

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



PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDE UNIVERSITAIRE
APPLIQUE EN AERONAUTIQUE

OPTION : STRUCTURE

THEME

ÉLABORATION ET ANALYSES DES CONTRAINTES DANS L'ALUMINIUM 2024 ET LE TITANE PAR COURANT DE FOUCAULT

Réalise par :

NAILI Abdelaziz
BOUDJAKDJI Chafik

Proposé et dirigé par :

Dr. ZERGOUG Mourad

2007/2008

RESUME

Notre travail à pour objectif d'étudier les contraintes interne subie dans les matériaux, en l'occurrence l'Aluminium 2024 et le Titane, par les méthodes du contrôle non destructif, et précisément les courants de Foucault, en appliquant les essais de tractions. Les résultats obtenus sont très satisfaisantes par rapport aux cas de validation.

SUMMARY

The Purpose of this work is to study the internal constraint unexpected in the material, from occurrence the Aluminium 2024 and the Titane, with the method of non destructif control, and precisely the Foucault current, with experienced the traction test. The results obtained are very satisfactory compared with the validation.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة العوائق الداخلية للمواد، والمتمثلة في الألمنيوم 2024 و التيتان، من قبل طرق المراقبة الانتلافية، و بالضبط بتيار فوكو " les courants de Foucault"، و ذلك بتطبيق تجارب الجذب. النتائج المتحصل عليها جد مرضية مقارنة بالنتائج المرجعية.

REMERCIEMENT

Nous prions et remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et le courage a fin de réaliser ce modeste ouvrage sans que nous oublions nos très chères parents pour leurs aide très précieuse.

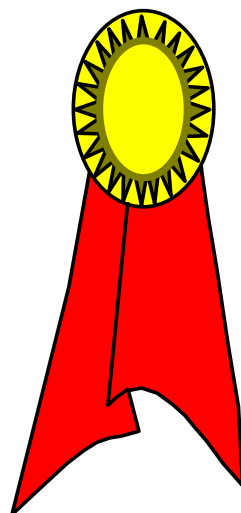
Nous tenons à remercier notre promoteur en premier lieu, le Dr. ZERGOUG MOURADE, qui nous a aidés profondément par son suivi et ses conseils durant notre projet, pour toute sa confiance qu'il nous a témoigné en nous proposant ce sujet. Ses conseils éclairés et sa large expérience scientifique ont permis l'aboutissement de ce travail.

Ainsi que tous nos professeur d'avoir efficacement achevé ce que de bon nos parents ont commencé.

Avec notre profonde gratitude à notre fidèle amie et frère Mr. OTMANI BELKACEM, magistère à l'Institut Aéronautique de Blida, pour tout son soutien et ses conseils pour la réalisation de ce projet.

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

En fin, que tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce long travail ; trouvant ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.





DEDICACE



*A toi, ma chère mère et a toi bon
père, je vous dédie mon travail
avec tous mes efforts, preuve de
mon affection et mon attention
pour vous, chaleureusement.*

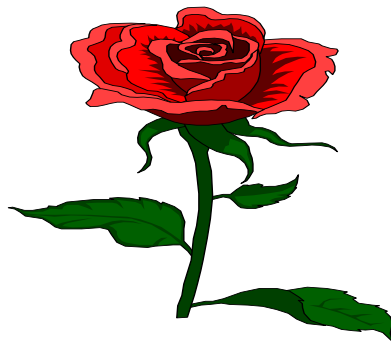


TABLEAU DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
TABLEAU DES MATIERES	
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATION	
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	

1. CHAPITRE I METAUX ET LEURS PROPRIETES

Introduction	01
1-1- l'Aluminium	01
1-1-1-Caractéristiques générales de l'Aluminium	01
1-1-2-Aluminium et ses Alliages	01
1-1-3-Définition de la série 2000	02
1-2- le Titane	03
1-2-1. Caractéristiques générales du titane	03
1-2-2. caractéristique mécanique du titane	04
1-2-3. Le titane et ses alliages	05
1-2-4. Propriétés mécaniques du titane en traction	07
1-2-5. Domaine d'utilisation	08

2- CHAPITRE II CONTROL NON DESTRUCTIF

2-1- Applications et tendances	10
2-1-1. Champ d'application actuel	10
2-1-2. Tendances et évolution	11
2-2- Principes de détection des défauts. Différentes techniques du CND	11
2-2-1. Hétérogénéités et défauts	11
2-2-2. Procédure de CND	12
2-2-3. Principe de la détection d'un défaut	12
2-2-4. Classement et performances des procédés de CND	13
2-3- Procédés optiques	16
2-3-1. Examen visuel	16
2-3-2. Télévision	17

2-3-3. Procédés par balayage	17
2-3-4. Imagerie infrarouge	18
2-3-5. Imagerie radiofréquence	19
2-3-6. Holographie interférentielle	19
2-4- RESSUAGE	19
2-5- Procédés à flux de fuite magnétique	20
2-5-1. Principe et bases physiques	20
2-5-2. Magnétisme	21
2-5-3. Procédés à détection automatique de flux de fuite	24
2-5-4. Avantages et limites	24
2-6- Courants de Foucault	24
2-6-1. Principe et bases physiques	24
2-6-2. Mise en œuvre du sondage par courants de Foucault	27
2-6-3. performance et limitation	29
2-7- Radiographie	29
2-8- Ultrasons	30
2-8-1. Différents types d'ondes	30

3- CHAPITRE III METHODES D'ESSAIS MECANIQUES

3-1- Essais de dureté	32
3-1-1. Principe de l'essai de pénétration	32
3-1-2. Essai brinell	32
3-1-3. Essai Vickers	32
3-1-4. Essai Rockwell	33
3-2- Essais de traction	34
3-2-1. Principe	34
3-2-2. Eprouvettes	34
3-2-3. Diagramme conventionnel	36
3-2-4. Diagramme rationnel	38
3-2-5. Coefficient D'ANISOTROPIE	39
3-2-6. Influence des conditions d'essai (vitesse de déformation et température)	40
3-2-7. Ductilité et ténacité d'un matériau	40

3-3-	Essais de résilience	42
3-3-1.	Principe de l'essai	42
3-3-2.	Machine d'essai	42
3-4-	Essais de fatigue	42
3-5-	Essais de fluage	43
3-5-1.	Introduction	43
3-5-2.	Essai de fluage (NF A03-352, 03-353)	43

4- CHAPITRE IV APPROCHE EXPERIMENTALE

	Introduction	43
4-1-	Matériaux utilisés	44
4-2-	réalisation des éprouvettes	44
4-3-	réalisation des sondes	45
4-4-	réalisation des essais	46
4-4-1.	Description des instruments	47
4-4-2.	Procédure de mesure des sondes	49
4-5-	Réalisation des essais	50
4-5-1.	Aluminium 2024	50
4-5-2.	Titane	52

5- CHAPITRE V INTERPRETATION DES RESULTATS

	Introduction	57
5-1-	Acquisition par courant de Foucault	58
5-2-	Procédure expérimentale	60
5-3-	Les résultats et les interprétations	63

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

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 à 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

LISTE DES GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure I-1	Aluminium non-allié	3
Figure I-2	Aluminium allié	4
Figure I-3	Cycle de production d'un lingot de titane pur obtenu par procédé Kroll et par double fusion VAR (source Toho Titanium Co)	6
Figure I-4	Résistance spécifique de différents matériaux de construction aéronautique en fonction de la température	7
Figure II-1	Principe du contrôle non destructif	13
Figure II-2	Schéma de principe d'un appareil d'inspection par balayage laser	18
Figure II-3	Comparaison entre le CND par thermographie infrarouge stimulée impulsionnelle (image de gauche) et la méthode classique ultrasonore C-scan, (image de droite) : visualisation d'un multidélaminage créé par un impact dans un composite carbone-époxy. Les images sont graduées en profondeur (échelle en μm)	19
Figure II-4	Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant préémulsifié	20
Figure II-5	Contrôle par magnétoscopie	22
Figure II-6	Courbes d'induction d'aciers de construction mécanique	23
Figure II-7	Principe de la détection par courants de Foucault	25
Figure II-8	Représentation des variations d'impédance d'une bobine	26
Figure II-9	Diagrammes théoriques de l'impédance normalisée d'une bobine de diamètre D encerclant une barre métallique ferromagnétique ou non de diamètre d	27
Figure II-10	Détection d'un défaut avec une sonde encerclante différentielle	29
Figure II-11	Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut	30
Figure II-12	Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide	31
Figure III-1	Eprouvette normalisé a section circulaire	36
Figure III-2	Caractéristique de l'essai de traction	38
Figure III-3	Diagramme conventionnelle et rationnelle	40
Figure III-4	Caractéristique des essais de tractions	42
Figure III-5	Mouton de Charpy	43
Figure IV-1	Eprouvette d'Aluminium 2024	45
Figure IV-2	Eprouvette de Titan	46
Figure IV-3	Eprouvette amarrée sur machine de traction, avec les deux sondes attachées	47
Figure IV-4	Organigramme de la chaine de montage	48

Figure IV-5	Machine de traction ZWICK	49
Figure IV-6	Appareil de mesure pour les C.F (AGILEN)	50
Figure IV-7	Diagramme de traction pour l'éprouvette d'Aluminium N° 1	52
Figure IV-8	Diagramme de traction pour l'éprouvette d'Aluminium N° 2	53
Figure IV-9	Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°1	54
Figure IV-10	Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°2	55
Figure IV-11	Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°3	56
Figure IV-12	Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°4	57
Figure V-1	(1) Diagramme d'impédance pour l'aluminium 2024 (sonde 1) (2) Diagramme d'impédance pour l'aluminium 2024 (sonde 2)	59
Figure V-2	Principe du système de mesure (Traction et courants de Foucault)	60
Figure V-3	Courbe moyenne de traction uni-axiale (Aluminium 2024)	61
Figure V-4	Courbe moyenne de traction uni-axiale (Titane)	62
Figure V-5	Graphe d'impédance avec $F1 \approx 160$ KN	64
Figure V-6	Graphe d'impédance avec $F2 = 186445,3$ N	64
Figure V-7	Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°1 avec $F1 = 36347,6$ N	65
Figure V-8	Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°3 avec $F1 = 45451,7$ N	65
Figure V-9	Graphe d'impédance pour Eprouvette N°2	66
Figure V-10	Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°3 avec $F2 \approx 75000$ N	66
Figure V-11	Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°4 avec $F2 \approx 70000$ N	67
Figure V-12	Graphe d'impédance pour Eprouvette N°4 avec $F3 = (F1+F2) = 78826,8$ N	67
Figure V-13	Courbe $Z=f(t)$	68
Figure V-14	Courbe $Z=f(t)$	68
Figure V-15	Courbe $Z=f(t)$	69
Figure V-16	Courbe $Z=f(t)$	70
Figure V-17	Courbe $Z=f(t)$	70
Figure V-18	Courbe $Z=f(t)$	71
Tableau I-1	Caractéristiques mécaniques de l'Al 2024	4
Tableau I-2	Composition et propriétés mécaniques moyennes de quelques alliages de Titane	8
Tableau I-3	Alliages de Titane	9
Tableau I-4	caractéristiques de traction pour différents alliages de Titane	10
Tableau II-1	Les procédés de contrôle non destructif	14
		15

Tableau III-1	dimensions des éprouvettes classiques pour les produits corroyés	35
Tableau III-2	différence entre e et ε au-delà de 20% de déformation	39
Tableau III-3	exemples de valeurs de n	40
Tableau III-4	Caractéristique du Mouton de Charpy	44
Tableau IV-1	Dimension des éprouvettes d'Aluminium 2024	51
Tableau IV-2	Dimension des éprouvettes de Titane	53

INTRODUCTION GENERALE

La détérioration des pièces pendant la fabrication ou l'utilisation est une problématique majeure dans le monde de l'Industrie, en particulier l'Industrie de l'Aéronautique. Ces problèmes ne sont jusqu'à nos jours, pas complètement résolus. Les alliages d'aluminium sont parmi les matériaux les plus utilisés dans l'industrie aérospatiale en raison de leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, mais qui malheureusement vu leurs grandes réactivités avec les contraintes externes appliquées et le milieu extérieur (attaque corrosive), se détériorent rapidement. L'utilisation de ces matériaux est surtout dictée par des raisons économiques, qui contrairement au titane qui présente d'excellentes propriétés mécaniques (le titane est aussi résistant que l'acier et environ deux fois plus léger), et présente une grande résistance aux attaques chimiques telles que la corrosion, mais son coût élevé malgré son abondance sur terre (il est le 9^{ième} élément le plus abondant sur Terre avec une estimation de 0.44% à 0.6% de la croûte terrestre), qui est dû à sa métallurgie extractive difficile et coûteuse, ne permet que de l'utiliser dans les zones les plus sollicitées (emplanture des ailes dans le fuselage, train d'atterrissage...)

Il est donc indispensable de contrôler ces pièces pendant leurs usinages, leur fabrications et en service afin de garantir une sécurité maximale. Pour cela, différentes méthodes existantes: les méthodes destructives (qui sont fiables mais pas rentables et sauf cas d'expérimentation), et les méthodes non destructives (qui au contraire sont très rentables et d'une certaine fiabilité).

Les expérimentations réalisées ont montré de larges possibilités d'analyse par les méthodes de contrôle non destructif (CND), en utilisant les procédés électriques et magnétiques de l'évolution des diverses caractéristiques métallurgiques.

Les propriétés électromagnétiques d'un matériau dépendent de sa composition, de sa microstructure et des contraintes appliquées. Il est donc possible d'utiliser les paramètres électriques et magnétiques du titane et de l'aluminium pour évaluer leurs microstructures.

Ces sollicitations sont étudiées par la méthode des courants de Foucault (C.F), qui est une technique récente et très utilisée. 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. Nous évaluerons les aptitudes et les performances de cette technique dans la détermination des caractéristiques de contrôle des matériaux.

Très peu d'études ont été menées dans ce sens, le présent travail constitue une approche pour mieux connaître le phénomène magnétomécanique, ses origines, ses possibilités ainsi que ses limites.

Notre travail a pour objectif d'étudier les variations interne que subie un matériau pendant qu'il est sollicité par un effort externe par les courants de Foucault. Notre études a été effectué en grande partie au centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle CSC de Cheraga au niveaux de la division du procédé d'électroniques et magnétiques, et de Annaba (URASM) au niveaux du laboratoire des essais mécanique.

Dans le premier chapitre, nous présentons les caractéristiques et les propriétés des matériaux sur les quels on va travailler

Le deuxième chapitre parlera des différentes méthodes du contrôle non destructif en générale, et en particulier des courants de Foucault,

Le troisième chapitre fera l'objet des essais mécanique on se basant sur l'essai de traction.

La présentation des différents résultats expérimentaux sont représentés dans le 4ème chapitre.

Le cinquième chapitre donnera les différents résultats expérimentaux et l'interprétation des expériences effectuées.

INTRODUCTION

L'aluminium est un métal blanc, c'est le plus léger des métaux usuels après le magnésium, c'est pour cela il est plus utilisé dans le domaine aéronautique et d'autre domaine comme la mécanique d'automobile, génie civil.....Etc. Il est classé parmi les métaux non ferreux magnétiques, sa perméabilité est inférieure à 1, il résiste bien à la corrosion, c'est un bon conducteur de la chaleur et d'électricité. Le seul défaut est sa faible résistance mécanique qui vaut de 70Mpa à 100Mpa, mais cet inconvénient est réglé en ajoutant du cuivre, manganèse et magnésium. Son point de fusion est 658°C, ce qui facilite sa métallurgie, il est très malléable et très ductile, mais pas très dur. La résistance à la rupture de l'aluminium ordinaire est de 8Kg/mm², celle de l'aluminium écroui peut atteindre 20Kg/mm².

