système de mesure est très important, en effet il apparaît, après étude des différents types de sondes à géométrie différente qu'il est nécessaires de souligner que le succès d'une recherche et la faisabilité d'une application donnée dépend de la conception de la sonde, de telle sorte que celle-ci soit le mieux adaptée au problème considéré.

L'information contenue dans le signal reçu offre la possibilité de déterminer plusieurs paramètres dans le but d'analyser le matériau. L'interprétation du signal est la plus délicate et difficile dans le sens où il est toujours difficile de relier le signal à un événement mécanique ou métallurgique.

L'utilisation des courants de Foucault est très importante dans l'évaluation des microstructures. En effet pour l'aluminium, nous remarquons des oscillations pour chaque pas de mesure avec une augmentation de l'impédance vers les temps de sollicitations plus élevés. Contrairement au titane du Diagramme d'impédance conclusion à tirer par rapport à l'aluminium est la régularité des trajectoires et donc la stabilité du titane.

Les résultats obtenus permettent d'affirmer que le contrôle non destructif permet un diagnostic sur le comportement du matériau, en effet les résultats obtenus par courants de Foucault sont différents suivant la sollicitation et suivant l'échauffement que subit le matériau. Ces résultats sont valables pour tous les matériaux y compris pour le Titane.

Les résultats obtenus par Le BN et par le cycle d'hystérésis sur le matériau ferromagnétique ont déjà prouvé leur efficacité. En effet l'état métallurgique du matériau soumis à des traitements thermiques et une charge peut être diagnostiqué par ces techniques. Les résultats obtenus permettent de constater les variations des résultats en fonction de la charge et de la température. De donner Les différents programmes de traitement du signal développés (FFT, DSP, temps - fréquence, enveloppe du signal) permettent la caractérisation de l'état métallurgique de la pièce étudiée ainsi que sa classification, et la méthode de cycle d'hystérésis permet de donner sur les contraintes que peut subir un matériau soumis à des sollicitation.

Les résultats obtenus montrent que le défaut créé dans les pièces contrôlés donnent des résultats différents par rapport aux échantillons ne contenant pas de défauts. Nous remarquons aussi que les signaux obtenus par la présence du défaut est noyé dans les signaux des échantillons ne contenant pas de défauts, cela par comparaison, et qu'une étude plus poussée dans le traitement de signal permettrait de pouvoir conclure sur la présence du défaut et sa contribution dans l'accélération de la procédure de contrainte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J.BARRALIS, G.MAEDER**
Précis de métallurgie 5^{ème} édition 1990
Elaboration, structures-propriétés et normalisation

- [2] **BAILON.J.P, DORLOT J.M**
Des matériaux troisième édition
Presse internationales polytechnique

- [3] **C. CHAUSSIN, G. HILLY**
Métallurgie. Tome 1 Alliage Métallique
BORDAS, 1976

- [4] **Jacques DUMONT-FILLON 2000**
Ingénieur de l'École Centrale de Paris
Contrôle non destructif (CND)
Techniques de l'Ingénieur R 1 400 – 1

- [5] **Jean PERDIJON**
Aide-mémoire contrôle des matériaux
DUNOD ; Paris 2003.

- [6] **Gilbert Gaussorgues**
La thermographie infrarouge ; principe, technologie, application
Technique et documentation 1999.

- [7] **Association Technique Du Traitement Thermique.**
Guide de Choix du Traitement Thermique
DUNOD, paris 2009

- [8] **Bailon J.B, Dorolt J.M**
« Matériaux », Presse Internationales Polytechnique.
Troisième édition 2000