Bien que le titane soit un élément fort abondant dans l'écorce terrestre, ce n'est que vers 1950 qu'on a commencé à l'utiliser sous forme métallique, à l'état pur ou à l'état allié. Ceci découle des difficultés liées à sa métallurgie extractive et des problèmes posés par sa mise en œuvre, faits qui expliquent par ailleurs son prix élevé par rapport à celui des autres métaux. Les caractéristiques tout à fait particulières du titane et de ses alliages en font un métal de choix pour de nombreuses utilisations, notamment dans les domaines de l'aéronautiques et aérospatial et dans l'industrie chimique.

I.1. L'ALUMINIUM

I.1.1. Caractéristiques générales de l'Aluminium

- La masse volumique de L'aluminium : est de 2700Kg/m³, on utilise l'aluminium dans le cas où il faut réduire la masse de la structure, c'est le cas des avions par exemple, ou pour réaliser des économies d'énergie, on cherche à diminuer la charge à vide, afin d'augmenter la charge utile.
- Résistance à la corrosion : les alliages d'aluminium résistent bien à la corrosion, grâce à la couche d'oxyde (Al₂O₃) qui se forme à leur surface.
- Conductivité électrique
- Propriétés mécaniques : puisque l'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à face centrées, ils font preuve à l'état recuit d'une excellente ductilité, et ce à toute température.

I.1.2. Aluminium et Alliages d'aluminium

Il existe de nombreux alliages d'aluminium que soient corroyé 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.

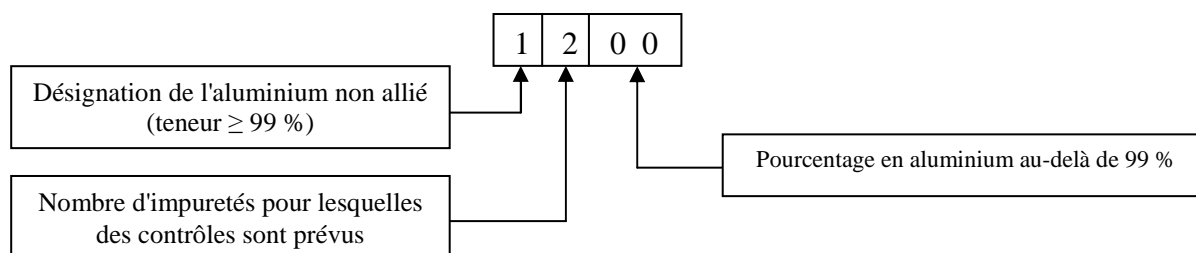


Figure I-1 : Aluminium non-allié

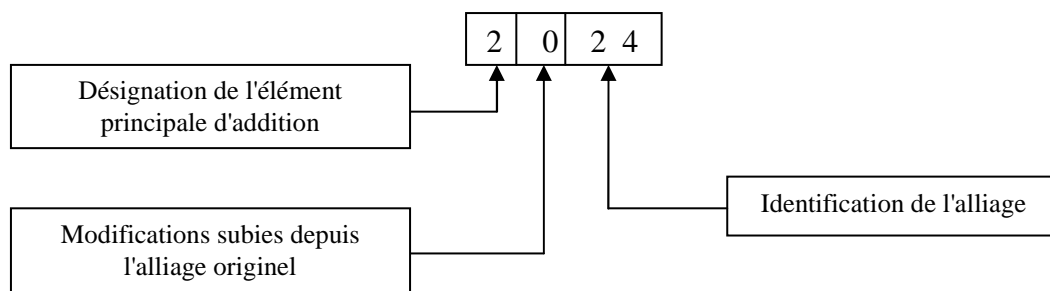


Figure I-2 : Aluminium allié

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.

I.1.3. Définition de la série 2000 (Al Cu et Al-Cu-Mg)

→ Eléments 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 inférieure 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).

A cause de la présence de précipités cathodiques par rapport à la matrice, les alliages de cette série font preuve d’une résistance médiocre à la corrosion à l’état trempé et vieilli.

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

	Etat	$R_{e0.2}$ (Mpa)	R_m (Mpa)	A (%)	Résistance à la fatigue	Principaux domaines d’utilisations	e (mm)
2024 4,4Cu-1,5Mg- 0,6Mn	O	105	190	20	90	Aéronautique, charpentes, visseries.	0,35- 3,2
	T3	320	460	20	140		0,35-6

Tableau I-1 : Caractéristiques mécaniques de l’Al 2024

I.2. LE TITANE

I.2.1. Caractéristiques générales du titane

Eléments de numéro atomique $Z=22$, Son symbole est Ti. Le titane naturel est un mélange des isotopes de masse 46 (7,95 %), 47 (7,75 %), 48 (73,45 %), 49 (5,51 %) et 50 (5,34 %). C'est pourquoi sa masse atomique est 47,90. On en connaît les isotopes artificiels de masse 43, 44, 45 et 51. Le titane est un élément assez répandu dans la nature dans un classement des métaux qui concerne leur abondance dans la croûte terrestre, il arrive en 4^e positions, derrière l'aluminium, le fer et le magnésium. Il fut découvert vert 1790 par l'Anglais Gregor dans une ilménite, et par le chimiste allemand Klaproth vert 1794, dans un rutile. C'est ce dernier qui le nomma titane, en souvenir des Titans enfantés par la Terre, dans la mythologie grecque. Les deux principaux minerais de titane sont précisément le rutile TiO_2 , (Etats-Unis, Canada, Cameroun, Inde, Australie, France) et l'ilménite $FeTiO_3$, beaucoup plut abondante (États-Unis, U.R.S.S., Canada, Norvège, etc.). Ils servent à préparer soit le dioxyde de titane TiO_2 , soit des alliages dits ferrotitanes, soit le titane métallique. Pour préparer le dioxyde de titane à partir de l'ilménite, on l'attaque par l'acide sulfurique concentré et chaud. Pour préparer les ferrotitanes (alliages ferreux contenant généralement 15 à 20 % de titane et 8 à 10 % de carbone), on réduit au four électrique par le carbone des mélanges d'ilménite et de minerais ferreux. L'élaboration du titane métallique n'est passée au stade industriel que très récemment, et seulement dans un très petit nombre de pays (États-Unis, U.R.S.S.). Le procédé employé aux Etats-Unis dérive du procédé Kroll, mit au point vers 1932, et qui fut systématiquement étudié et perfectionné par les Américaine (Bureau of Mines) à partir de 1950. Il consiste à réduire le tétrachlorure $TiCl_4$, (préparé par action du chlore sur le rutile ou sur l'ilménite) par du magnésium fondu, vers 800 °C dans un réacteur en acier doux sous atmosphère d'hélium ou d'argon. On obtient ainsi du titane en poudre (éponge de titane) qui est aggloméré soit par fusion à l'arc électrique sous atmosphère d'argon, soit par frittage vers 1000 °C, dans un vide de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} mm de mercure. Il est alors forgé en atmosphère inerte. Le titane est un métal gris, brillant. Vers 880 °C, le titane subit une transformation allotropique il passe de la variété α de structure hexagonale compacte à la variété β de structure cubique centrée. Il fond vers 1668 °C et bout vers 3260 °C. Sa densité est 4,34. Il est donc assez léger. Très pur, il est assez mou, ductile et malléable. En fait, le titane industriel a des propriétés mécaniques voisines de celles des aciers moyens. Bien que le titane massif résiste pratiquement à tous les agents chimiques (à l'exception de l'acide fluorhydrique) jusqu'à 700 °C, le titane est un élément très réactif. Il se combine à l'hydrogène et aux halogènes à basse température; au carbone et à l'azote à température plus élevée. Au-dessus de 700 °C, il dissout l'oxygène et l'azote, ce qui modifie beaucoup ses propriétés mécaniques (une teneur en oxygène supérieure à 0,1 % le rend impropre au laminage, par ex.). Il s'allie avec presque tous let métaux. Dans ses composés, le titane a le plus souvent la valence + 4; il peut avoir aussi les valences +2 et +3. On connaît un certain nombre de composés non-stœchiométriques.

Les plus importants des composés du titane sont: le dioxyde TiO_2 , que l'on prépare généralement à partir de l'ilménite par action de l'acide sulfurique, puis hydrolyse de la solution de sulfate ainsi formée. On obtient une poudre blanche et onctueuse qui, sous le nom de blanc de titane, est utilisée comme pigment blanc (son pouvoir couvrant est 6 à 7 fois celui de l'oxyde de zinc); on l'utilise aussi à cause de son pouvoir isolant élevé, dans l'élaboration de certaines céramiques électrique. Il existe sous trois variétés allotropiques (rutile, brookite et anatase) dont la première est utilisée en bijouterie, C'est un oxyde amphotère qui se dissout dans certains acides pour donner les sels de titane correspondants. Il se combine aux oxydes basiques pour donner une série titanates (orthotitanates du type Na_4

TiO₄; métatitanates du type Na₂ TiO₃ ; dititanates du type Na₂Ti₂O₅). Le tétrachlorure de titane TiCl₄ est un liquide incolore qui se forme par action du chlore sur le titane. Mais on le prépare industriellement par action du chlore sur le rutile ou l'ilménite en présence de carbone. Le carbure de titane TiC, extrêmement dur, est préparé par chauffage du titane en présence de noir de fumée vers 1800 °C. Mélangé à de la poudre de cobalt et fritté, il sert à faire des pastilles que l'on utilise pour fabriquer des outils de coupe rapide des métaux.

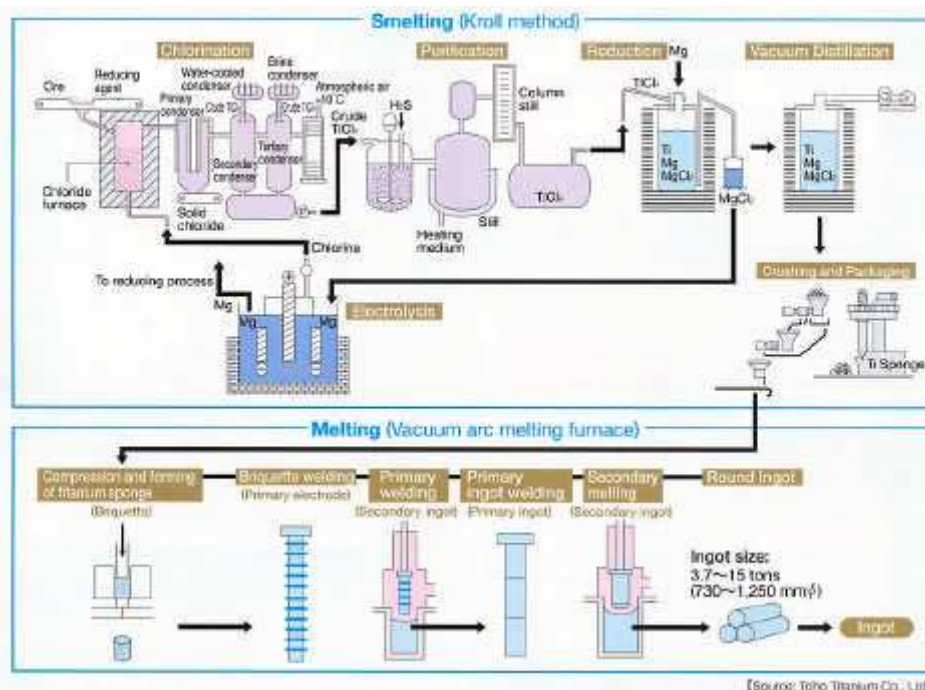


Figure I-3 : Cycle de production d'un lingot de titane pur obtenu par procédé Kroll et par double fusion VAR (source Toho Titanium Co.)

La faible densité du titane (comparée à celle du fer: 7,86) et ses excellentes qualités mécaniques en font un matériau idéal pour l'industrie aéronautique et spatiale, Allié à l'aluminium, l'étain ou le molybdène, il forme des alliages qui entrent dans la composition de nombreuses pièces d'avions, hélicoptères, engins. Ainsi, les structures des capsules Mercury et Gemini étaient réalisées en alliages Ta — 5 Al — 2,5 Sn.

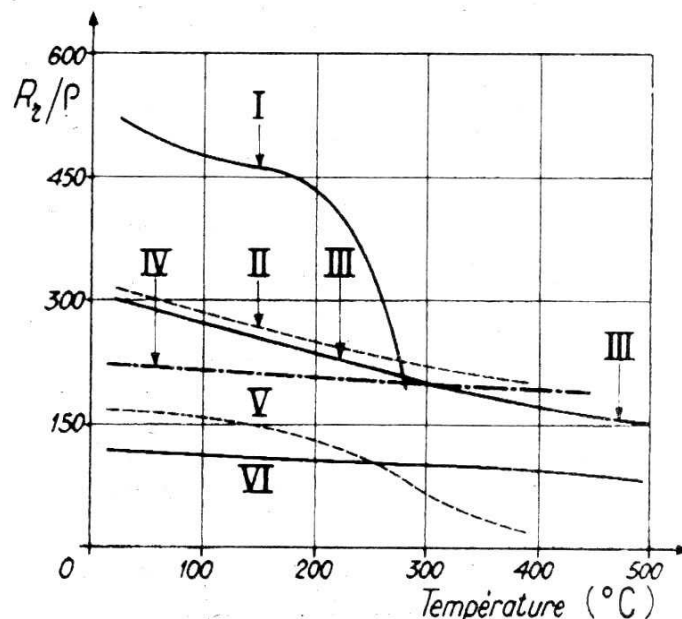
Les ferrotitanes sont utilisés pour désoxyder et dénitrurer les aciers. Certains alliages titane niobium sont utilisés pour leur aptitude à devenir supraconducteurs à des températures qui, bien que basses, sont relativement élevées pour ce phénomène.

I.2.2. caractéristique mécanique du Titane

Numéro atomique	22
Masse -atomique.....	47,90
Masse volumique	4,507 g/cm ³
Température de fusion	1 670 °C
Température d'ébullition.....	3 535 °C
Capacité thermique massique	522,5 J .kg ⁻¹ . °C ⁻¹
Conductivité thermique	16,7 W.m ⁻¹ . °C ⁻¹
Résistivité électrique à 20°C.....	47,8 X 10 ⁻⁸ Ω
Coefficient de dilatation linéique à 25°C	8,5 X 10 ⁻⁶ par °C

Susceptibilité magnétique massique3.2 x 10-6 cm3. g ⁻¹ (paramagnétique)
Module d'élasticité110000 MPa
Coefficient de Poisson0,33
Température de transformation allotropique.....882 °C

En dessous de cette température, la maille est de type hexagonal compact (a=0,295nanomètre; c=0.468 nanomètre) ; elle est de type cubique centré (a=0,332 nanomètre à 900 °C) aux températures supérieures.



R_r/ρ rapport de la charge de rupture, exprimée en N/mm² (ou MPa), à la masse volumique du matériau considéré, exprimée en g/cm³

I	plastique renforcé	IV	acier maraging
II	alliage de titane à haute résistance	V	alliage d'aluminium
III	béryllium	VI	acier à 12% en masse de chrome

Figure I-4 : Résistance spécifique de différents matériaux de construction aéronautique en fonction de la température

I.2.3. Le Titane et ces alliages

1) Titane non allié

À haute température, la structure cristalline du titane est cubique centrée (titane β) à 882 °C, le titane subit une transformation allotropique : sa structure devient alors hexagonale compacte (titane α). La transformation $\beta \rightarrow \alpha$ se fait par transformation martensitique (transformation cristallographique) et non par un mécanisme de germination et de croissance par diffusion, comme c'est le cas pour la transformation allotropique du fer ($\gamma \rightarrow \alpha$). Ce phénomène exerce une très grande influence sur les microstructures du titane et de ses alliages, comme nous le verrons plus loin.

Grâce au rapport c/a de la maille hexagonale du titane (c/a = 1,587), il y a suffisamment de systèmes de glissement (sur les plans de base et sur les plans prismatiques) pour que ce métal soit ductile à toute température et qu'il ne présente aucune transition

ductile-fragile. Bien que la limite d'endurance du titane ne soit pas définie, sa limite de fatigue à 10⁸ cycles est bonne (elle est au moins égale à la moitié de sa résistance en traction).

2) Alliages de Titane

Dans les alliages de titane, les éléments d'addition exercent une influence sur la stabilité des phases α et β . On distingue en général les éléments alphagènes (l'aluminium et les éléments en solution d'insertion O, C et N), qui ont pour effet d'augmenter la température de transformation $\alpha \rightarrow \beta$, des éléments bêtagènes, qui, au contraire, abaissent cette température de transformation. Les éléments bêtagènes peuvent être isomorphes (V, Mo, Nb et Ta) ou eutectoïdes (Fe, Cr, Mn et Si). Certains éléments (Sn et Zr) sont par ailleurs neutres. Les alliages industriels de titane comportent au moins deux éléments d'addition ; on les classe, selon leur structure à la température ambiante, en alliages alpha, en alliages alpha-bêta et en alliages bêta.

- Alliages alpha :

Les alliages alpha contiennent essentiellement des éléments alphagènes et neutres ; ils peuvent en outre contenir de petites additions d'éléments bêtagènes, qui entraînent alors l'apparition d'une faible quantité de phase β (alliages super-alpha). Les alliages alpha résistent bien au fluage (jusque vers 650 °C) et à l'oxydation (jusque vers 1100 °C), ce qui permet de les mettre en forme par forgeage. Cependant, ils sont peu déformables à froid et ne répondent pas (ou répondent peu) aux traitements thermiques.

- Alliages alpha-bêta :

Les alliages alpha-bêta, biphasés, sont les plus utilisés. Ils acquièrent, après traitements thermiques, des propriétés mécaniques élevées, ce qui ne les empêche pas de conserver une assez bonne ductilité. Leur résistance au fluage s'étend jusque vers 550 °C.

- Alliages bêta :

Les alliages bêta contiennent essentiellement des éléments bêtagènes. À la température ambiante, ils se prêtent bien à la déformation mais, du fait de leur structure cubique centrée, ils présentent une transition ductile-fragile vers -60 °C. On peut difficilement les utiliser à chaud, car leur structure β devient instable vers 350°C.

Alliage (type)	Composition Moyenne (%)	état	R _{e0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
α	99,2 Ti	R	450	525	25
α	5 Al-2,5 Sn	R	800	900	20
Super α	8 Al-1 Mo-1 V	TR	950	1000	15
$\alpha+\beta$	6 Al-4 V	R	950	1000	15
		TR	1120	1200	10
$\alpha+\beta$	6 Al-6 V-2 Sn	R	1000	1100	14
		TR	1200	1300	10
β	13 V-11 Cr-3 Al	TR	1200	1250	8

Tableau I-2 : Composition et propriétés mécaniques moyennes de quelques alliages de Titane

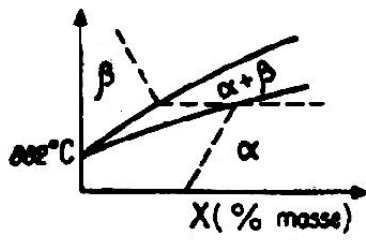
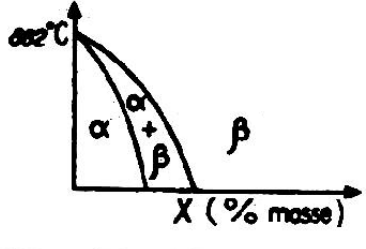
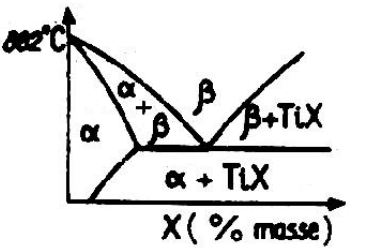
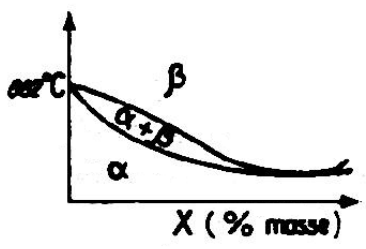
Éléments		Diagrammes d'équilibre	Solutions solides d'insertion	Solutions solides de substitution
Alphagènes			O ₂ , N ₂ , B, C	Al
Bétagènes	isomorphes			Mo, V, Nb, Ta
	eutectoides		H ₂	Mn, Fe, Cr, Co, W, Ni, Cu, Au, Ag, Si
Neutres				Sn, Zr,

Tableau I-3 : Alliages de titane

I.2.4. Propriétés mécanique du Titane en traction

Comme pour tous les métaux, l'augmentation de résistance mécanique (R_m , $R_{p0,2}$) se traduit par une perte de ductilité (A). À ce titre, le tableau suivant présente, pour les trois compositions spécifiées, ainsi que pour l'IMI 685 et 550, quelques valeurs typiques. On constate l'effet durcissant des éléments d'addition (comparaison T40 vs, IMI 685) ; on notera que les alliages $\alpha + \beta$ possèdent un compromis résistance-ductilité peu étendu, à l'inverse des alliages quasi β dont la plage est extrêmement large ; dans ce tableau, on se rend compte que pour un alliage comme le β -CEZ, la résistance peut être multipliée par 2 ; on notera enfin que c'est pour les alliages quasi β ou β qu'on peut obtenir des valeurs basses de module élastique (70 GPa), ce qui en fait des alliages compatibles mécaniquement avec les structures osseuses ($E = 50$ GPa).

Nuance	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	E (GPa)
T40	483	352 (1)	28	110
IMI 685	1 020	914	8	110
TA6V	1 000	910 (1)	18	110
IMI 550	1 138	1 035	12	110
β -CEZ	1 250	1 150	11	115
β -CEZmax	1 700	1 650	7	115
β -CEZ100 % β	927	723	9	70

(1) Valeurs supérieures.

Tableau I-4 : caractéristiques de traction pour différents alliages de Titane

I.2.5. Domaine d'utilisation

Autrefois réputés chers à cause de leur valeur d'achat, le titane et ses alliages sont de plus en plus considérés comme économiques dans les coûts d'exploitation. La clé du succès pour leur rentabilité est d'utiliser au maximum leurs propriétés et caractéristiques uniques dès la conception, plutôt que de les substituer à un autre métal, tiré de l'exploitation pétrolière offshore, montre que les coûts d'installation et d'exploitation des tubes de forage en titane sont 16 % voire 200 % plus bas qu'avec la référence acier :

— la résistance à la corrosion évite les opérations de revêtement des tubes et permet des durées de vie trois à cinq fois supérieures à celle de la référence acier ;

— les valeurs élevées des résistances spécifiques permettent de réaliser des tubes fins et extralégers ; ceux-ci peuvent être facilement manutentionnés par un homme seul, là où il fallait auparavant deux ou trois personnes aidées d'engins de levage ; le gain en main-d'œuvre et en facilité d'exploitation est ainsi avéré.

Cet exemple montre bien que le titane, initialement employé dans le domaine aéronautique (démarrage des turboréacteurs dans les années 1950), touche de plus en plus de secteurs. Il faut cependant noter qu'au cours des diverses crises récurrentes qui ont secoué l'aéronautique, et dont la dernière a duré trois ans au début des années 1990, l'industrie du titane s'est consolidée et propose maintenant des prix extrêmement attractifs (-15 à 25 % par rapport à 1990). Ceci favorise sa percée.

1) Domaine aérospatial

Ce domaine industriel consomme 50% du tonnage en Europe. Les principales applications sont les suivantes :

- Réacteurs (50% de la consommation de titane aéronautique)
 - compresseurs: disques, ailettes, aubes, entretoises, brides:
 - carters, isolation thermique, capotages, petites pièces mécaniques.
- Cellules: ferrures, entretoises, pièces de suspension, raidisseurs, éléments de transmission de trains d'atterrissage, boulonnerie, rivets.
 - Hélicoptères:
 - titane non allié : tôles pour carter de réacteur, cloisons pare-feu, planchers, pièces mécaniques;
 - moyeux de rotor.
 - Espace:
 - aux États-Unis :84% de la masse de la capsule Gemini est en titane, soit 625 kg; 7 t de demi-produits en titane pour l'ensemble Saturne-Apollo;

— en Europe: tôles pour réservoirs cryogéniques (H₂, He) ou de propergols, éléments de tuyères.

— il est utilisé pour les éléments du moteur Vulcain d'Ariane 5 pour le mélange H₂-O₂ et sa combustion.

2) Génie chimique

Le secteur de la chimie, au sens large, correspond à la seconde utilisation historique du titane et de ses alliages. On trouve des tubes en titane dans nombre de condenseurs, où sa résistance à la corrosion et à l'abrasion permettent des durées de vie élevées. Il est souvent utilisé, notamment aux États-Unis, dans les circuits secondaires des réacteurs nucléaires, et il permet de minimiser le nombre d'arrêts de tranche (extrêmement coûteux) et d'éradiquer les risques de fuite. Il sert aussi sous forme de réacteurs dans les raffineries (résistance à H₂S et CO₂) et pour le blanchiment de la pâte à papier (résistance au Cl). Il est enfin utilisé dans les usines de traitement des eaux, notamment au Japon, pour ses propriétés de résistance à la corrosion et pour sa résistance aux agents biologiques et à la flore microbienne.

3) Armement

Outre son utilisation massive dans les chasseurs (moteur et structure) de toutes les armées de l'air, on l'emploie comme blindage (l'exemple du porte-avions Charles-de-Gaulle) où ses propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion et au feu sont mises en avant. Aux États-Unis, on a même été jusqu'à concevoir des véhicules légers, dont la carrosserie en alliage de titane (résistance spécifique du TA6V) permet le transport par hélicoptère.

4) Biomédical

On dispose maintenant d'un retour d'expérience d'une vingtaine d'années d'utilisation du titane et de ses alliages dans le domaine biomédical. Son emploi s'est développé rapidement en raison de son caractère biocompatible bien sûr, mais aussi mécanocompatible. On trouve aussi toute une succession d'implants tels que des prothèses de hanche, des agrafes osseuses, des vis, des plaques...

5) Génie alimentaire et pharmaceutique

On l'a déjà vu dans le domaine du génie chimique pour le traitement des eaux usées, le titane est aussi utilisé dans les usines de dessalement (14 000 km de tubes en service) pour sa résistance à la corrosion et à l'abrasion par l'eau de mer (cf. tableau 7) ; dans ce secteur, l'augmentation spectaculaire de la durée de vie des ensembles de dessalement vient contrebalancer le coût élevé du matériau de base.

Il sert aussi dans l'alimentation et la pharmacie comme réacteur ou injecteur. Dans ce cas, on tire partie de sa résistance à la corrosion, à l'abrasion et de sa non-toxicité.

6) Génie énergétique

Nous avons déjà vu que le titane et ses alliages peuvent servir dans l'exploitation pétrolière grâce à leur résistance à la corrosion (notamment dans les milieux saumâtres en profondeur), à l'érosion et au feu d'hydrocarbures. Il faut aussi noter leur utilisation dans la géothermie sous forme de canalisations et de carters et dans les échangeurs de chaleur (tubes droits ou en U), toujours pour les mêmes propriétés. Enfin, grâce à leurs résistances spécifiques élevées, on en trouve dans les turbines génératrices de vapeur sous forme d'aubes (parfois bimétal : TA6V revêtu d'une couche d'alliage quasi b très dure) ; dans ce cas, on réduit fortement les arrêts de centrale dus aux ruptures d'aubes.

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 défauts 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.

Situé ainsi aux frontières de la métrologie, de l'instrumentation industrielle, scientifique et médicale, le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants ou distributeurs spécialisés, des organismes d'étude et de formation, des sociétés de services, ainsi que les départements spécialisés d'un certain nombre de grosses entreprises industrielles fortement utilisatrices de ces techniques.

II.1. APPLICATIONS ET TENDANCES

II.1.1. Champ d'application actuel

À travers son objectif, on aura compris que le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits, les structures de toutes natures. À l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même.

- **Le contrôle en cours de fabrication**

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

utilise dans l'industrie des bancs de contrôle correspondant bien souvent à des équipements importants en taille et en coût d'investissement.

- **Le contrôle en recette**

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

- **Le contrôle en service**

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

II.1.2. Tendances et évolution

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue en rapprochant ce domaine de celui de l'instrumentation ; il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le caractériser et le dimensionner ; il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou des irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans un métal, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre, car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et ainsi, dans ce domaine, les progrès sont lents.

Il n'en va pas de même pour l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes, comme c'est le cas actuellement pour la tomographie X.

II.2. PRINCIPES DE DETECTION DES DEFAUTS. DIFFERENTES TECHNIQUES DU CND

II.2.1. Hétérogénéités et défauts

Le terme « *défaut* » est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

- **Les défauts de surface**

Accessibles à l'observation directe mais par toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect. La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons. La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

- **Les défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie.

II.2.2. Procédure de CND

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

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

II.2.3. Principe de la détection d'un défaut

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

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

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

Les méthodes de flux, avec une excitation et une détection de même nature et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique) : figure I-1 ; la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes ;

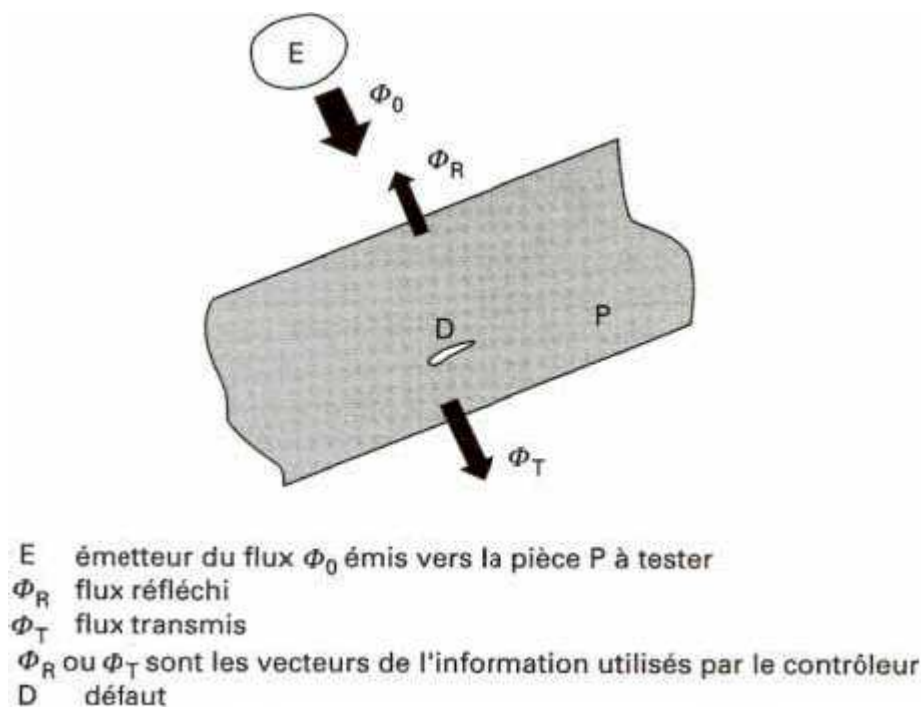


Figure II-1 : Principe du contrôle non destructif

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

II.2.4. Classement et performances des procédés de CND

Les procédés de contrôle non destructif résultent de la mise en œuvre des principes et techniques physiques précédents. Ils sont assez nombreux. Certains sont anciens, d'autres récents ; certains sont simples, d'autres complexes ; certains sont très employés, d'autres peu. On les classe habituellement en deux familles selon qu'ils favorisent la détection des défauts de surface ou des défauts internes. Le tableau 1 dresse la liste des procédés actuellement utilisés en contrôle industriel et résume leurs principes et leurs champs d'application spécifiques.

Les performances des procédés de contrôle non destructif résultent à la fois de considérations théoriques et pratiques.

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts DéTECTÉS	Domaines d'application	Points forts	Points faibles
Optiques	Examen visuel direct ou assisté	Vision Perturbation d'une réflexion	Défauts débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
	Contrôle laser			Contrôles automatiques de bandes et tôles	Productivité	Taux de fausses alarmes
	Contrôle TV	Formation d'une image	Défauts d'aspect, taches	Contrôle automatique en fabrication des produits divers	Productivité	Défauts fins
	Interférométrie holographique	Détection de microdéformations provoquées	Délamination, décollements	Contrôle en atelier de parois non métalliques	Contrôle des composites	Interprétation, productivité
	Thermographie infrarouge	Cartographie de perturbations thermiques	Délamination, hétérogénéités diverses	idem Contrôle sur site	Cartographie	Caractérisation des défauts
Ressuage	Ressuage	Effet de capillarité	Défauts fins débouchants	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité Faible coût	Productivité, peu quantitatif
Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins débouchants et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatif
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchants		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Électromagnétiques	Courants de Foucault	Perturbations d'un courant	Défauts fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tous produits métalliques	Sensibilité Automatisation	Matériaux non conducteurs Interprétation
	Potentiel électrique	Perturbations d'un courant	Mesure de profondeur de défauts	Tous produits conducteurs	Simplicité Faible coût	Contrôle manuel Lent
	Hyperfréquences	Transmission ou réflexion radar	Hétérogénéités diverses	Matériaux peu conducteurs	Contrôle sans contact	Interprétation du signal

Rayonnements ionisants	Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tous matériaux	Cartographie Souplesse de réglage	Protection Détection des fissures
	Radiographie γ			Contrôle en ligne	Fortes épaisseurs	Profondeur des défauts
	Radioscopie en temps réel				Productivité	Résolution limitée
	Tomographie X			Contrôle de structures non métalliques	Imagerie en coupe	Coût Productivité
	Neutronographie			Corps hydrogénés	Complète la radiographie	Équipement Condition d'emploi
	Diffusion Compton	Rétrodiffusion	Délamination s	Contrôle des composites		
Vibrations mécaniques	Ultrasons	Perturbation d'une onde Échographie	Défauts internes Défauts débouchants	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Grande sensibilité Nombreuses méthodes d'auscultation	Conditions d'essai Interprétation des échos Couplage
	Émission acoustique	Émission provoquée par sollicitation mécanique	Criques Fissures	Parois de gros récipients Structures diverses	Contrôle global avec localisation des défauts	Interprétation Bruits parasites
	Essais dynamiques	Perturbations d'un amortissement Mesure de vitesse	Criques Fissures	Contrôle de pièces moulées	Productivité	Qualitatif
Tests d'étanchéité	Essais hydrostatiques	Détection de bulles	Défauts débouchants dans joints ou parois, zone perméable	Tubes et enceintes en tous matériaux	Grande étendue de flux de fuite selon la méthode	Contingences diverses selon la méthode
	Tests avec gaz traceurs (halogènes, hélium)	Détection chimique				
	Détection sonore	Bruit acoustique				

Tableau II-1 : Les procédés de contrôle non destructif

II.2.4.1. Limite de détection

La limite de détection est liée à deux facteurs de nature différente:

a) Le rapport signal/bruit, le pouvoir séparateur

Le rapport signal/bruit en sortie d'appareil doit être suffisamment supérieur à 1 pour qu'une conclusion claire soit prise quant à l'absence ou la présence d'un défaut. Ce facteur dépend d'abord de la façon dont le défaut lui-même « émerge » de son environnement que l'on doit chercher à améliorer (nettoyage et meulage des surfaces très rugueuses, affinage des microstructures trop grossières des métaux) à chaque fois que cela est possible (impératifs techniques et de coût). Ensuite, les conditions d'examen (choix

d'un éclairage approprié, d'un angle de tir, d'une fréquence d'excitation, etc.), la qualité de l'appareillage (bruit électronique) et la nature du traitement de l'information (imagerie, renforcement des contrastes) devront concourir à accroître le rapport signal/bruit.

Le pouvoir séparateur correspond à la limite physique de détection ; son fondement théorique est bien établi dans le cas des techniques utilisant une onde vibratoire telles que l'optique ou le contrôle ultrasonore. Les lois de la diffraction impliquent en effet que cette limite soit proportionnelle au rapport λ/D , λ étant la longueur de l'onde dans le milieu considéré et D l'ouverture de l'appareil, en fait généralement le diamètre de la sonde. Le paramètre $1/\lambda$ étant proportionnel à la fréquence de la vibration, on comprend ainsi pourquoi, en contrôle ultrasonore par exemple, l'utilisation de fréquences élevées est favorable à la détection des défauts les plus fins (microscopie ultrasonore). On comprend d'autre part l'intérêt théorique d'accroître fortement le paramètre D (technique d'ouverture synthétique en hyperfréquence et ultrasons, holographie).

b) Étalonnage. Aptitude au dimensionnement des défauts

L'aptitude au dimensionnement des défauts peut s'établir en partie sur la base de considérations théoriques, mais c'est pratiquement toujours la procédure d'étalonnage qui permettra en fait de quantifier cet aspect très important du contrôle. La théorie permet de comprendre les limites des méthodes empiriques de calibrage des défauts basées sur la seule prise en compte de l'amplitude du signal (calibrage AVG en contrôle ultrasonore. L'étalonnage permet de définir et de maintenir une relation quantitative entre signal et défaut, le problème étant bien entendu de connaître par ailleurs de façon précise les caractéristiques de ce défaut. L'utilisation pour l'étalonnage de défauts naturels oblige à détruire la pièce d'essai tandis que l'utilisation de défauts artificiels éloigne des conditions réelles de contrôle. Un compromis consiste à utiliser des défauts naturels provoqués (fissures de fatigue).

II.2.4.1. Théorie et pratique

Les bases physiques sont rappelées à propos de chacun des grands procédés décrits plus loin. Il convient d'emblée d'en mesurer les limites, si l'on veut comprendre pourquoi le contrôle non destructif fait appel à de nombreuses règles et données empiriques qu'il est indispensable de prendre en compte pour définir ou exécuter un examen satisfaisant.

Ainsi, par exemple, l'aspect spectral est à considérer : les bases théoriques prennent le cas simple du rayonnement monochromatique alors qu'en pratique le rayonnement possède un spectre plus ou moins complexe (rayonnements ionisants) et de largeur de bande importante (ultrasons). L'aspect homogénéité et isotropie du matériau engendre les mêmes difficultés de passage de la théorie à la pratique, d'autant que l'on a de plus en plus souvent affaire à des matériaux de structure complexe (composites, bétons). Toutefois, on assiste présentement à une forte activité de modélisation des phénomènes physiques mis en œuvre dans les examens non destructifs, ce qui constitue un apport favorable à une meilleure maîtrise de ces techniques somme toute complexes.

II.3. PROCÉDES OPTIQUES

II.3.1. Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures que nous allons examiner et qui justifient l'écllosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont les principaux sont décrits plus loin.

Des appareils optiques spécifiques ont été développés pour le contrôle non destructif.

- a) **L'endoscope** : est un appareil conçu pour pouvoir observer les surfaces non directement accessibles à l'œil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité, d'un alésage ou d'un trou borgne. Mis au point à l'origine pour les examens liés au diagnostic médical, les endoscopes classiques à lentilles ont été remplacés par des transmetteurs d'image à fibres optiques.

L'endoscope se présente sous forme d'un tube ou d'un flexible comportant à une extrémité une optique de prise de vues et souvent d'éclairage et, à l'autre extrémité, un oculaire d'observation ; les appareillages utilisés en contrôle non destructif ont un diamètre de l'ordre du centimètre et une longueur souvent inférieure au mètre, les grands endoscopes pour l'examen des tubes ayant été éliminés par la miniaturisation des caméras TV.

- b) **Le stroboscope** : est un appareil d'éclairage délivrant des brefs flashes lumineux à une cadence soutenue et réglable dans une gamme de plusieurs dizaines de coups par seconde. Il permet, en contrôle non destructif, l'examen visuel de pièces ou de produits en mouvement ; c'est ainsi qu'il a longtemps été utilisé pour l'examen de tôles en défilement dans les aciéries. Son utilisation systématique provoque toutefois une rapide fatigue visuelle pour les observateurs, aussi cherche-t-on à remplacer ce type de contrôle par des contrôles automatiques mettant en œuvre les techniques mentionnées plus loin.

II.3.2. Télévision

La télévision apporte une aide précieuse au contrôle visuel ; permettant une observation à distance, elle complète ou remplace les endoscopes ; couplée à des moyens de traitement et d'enregistrement des images vidéo, elle permet le contrôle optique automatique.

Le matériel de télévision utilisé en contrôle non destructif est généralement spécifique, car les performances recherchées ne sont pas les mêmes que celles requises dans les applications plus banales de la télévision ; ainsi on se contentera d'une transmission par câble d'une image vidéo en noir et blanc, sans le son. Par contre, on recherchera une caméra robuste, miniaturisée, télécommandable à distance et surtout possédant des qualités optiques et une bande passante vidéo bien supérieure à celle du matériel courant. C'est en effet la faible performance en qualité d'images des tubes de prise de vues qui a longtemps freiné les applications de la télévision en contrôle qualité. L'apparition progressive de tubes de prise de vues plus petits, plus sensibles, moins rémanents, mieux résolus en nombre de points image que les premiers vidicons, et surtout l'apparition plus récente de récepteurs solides (CCD *charge coupled devices* ou constitués d'une mosaïque de micro photodiodes 512×512 ou plus) ont permis d'élargir le champ d'application des matériels de télévision.

II.3.3. Procédés par balayage

Les procédés par balayage ont surtout été développés pour le contrôle en ligne des produits en défilement du type bandes de tôle, de papier, de tissu, etc. La détection de petits défauts sur ces immenses surfaces est un problème très difficile qui impose, en particulier, un système optique à la fois très fin et très rapide. Deux techniques différentes ont été développées : les appareillages à balayage par laser et les appareillages à barrettes de photodiodes.

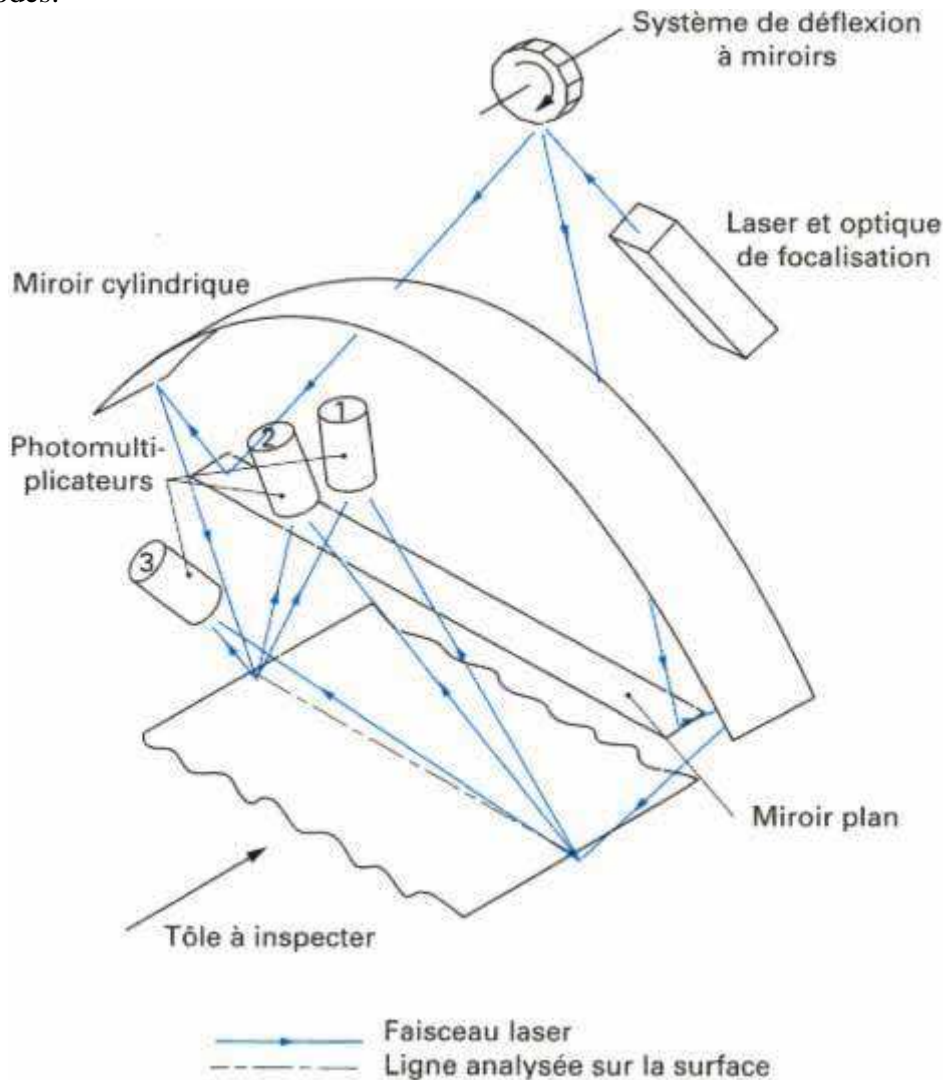


Figure II-2 : Schéma de principe d'un appareil d'inspection par balayage laser

II.3.4. Imagerie infrarouge

L'imagerie infrarouge appartient à la première famille de procédés; elle peut être considérée comme de la pyrométrie bidimensionnelle, d'où son nom générique courant de thermographie infrarouge, méthode de mesure qui présente un grand intérêt en contrôle non destructif dans la mesure où une répartition homogène de température à la surface d'une pièce peut être perturbée par la présence de défauts sous-cutanés.

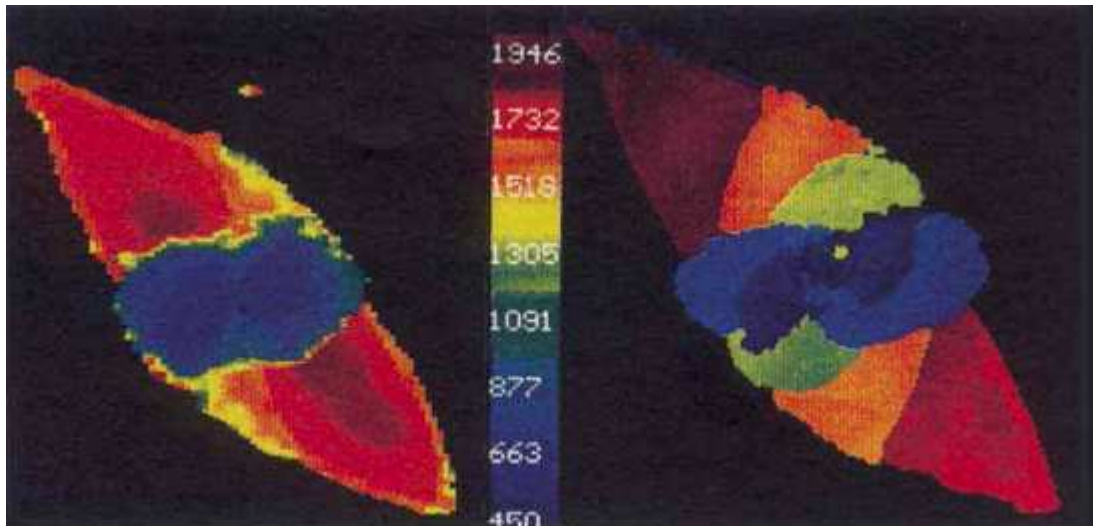


Figure II-3 : Comparaison entre le CND par thermographie infrarouge stimulée impulsionnelle (image de gauche) et la méthode classique ultrasonore C-scan, (image de droite) : visualisation d'un multidélaminage créé par un impact dans un composite carbone-époxy. Les images sont graduées en profondeur (échelle en μm)

II.3.5. Imagerie radiofréquence

L'imagerie radiofréquence consiste à exploiter les propriétés des ondes électromagnétiques dans les longueurs d'onde décimétriques, centimétriques ou millimétriques, à l'instar des systèmes de radar au sens large du terme. Ainsi, si l'auscultation radar d'un objet métallique conducteur ne présente pas d'intérêt pour le contrôle non destructif, il n'en va pas de même pour celle d'objets isolants, légèrement conducteurs ou composites dont on pourra par ces interactions optiques à forte longueur d'onde mettre en évidence des hétérogénéités dissimulées à l'œil de l'observateur.

L'application la plus connue de la technique radar au contrôle non destructif des matériaux est celle de l'auscultation des parois de tunnels, routiers ou ferroviaires.

II.3.6. Holographie interférentielle

L'holographie interférentielle appartient à la seconde famille. Il s'agit de détecter un défaut superficiel ou sous-cutané en mettant en évidence de très légères irrégularités dans la déformation de la surface de la pièce lorsque celle-ci est sollicitée de façon non destructive par une contrainte mécanique, pneumatique ou thermique.

Rappelons que l'holographie est un procédé optique qui consiste à enregistrer sur un support photographique le champ d'interférences entre, d'une part, la lumière diffusée par l'objet éclairé par la lumière cohérente d'un laser et, d'autre part, une onde de référence provenant directement du même laser. L'hologramme ainsi obtenu, placé à nouveau dans l'onde de référence, diffracte la lumière selon une onde lumineuse identique à celle diffusée préalablement par l'objet lors de la prise de vue ; ainsi, tout se passe pour l'observateur comme si l'objet était toujours réellement présent de façon tridimensionnelle. Partant de cette technique, on conçoit qu'une double prise de vues holographiques va permettre de créer des franges d'interférences entre les images holographiques de l'objet relevées à des instants différents et des conditions de sollicitations différentes.

II.4. RESSUAGE

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. L'imprégnation d'une fissure par un liquide, tirant profit de ses propriétés tensio-superficielles, conduit, par l'intermédiaire d'un ressuage avant l'observation visuelle, à un moyen de recherche de défauts de surface qui est parmi les plus anciens, les plus simples et les plus largement utilisés de nos jours.

Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux trois phases illustrées sur la figure I-4: application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. À la suite de quoi, l'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance.

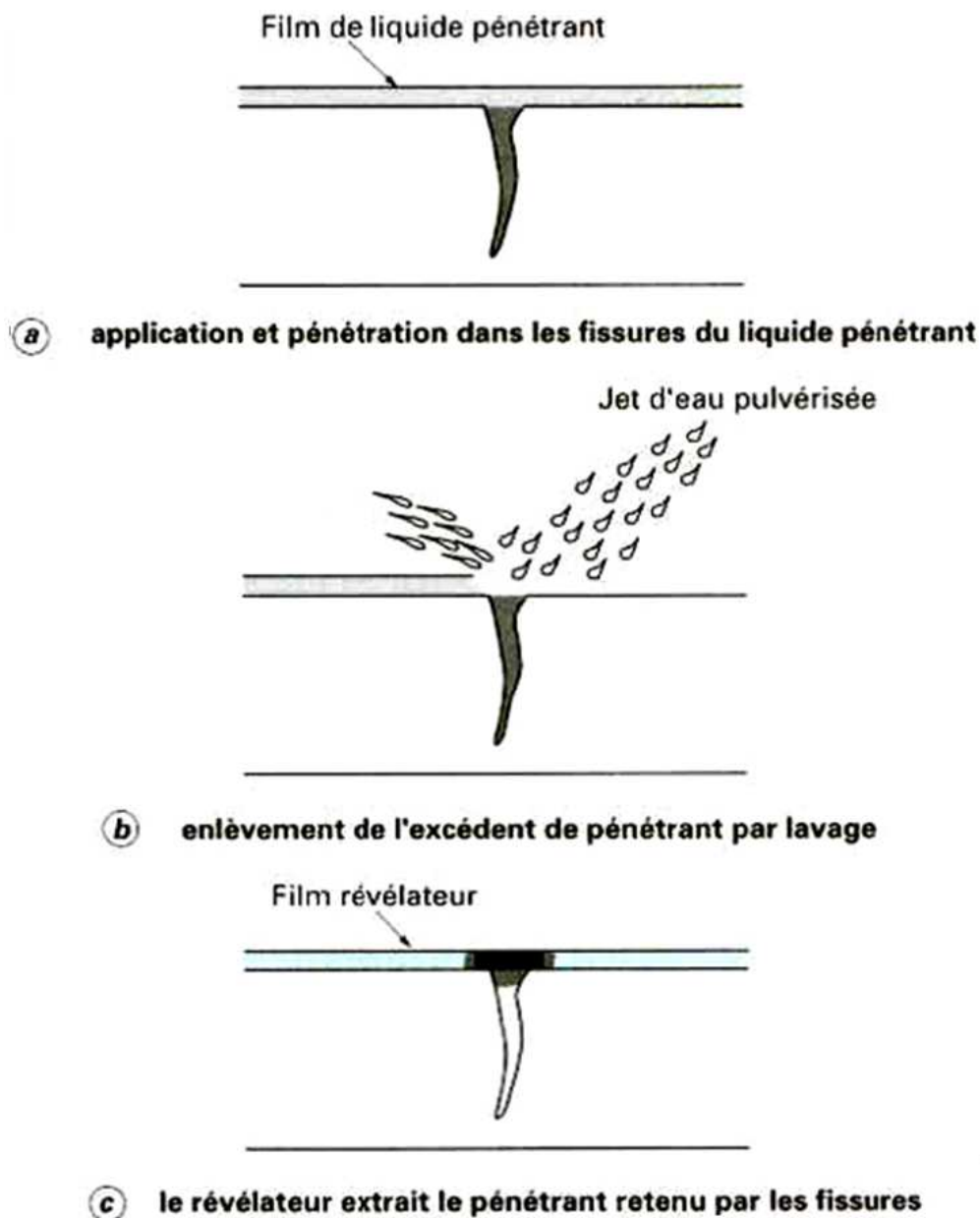


Figure II-4 : Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant préémulsifié

II.5. PROCÉDES A FLUX DE FUITE MAGNETIQUE

II.5.1. Principe et bases physiques

La théorie des circuits magnétiques indique que la présence d'un entrefer correspond à un fort accroissement local de la réluctance du circuit et donc de la différence de potentiel magnétique (d.p.m.), constituant ainsi un obstacle au flux magnétique dont les lignes de force doivent alors s'épanouir latéralement selon un flux de fuite comme l'indique la figure 10. Cet effet de dispersion des lignes de flux s'exerce même pour un entrefer minime, dans la mesure où le rapport des réluctances entre l'entrefer et le circuit est inversement proportionnel à la perméabilité relative de celui-ci, soit un rapport de 500 à 1 000 pour un circuit ferromagnétique en acier excité en deçà de la saturation.

Cet effet de dispersion d'un flux magnétique hors d'une pièce ferromagnétique, au droit d'une fissure débouchante ou sous-cutanée (ou toute autre hétérogénéité non ferromagnétique se comportant comme un entrefer), est à la base d'une gamme de procédés magnétiques de détection des défauts de surface dans les aciers dont le plus connu et le plus employé est la magnétoscopie. Ces procédés magnétiques diffèrent entre eux principalement par le mode de mise en évidence du flux de fuite magnétique correspondant à la dispersion de flux décrite ci-dessus. En magnétoscopie, on observe visuellement une accumulation de poudre de fer ou de magnétite colorée provoquée par le flux de fuite. En Magnétographie, on recueille la trace magnétique du flux de fuite sur un film, une bande ou une pâte d'empreinte magnétisable ; les autres procédés sont regroupés sous le vocable détecteur à flux de fuite (magnetic leakage flux testing) ; il s'agit généralement d'appareils de contrôle automatique de barres et de tubes d'acier mettant en œuvre des détecteurs ponctuels de flux électromagnétiques.

II.5.2. MAGNETISME

Magnétisation et démagnétisation des pièces La magnétoscopie existe depuis longtemps, mais ce n'est qu'assez récemment que l'on s'est réellement préoccupé de définir et de maîtriser les conditions magnétiques les mieux adaptées à un contrôle sensible et fiable. La sensibilité de détection des défauts 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.

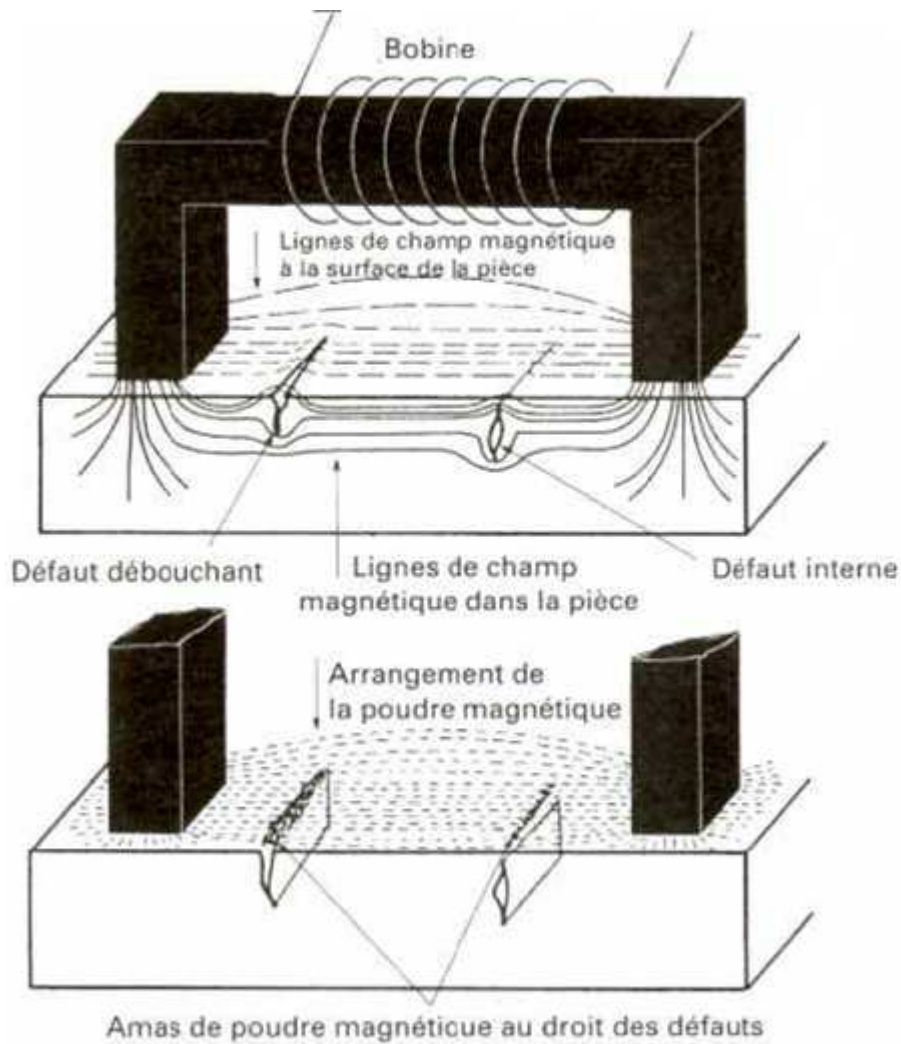


Figure II-5 : Contrôle par magnétoscopie

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 œrsteds) en fonction de la nature de la pièce et de la finesse des défauts recherchés [10]. À titre d'exemple de choix, on peut indiquer qu'un champ d'au moins 1 000 à 1 500 A/m sera suffisant pour un contrôle de défauts notables sur des barres en acier au carbone, alors qu'un champ d'au moins 10 000 A/m sera requis pour le contrôle de pièces de sécurité forgées pour l'aéronautique. La figure I-6 illustre les cycles d'hystérésis et les courbes de perméabilité relative de quelques aciers.

II.5.2.1 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

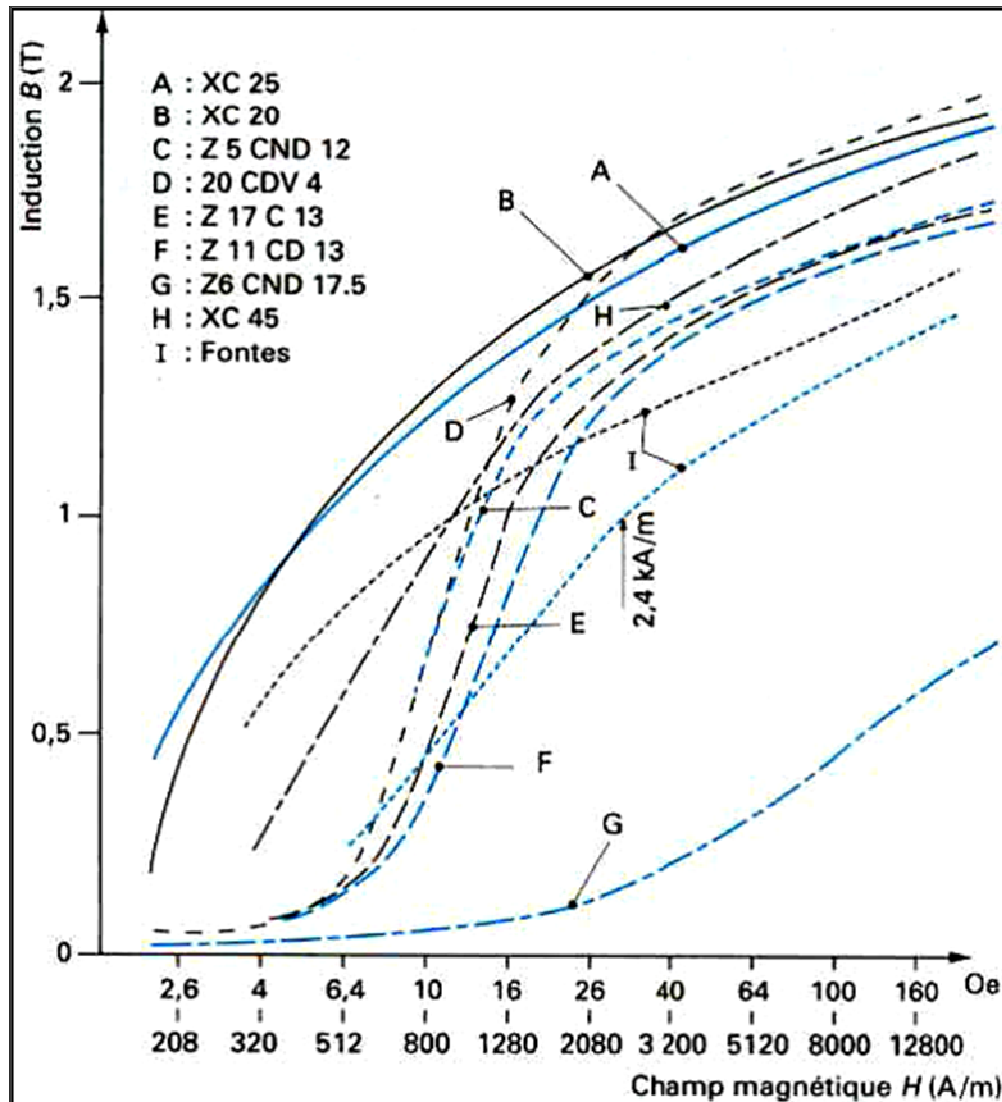


Figure II-6 : Courbes d'induction d'aciers de construction mécanique

II.5.2.2. Démagnétisation

Avant et surtout après un examen magnétoscopique, il peut être indispensable de démagnétiser soigneusement la pièce, c'est-à-dire de faire disparaître au mieux le magnétisme rémanent qui peut affecter tout ou partie d'un matériau ferromagnétique ayant été sollicité par des champs magnétiques ou même soumis à des facteurs magnétiquement actifs comme l'érouissage des aciers.

Sans démagnétisation préalable, un contrôle par magnétoscopie peut être perturbé lorsqu'il s'agit de pièces ayant été soudées à l'arc, manipulées par électroaimants ou posées sur un plateau magnétique lors de leur usinage. À l'inverse, la magnétisation pour l'examen magnétoscopique engendre la présence après coup d'une aimantation résiduelle plus ou moins importante selon le type de magnétisation, la nuance de l'acier, son état structural (revenu, trempé), la forme de la pièce qui, si elle est tourmentée, peut comporter des « pièges à magnétisme ». Ce magnétisme rémanent peut constituer une gêne pour l'utilisation ultérieure des pièces, qu'il s'agisse de mise en œuvre comme le soudage par bombardement électronique qui ne tolère pas plus de 1 à 8 fois la valeur du champ magnétique terrestre (soit moins de $4 \cdot 10^{-4}$ T), comme l'usinage pour lequel le collage des copeaux sur la pièce apparaît à partir de 8 à $10 \cdot 10^{-4}$ T, ou encore l'utilisation finale comme en aéronautique.

II.5.3. 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.

II.5.4. Avantages et limites

Bien conduit, l'examen magnétoscopique se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface les plus ténus sur les pièces en acier et autres alliages ferromagnétiques. Le procédé, grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, s'adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées.

La recherche par magnétoscopie des défauts sous-cutanés est possible mais nettement plus délicate, ce qui fait qu'on aura tendance à préférer ici le contrôle par ultrasons, bien qu'il soit possible de mettre en évidence par magnétoscopie des hétérogénéités non visibles par tout autre procédé ; c'est le cas par exemple de la recherche d'amas d'inclusionnaires dans des tôles minces, ce contrôle ne pouvant malheureusement être effectué que sur des échantillons de faibles dimensions.

Une des faiblesses de la magnétoscopie est en effet sa relativement faible productivité liée à la durée des manutentions et de l'examen visuel des surfaces ; nous avons vu qu'une automatisation partielle ou totale était réalisable mais, en définitive, ce sont les procédés à mesure de flux de fuite qui ont permis d'envisager un contrôle à grand débit des produits sidérurgiques longs de types barres, tubes ou fils. Ces procédés sont très performants, puisqu'ils permettent de détecter des criques et lignes de profondeur supérieure à 0,3 mm sur des barres brutes et de l'ordre de 0,1 mm ou parfois moins sur des produits tréfilés ou calibrés. C'est ainsi que ces appareils à flux de fuite figurent au catalogue des principaux constructeurs d'appareillages à courant de Foucault avec lesquels ils se partagent le marché du contrôle des produits longs.

II.6. COURANTS DE FOUCAULT

II.6.1. Principe et bases physiques

II.6.1.1. 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).

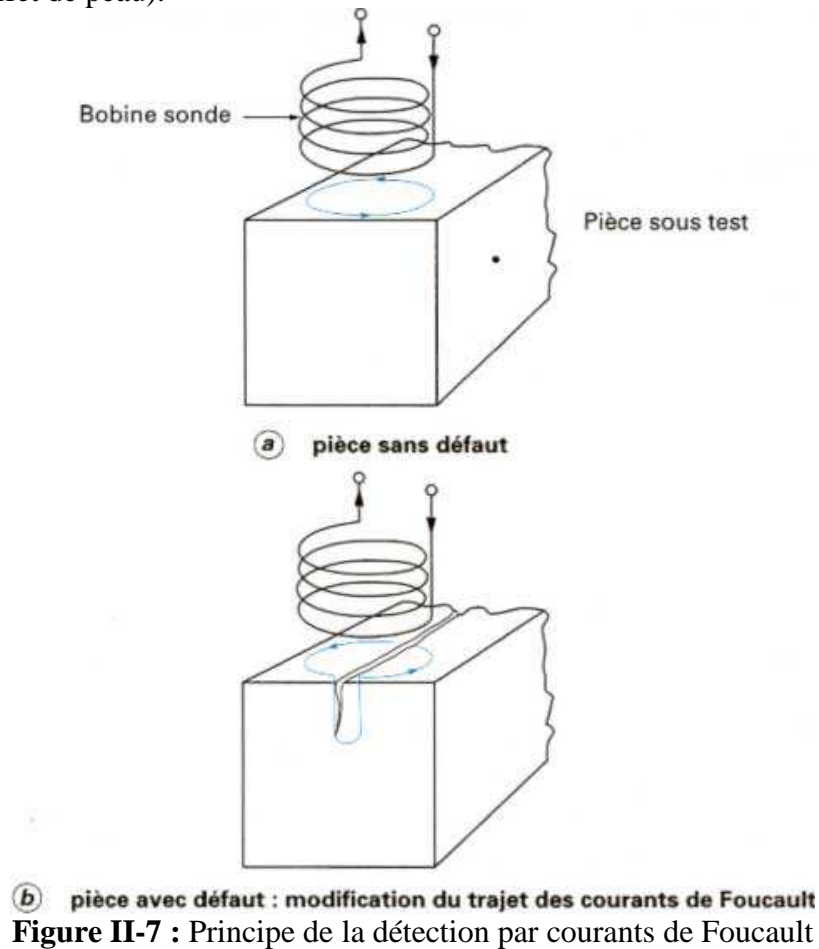


Figure II-7 : Principe de la détection par courants de Foucault

II.6.1.2. Répartition des courants de Foucault

1) 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 :

$$\vec{B} = \mu(H) \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{loi d'Ohm})$$

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.

2) L'effet de peau

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 définir les conditions d'un contrôle, de connaître l'influence des différents paramètres en jeu sur cette impédance Z . Les modèles analytiques ou numériques mentionnés au paragraphe II.8.1.2 permettent de tracer les diagrammes théoriques qu'il sera utile de compléter par des résultats d'expérience, en particulier pour connaître l'influence de la présence des défauts recherchés et ainsi choisir la phase qui permet la meilleure sensibilité de détection (figure II-8).

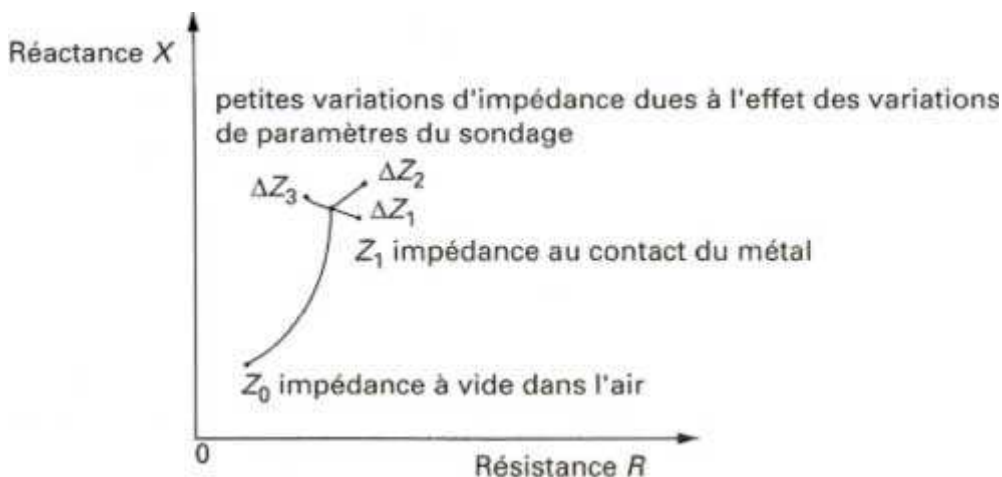


Figure II-8 : Représentation des variations d'impédance d'une bobine

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 $L_0\omega$ ($L_0\omega$ étant l'inductance de la bobine dans l'air).

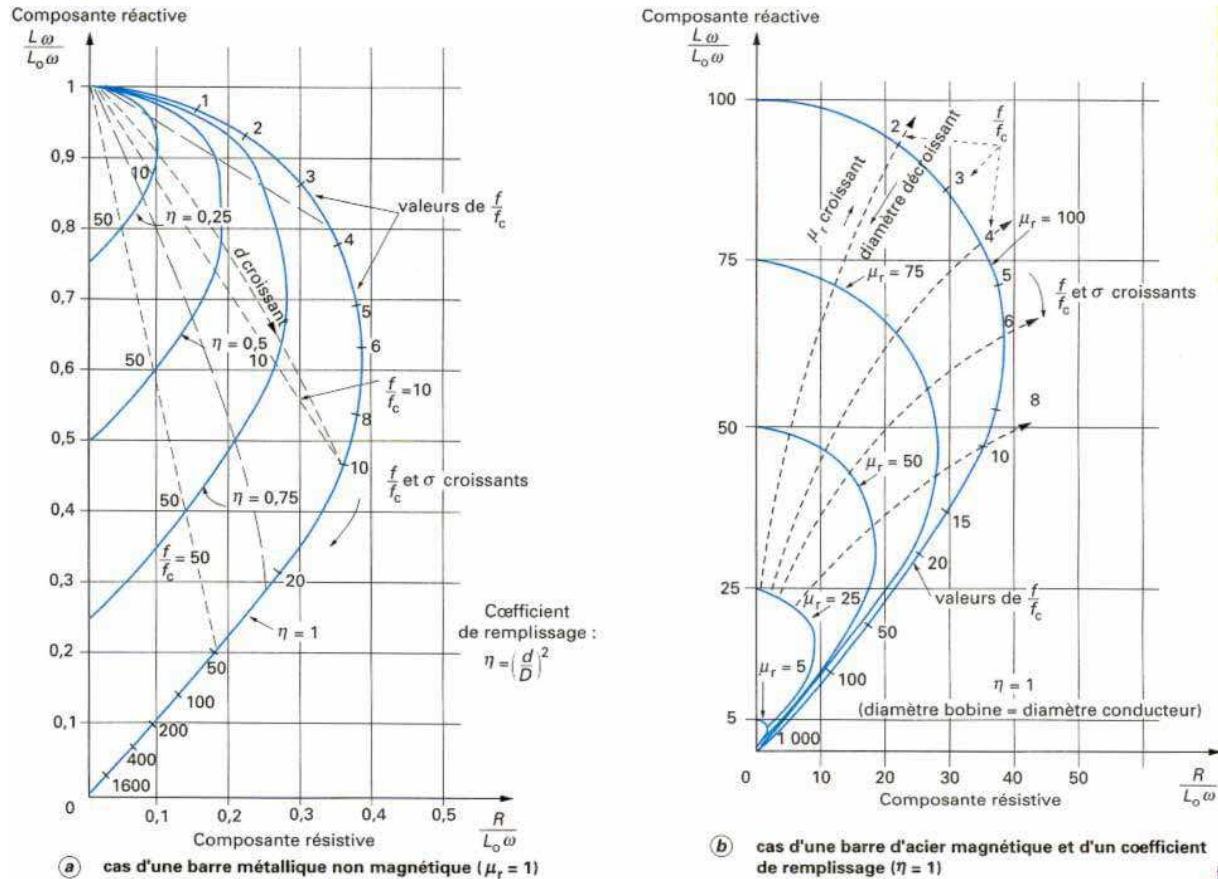


Figure II-9 : Diagrammes théoriques de l'impédance normalisée d'une bobine de diamètre D encerclant une barre métallique ferromagnétique ou non de diamètre d

II.6.2. Mise en œuvre du sondage par courants de Foucault

II.6.2.1 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, comme cela apparaît sur la figure II-9.
- **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 encerclantes, 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 (Voir figure II-9). 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.

II.6.2.1 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.

1) **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).

2) **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 (Voir figure II-10).

3) **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 (figure 20) 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.

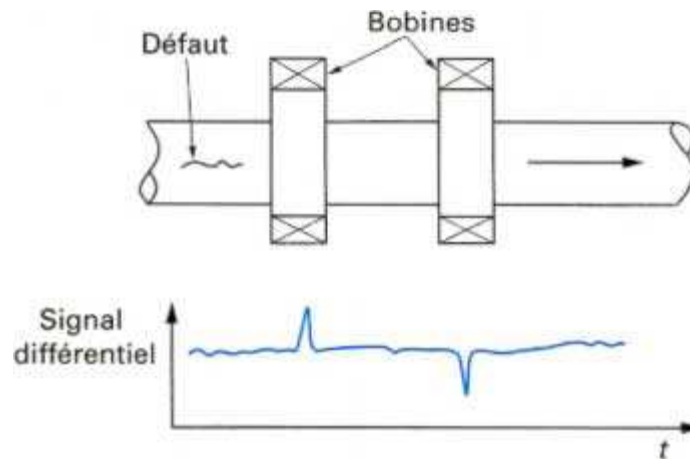


Figure II-10 : Détection d'un défaut avec une sonde encerclante différentielle

- **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.

II.6.3. performance et limitation

Les possibilités offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée du contrôle par courants de Foucault sont très appréciées sur le plan industriel. L'absence de contact entre la sonde et la pièce à contrôler, la possibilité de défilement à grande vitesse et la facilité d'intégration du procédé dans les chaînes de production donnent à cette technique de contrôle un avantage certain par rapport aux autres procédés.

Les courants de Foucault constituent par ailleurs un moyen de contrôle exceptionnellement fidèle et ce malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre et la multitude des paramètres d'action. Ce caractère d'excellente reproductibilité est très important pour les contrôles en maintenance, ainsi que pour la qualité des procédures d'étalonnage du matériel. Il est possible, avec les courants de Foucault, de détecter d'infimes hétérogénéités de surface ; toutefois cette grande sensibilité concerne bien entendu tous les paramètres perturbateurs, ce qui fait que, pour certaines applications, on pourra avoir du mal, malgré des réglages optimisés de la fréquence et de la phase, à obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant et donc un contrôle fiable, sans fausses alarmes. Il existe des remèdes à cette situation pouvaient être utilisés : techniques multifréquences, saturation magnétique des aciers pour minimiser l'effet perturbateur des variations locales de la perméabilité magnétique, traitement du signal par filtrage ou par des procédures plus complexes apparentées au traitement d'image. En ce sens, le contrôle par courants de Foucault bénéficie pleinement des progrès constants de l'électronique et de l'informatique.

II.7. 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 23. 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.

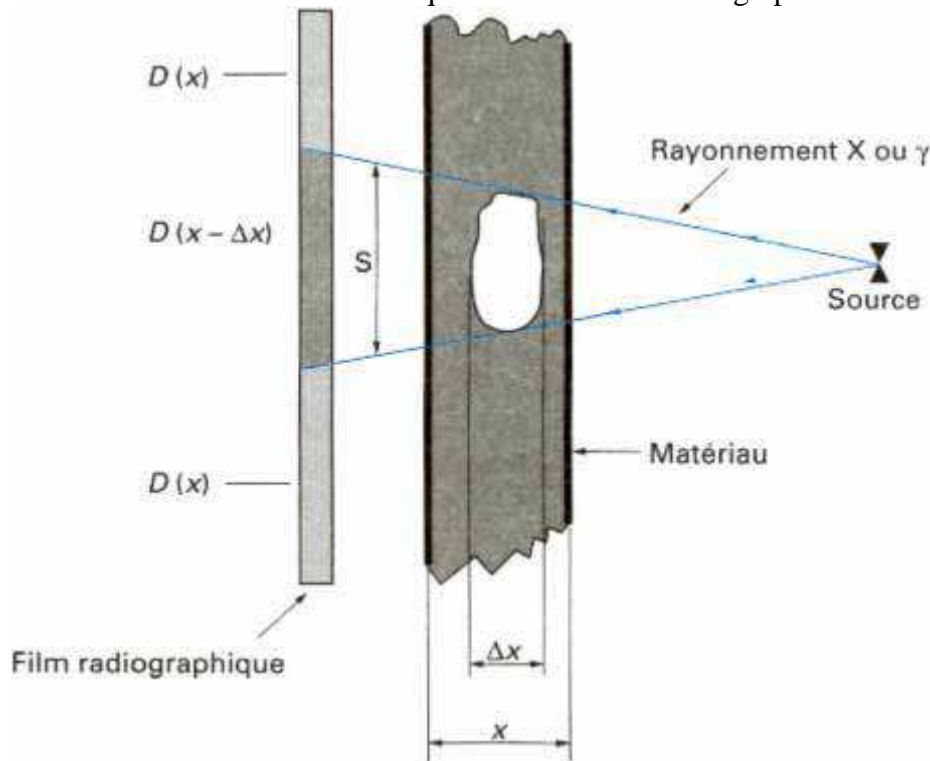


Figure II-11 : Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut

II.8. ULTRASONS

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kilohertz (nettoyage) à plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique).

La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectibilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques.

II.8.1 Différents types d'ondes

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.

Toutefois, un autre mode, utilisant le cisaillement, peut exister : mode d'onde transversale pour lequel les vibrations des particules s'exercent perpendiculairement à la direction de propagation. 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

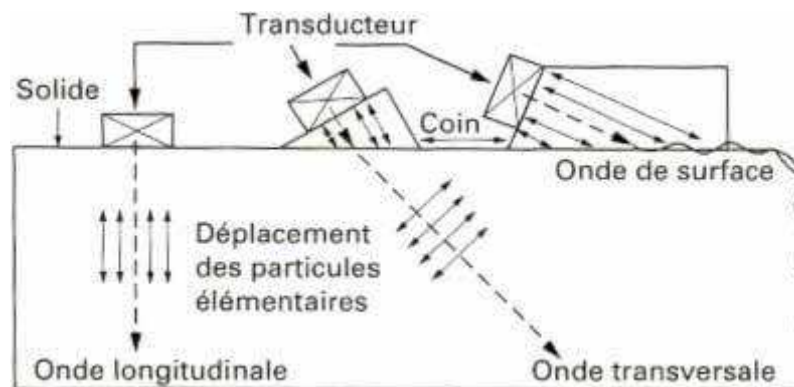


Figure II-12 : Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide

III.1. ESSAIS DE DURETE

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste à cause de leur caractère peu destructif .Mais il faut bien noter que la dureté n'est pas une propriété simple des matériex métalliques.

La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classement. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats. C'est ce qui explique le grand nombre de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dites , les machines d'essais et les étalons.

Les essais les plus courants se font par pénétration.

III.1.1. Principe de l'essai de penetration

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte est d'autant plus grand que le métal est mou. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte : $H = F/S$.

On aurait donc tendance à exprimer H en MPa, mais pour insister sur le caractère conventionnel de l'essai de dureté, les chiffres de dureté sont sans dimension.

Les essais les plus classiques sont les essais BRINELL, VICKERS et ROCKWELL.

III.1.2. Essai BRINELL

l'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

III.1.2.1. Condition d'essais

- L'essai est normalement conduit à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibrations et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 s.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- Epaisseur de la pièce $\geq 8 \times$ profondeur d'empreinte (aciers).
- Epaisseur de la pièce $\geq 10 \times$ profondeur d'empreinte (Al, Cu et alliage).
- Pour des essais successifs on choisira:
 - $a \geq 2,5 d$; $b \geq 4 d$ (aciers)
 - $a \geq 3 d$, $b \geq 6 d$ (Al, Cu et alliage).
- La pièce doit reposer sur un support rigide.

III.1.2.1. Domaine d'utilisation

- Bille en acier HBS < 450.
- Bille en carbure de tungstène HBW < 650
- Exemple : 350 HBS / 5/750/20; dureté Brinell 350, bille D'acier ,charge 7 355 N maintenue 20 s.

III.1.3. Essai VICKERS

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide d'angle à base carrée d'angle au sommet 136° sous une charge F et à mesurer la diagonale d et l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

La durté vickers est proportionnelle au rapport F/S.

S= surface de l'empreinte considérée comme pyramide droite.

III.1.3.1. Conditions d'essais

- l'essai est normalement effectué à température ambiante.
- la charge est appliquée progressivement sans chocs, ni vibrations et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15s.
- on préparera la surface pour éviter toute altération.
- on choisira l'épaisseur de la pièce $\geq 1,5*d$.
- pour des essais successifs on choisira
 - $\beta \geq 2,5*d$ (fig.4) (pour les aciers)
 - $a \geq 3*d$ et $b \geq 6*d$ (pour Al, Cu et alliage)
- la charge d'essai sera :
 - $49 \leq F \leq 981$ N (pour les aciers)
- la charge normale étant $F = 249$ N
 - $49 \text{ N} \leq F \leq 180$ N (pour Al, Cu et alliage)

III.1.3.2. Domaine d'utilisation

- Méthode à éviter pour pièce à gros grain (pièces moulées).
- Des écarts entre les longueurs des diagonales peuvent exister dans le cas de métaux très anisotropes.
- La préparation de surface très soignée (rectification, polissage) est un inconvénient de l'essai VICKERS, qui est par ailleurs le plus précis.
- Pour la mesure de la durté de pièces sphériques ou cylindriques, il existe dans la norme des tableaux de coefficient de correction.
- Exemple : 640 HV 50/20; charge 490,3 N appliquée 20s.

III.1.4. Essai ROCKWELL

III.1.4.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent e de la profondeur de pénétration.

III.1.4.2. condition d'essais

- l'essai est effectué à température ambiante.
 - les charges doivent être appliquées sans choc.
 - on prépare la surface pour éviter toute altération.
 - la pièce doit reposer sur un support rigide.
- Aucun marque ne doit apparaître au dos de la pièce.

L'épaisseur de la pièce doit être :

- $> 8e$ (profondeur de pénétration) pour les aciers,
- $> 10e$ pour alliages d'aluminium et cuivre.

Pour des essais successifs, la distance entre centres de deux empreintes voisines sera de:

- $g \geq 3$ mm pour les aciers,
 - $g \geq 6*d$ (diamètre de l'empreinte) (Al, Cu et Alliage).
- La distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce sera :
- $f \geq 3$ mm pour aciers,

$f \geq 3 \cdot d$ (diametre de l'empreinte) (Al , Cu et Alliage).

- pour la mesure de la durté des pièce sphériques ou cylindriques, il existe dans les normes des tableaux de correction.

III.1.4.1. Domaine d'utilisation

- Seules les pièce à gros graines ne pourront pas etre essayées de cette facon (pièces moulées).
- les marques laissées sur la pièces sont petites.
- permet une lecture directe.

III.2. ESSAIS DE TRACTION

III.2.1. Principe

L'essai consiste à soumettre à une éprouvette à un effort de traction et généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristique mécanique.

On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 et on mesura simultanément l'effort F et l'allongement $L-L_0$.

III.2.2. Eprouvettes

Un très grand nombre de types d'éprouvettes existent suivant la forme du produit (barres, fils, toles, tubes, pièces forgées ou moulées...) et la nature du matériau . leur section peut ainsi varier de 2mm^2 pour des micro-éprouvettes à 700mm^2 pour des éprouvettes classiques.

Forme générale :

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

La section droite sont définies par :

d = diamètre de la section (section circulaire) ou diamètre du plus petit cercle circonscrit à la section, c'est -a- dire entourant complétement le contour de la section (section non circulaire);

a : épaisseur de l'éprouvette plate ;

b : largeur de l'éprouvette plate ;

L_0 : longueur initiale entre repères ;

L_c : longueur de la partie calibrée;

L_t : longueur totale de l'éprouvette ;

S_0 : section initiale.

III.2.3. Forme et dimesions de la partie calibrée

1) Aciers

- produits de diamètre $d \leq 4$ mm ou d'épaisseur $a \leq 3$ mm (NF A 03-151).
- toles et feuillards d'épaisseur comprise entre 0,5 mm et 3 mm (NF A 03-160).

$$L_0 + b/2 \geq L_c \geq L_0 + 2b$$

Largeur des tetes d'amarrage comprise entre 20 et 40 mm; rayon du conge de recordement ≥ 20 mm: cas de bandes parallèles : longueur entre mâchoires = $L_0 + 3b$

Fils (NF A 03-705) $L_0 = 100\text{mm}$ ou 200mm
 Pour $d \geq 4 \text{ mm}$, $L_0 \geq 10d$, distance entre machoires $\geq L_0 + 50\text{mm}$

2) Aluminium et alliages, cuivre et alliages (NF A 03-251)

$$L_0 + d/2 \leq L_c \leq L_0 + 2d$$

Aluminium : d ou $b \geq 0.04\text{mm}$

Cuivre: section droite $\geq 20\text{mm}^2$ (sauf laminé) ou $b \geq 2.5\text{mm}$ (laminé).

Remarque: d'autre normes concernent les produits moulés:

NF A 32-051 aciers moulés

NF A 32-101 fontes grises.

NF A 32-201 fontes à graphite sphérodal.

NF A 32-701 à 703 fontes malléables .

NF A 57-701 à 702 et 703 pièces moulées en aluminium et alliages.

NF A 53-707 pièces moulées par gravité en bronze.

NF A 53-709 pièces moulées brutes en cupro- aluminium .

3) Eprouvette proportionnelle

Une éprouvette est dite proportionnelle lorsque sa longueur initiale entre repère L_0 est déduit de la section initiale S_0 par la formule $L_0 = k \cdot S_0$ avec $k=5.65$

Les tableaux suivants et la figure III-1 donnent les dimensions des éprouvette classiques pour les produit corroyés.

a(mm)	b(mm)	L_0 (mm)	L_c mm	L mm
0.5-3.0 exclus	20	80	120	140
0.5-0.2inclu	12.5	50	75	87.5
D(mm)	S_0 (mm)	L_0 (mm)	L_c (mm)	L_t (mm)
20 ± 0.105	314	100	110 à 140	$L_t \geq L_c + 2d$ ou $4d$
10 ± 0.075	78.5	50	55 à 70	

Tableau III-1 dimensions des éprouvette classiques pour les produit corroyés

Il existe dans la norme NF A 03-151 un abaque pour le calcul de la longueur entre repères des éprouvettes a section rectangulaire

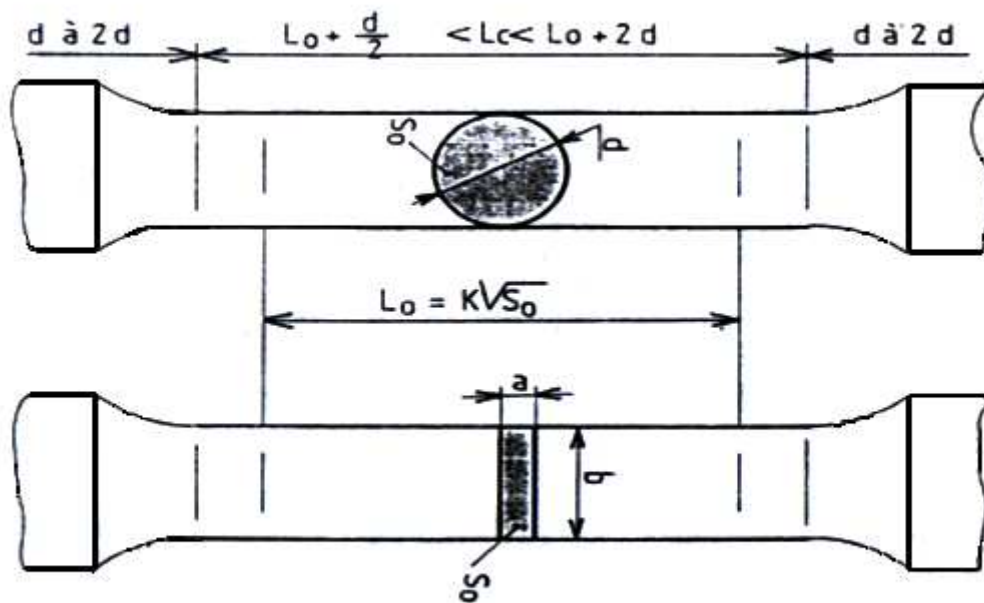


Figure III-1: Epreuve normalisé a section circulaire

4) Diagramme conventionnel

Le diagramme de traction est dit conventionnel lorsque l'on rapporte respectivement les mesures de résistance unitaire et d'allongement unitaire aux valeurs initiales S_0 et L_0 de l'éprouvette.

5) Forme classique d'un diagramme de traction

Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire $R=F/S_0$ en fonction du taux d'allongement $e=(L-L_0)/L_0$ figure III-2.1

Les diverses régions sont :

OA : domaine élastique à déformation réversible $R=E.e$

Le : coefficient de proportionnalité est le module d'Young .

A : limite du domaine élastique.

AB : domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie.

B : point de charge maximale ou début de la striction .

BC : domaine de striction ou de déformation plastique localisée .

C : point de rupture de l'éprouvette .

III.2.3. Caractéristiques classiques de l'essai de traction

1) Charge unitaire à la limite apparente d'élasticité (figure III-2.1)

$$R_e = F_e / S_0 \quad (\text{MPa}).$$

$$F_e = \text{charge à la limite apparente d'élasticité} \quad (\text{N}).$$

$$S_0 = \text{section initiale} \quad (\text{mm}^2).$$

R_e est appelé également limite apparente d'élasticité (ou limite d'écoulement) .

En fait, certaines courbes de traction ne représentent pas de limitev apparente d'élasticité nette (aciers austénitiques , aluminium...) de telle sorte que l'on définit :

-Soit une charge unitaire à la limite d'allongement rémanent (souvent fixé à 0.2 %) (figIII-2.2).

$$Rr_{0,2} = Fr/S_0 \quad (\text{MPa})$$

-Soit une charge unitaire à la limite conventionnelle d'élasticité (souvent fixé à 0.1% ou 0.2%) (figIII-2.3et III-2.4).

$$R_{p0,2} = F_{p0,2}/S_0 \quad (\text{MPa})$$

On parlera de la limite élastique à 0.2% .

D'autre part, certains matériaux (acier ferritiques) présentent un crochet de traction suivi d'un palier de charge. ce phénomène de palier correspond à une déformation hétérogène de l'éprouvette, c'est-à-dire à la propagation d'une petite zone déformée définit une bande qui fait un angle de 51^0 avec l'axe de traction. en fait ce sont plusieurs bandes qui progressent à travers l'éprouvette et que l'on appelle lignes de PIOBERT-LUDERS. La fin du palier correspond au moment ou les bandes ont envahi la totalité de l'éprouvette.

On est amené à définir dans ce cas

- une limite supérieur d'écoulement R_{eh} (MPa)
- une limite inférieur d'écoulement R_{el} (MPa), en négligeant les éventuels phénomènes transitoires .
- une longueur du palier A_p (%)

2) Résistance à la traction

$$R_m = F_m/S_0 \quad (\text{MPa})$$

$F_m =$ charge maximale.

3) Allongement pour cent après rupture

$$A = (L_0 - L_u) / L_0 * 100$$

$L_u =$ longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture.

4) Striction

On définit :

- Le coefficient de striction : $Z = (S_0 - S_u) / S_0 * 100$
 - L'allongement de striction : $Z_u = (S_0 - S_u) / S_u * 100$
- $S_u =$ section minimale de l'éprouvette après rupture.

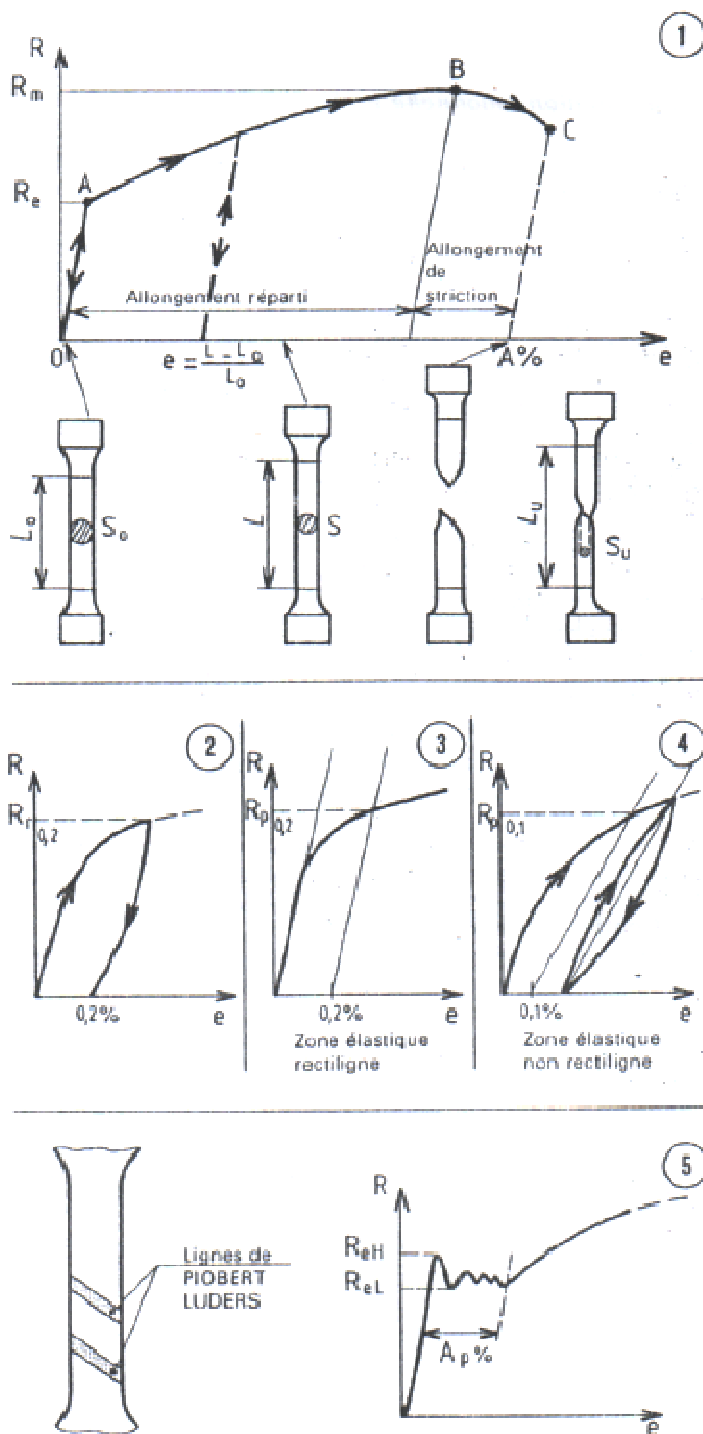


Figure III-2 Caractéristique de l'essai de traction

III.2.4. Diagramme rationnel

1) Définition du diagramme rationnel

Le diagramme rationnel est une représentation de la courbe de traction avec en ordonnée la contrainte vraie, et en abscisse la déformation rationnelle.

Contrainte vraie σ : la contrainte vraie tient compte de la variation de section au cours de l'essai, et est égale à la charge r rapportée à la section instantanée $\sigma = F/S$

En admettant que le volume de la partie calibrée de l'éprouvette reste constant, on a :

$$S_0 L_0 = SL = S(L_0 - \Delta L) ; S = S_0 / (1 + \Delta L/L_0) = S_0 / (1 + e) \text{ d'ou } \sigma = F/S_0 (1 + e) = R (1 + e)$$

Déformation rationnelle ϵ : l'allongement instantané est égal à $\Delta L/L$, et au même instant, l'allongement depuis le début de l'essai est, en considérant des allongements infiniment petits dL : $\epsilon = \int dL/L = \ln L/L_0 = \ln ((L_0 + \Delta)/L_0)$

$$\epsilon = \ln L/L_0 = \ln (1 + e)$$

l'avantage de cette définition est la propriété d'additivité, utile pour les calculs de plasticité.

la différence entre e et ϵ devient importante au-delà de 20% de déformation comme le montre le tableau suivant :

e	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
ϵ	0,095	0,182	0,262	0,336	0,405

Tableau III-2 différence entre e et ϵ au-delà de 20% de déformation

La courbe (ϵ, σ) est le diagramme rationnel de traction .il se deduit du diagramme conventionnel (Figure III-2.1).

On constate qu'il n'y a pas de défference avec la tracé conventionnel pour la partie, élastique car les déformations élastiques sont très faibles. Dans le domaine de déformation plastique homogène, la courbe prend une allure parabolique . Dans la zone de striction, il faut tenir compte de l'effet de concentration de contrainte (variation rapid de la section).

2) Coefficient d'écrouissage n

La portion parabolique da la courbe rationnelle peut etre mise sous forme analytique, l'exprrsion la plus utilisée est de la forme : $\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n$ ou bien $\sigma = k \epsilon^n$ (acier doux).

σ_0, k, n se sont des constante et n est appelé le coefficient d'ecrouissage (ou de consolidation).

Dans cette équation n est égal à l'allongement répartie avant striction ; n definit donc l'aptitude d'un materieu à se déformer en expression.

Démonstration : a la charge maximal, le démarrage de l'instabilité correspond à $df=0$. Or $F = \sigma \cdot S$; donc

$$d\sigma/\sigma + dS/S = 0. \text{ Comme } \epsilon \ln L/L_0 = \ln S_0/S, \text{ on a } dS/S = - d \epsilon; \text{ d'ou la relation :}$$

$$d\sigma/\sigma = d\epsilon \text{ ou bien } d\sigma/d\epsilon = \sigma.$$

Ceci signifie que le debut de la striction est difinit sur la courbe rationnelle par la tangente dont la pente $d\sigma/d\epsilon$ est égale à σ , quelle que soit l'equation de la courbe rationnelle. Si la courbe rationnelle a pour équation $\sigma = K\epsilon^n$,on a :

$$d\sigma/d\epsilon = n k \epsilon^{n-1} \text{ d'où } n k \epsilon^{n-1} = k \epsilon^n \text{ et } \epsilon n = n$$

ϵn est l'allongement plastique homogène (allongement avant striction).

La determination de n peut se faire soit à partir de la courbe rationnelle , soit à partir de la forme analytique en tracant par exemple $\ln \sigma = f(\ln \epsilon)$: la pente donne directement n .

Des exemples de valeurs de n sont données ci- dessous.

Matériau	Titane	Inox 18-10	Aluminium
n	0.10-0.30	0.40	0.25

Tableau III-3 exemples de valeurs de n

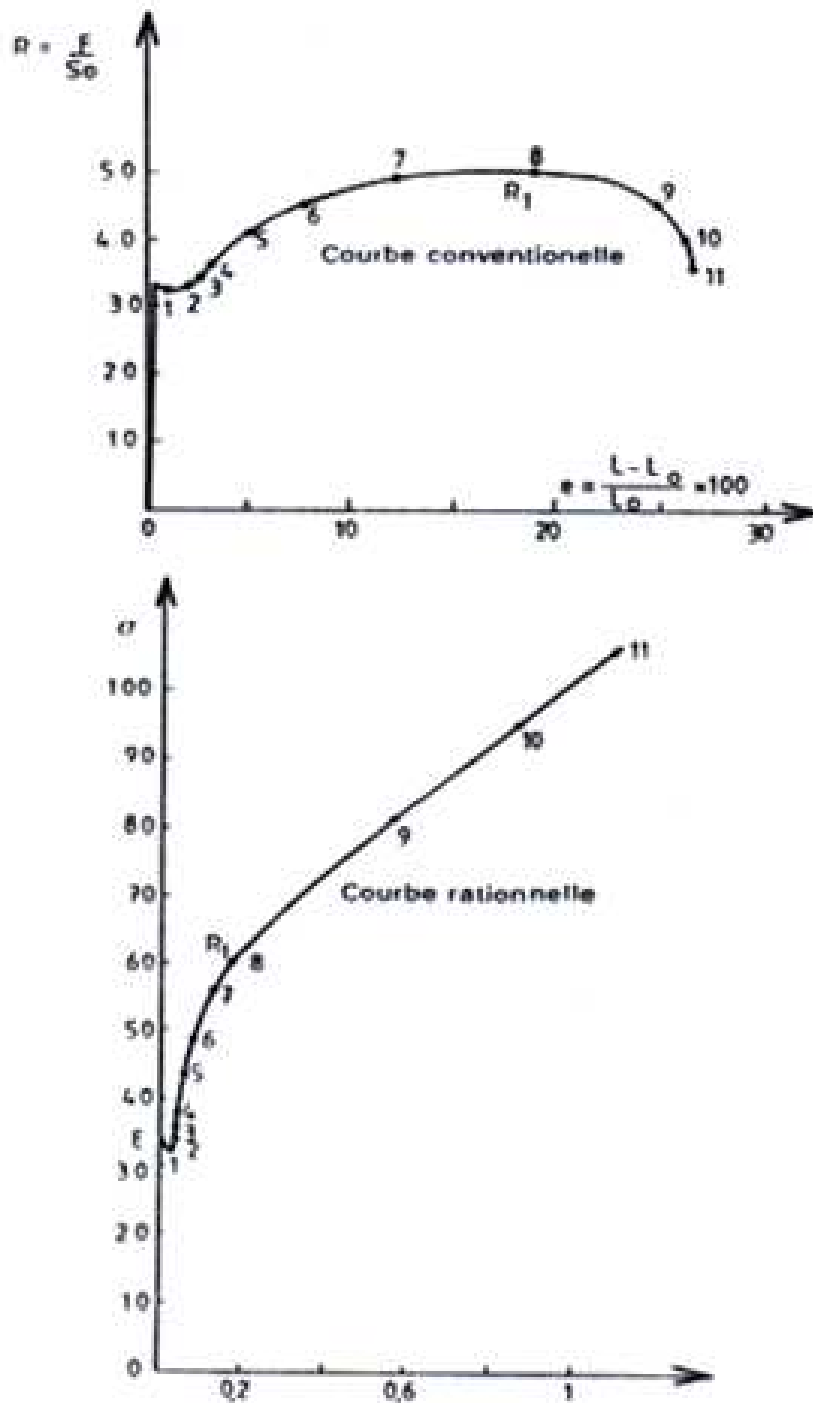


Figure III-3 : Diagramme conventionnelle et rationnelle

III.2.5. Coefficient d'Anisotropie

Les écrouissages a froid importants comme la laminage, le tréfilage se traduisent par la formation de textures cristallographiques conduisant à une anisotropie des propriétés mécaniques. L'influence sur R_p , R_m , $A\%$ est relativement faible .

Par contre, il n'en est pas de même pour la répartition des déformation suivant la largeur b et l'épaisseur a des éprouvette, en fonction de la deriction de prélèvement de léprouvette par rapport – par exemple – à la direction de laminage DL (dans le cas des toles): ce phénomène important intervient dans les problèmes d'emboutissage profond (Voir Figure III-4.1).

Pour mesurer cette anisotropie , on utilise le rapport $r\phi$ entre la déformation rationnelle en largeur et la déformation ϕ représente l'angle entre la direction de traction et la direction de laminage

$$r\phi = \epsilon b / \epsilon a$$

avec $\epsilon b = \ln b_0/b$ et ϵ

Comme la mesure en épaisseur est délicate, on effectue plutot la mesure d'allogement $\epsilon L = \ln (L/L_0)$. Comme le volume de l'éprouvette reste constant , on en déduit ϵa :

$$\epsilon a = \epsilon l - \epsilon b = \ln L/ L_0 - \ln b_0/b \quad \text{D'où} \quad r\phi = \ln(b_0/b) / \ln (L/L_0) - \ln (b/b_0)$$

On effectue la mesure en arrêtant l'essai de traction dans la zone de déformation plastique homogène . un exemple de résultat est donnée figure 2 .

Plutot que d'utiliser la courbe $r\phi = f(\phi)$, on représente l'anisotropie par le coefficient moyen r :

$$r = (r + r_0 + 245 + r_{90}) / 4$$

Le coefficient r représente la résistance à l'amincissement d'une tole, une valeur élevée de r correspond à une déformation en largeur plus grande qu'en épaisseur .

III.2.6. Influence des conditions d'essai (vitesse de deformation et temperature)

Les caractéristique mécaniques dépendent de la température et de la vitesse de déformartion ϵ , mais la déformation plastique est indépendante de la durée d'application de la charge lorsque les températures sont inférieures à la moitié de la température de fusion (T_f). Au – dela de $T_e (k) / 2$ apparaît le phénomène de fluage.

Deux types de comportement apparaissent, illutrés par les métaux CFC et les métaux CC (figure III-4.3) : les premiers présentent une faible dépendence de σ_p avec T et ϵ , contrairement aux second.

Dans le cas des métaux CC, une augmentation de ϵa un effet équivalent à une diminution de T . en fait, cette équivalence est liée au fait que la déformation et un processus thermicement activé, qui est favorisé par l'application d'une charge .

Les vitesse classique d'essai définies par la norme sont :

- Acier $\epsilon \leq 0.15 L_0$ (mm.min⁻¹) ou $\leq MPa.s^{-1}$
- Aluminium $\epsilon \leq 0.009 L_0$ (mm.mm⁻¹) ou $\leq 10 MPa.s^{-1}$
- Cuivre $\epsilon \leq 0.006 L_0$ (mm.mm⁻¹)

III.2.7-Ductilite et tenacite d'un materiau

1) Dustilité

La ductilité d'un materiau peut etre appréciée à partir de son comportement durant la striction, par la valeur du coefficient de striction Z .

Si z est grand (>0.5) le matériau est ductile.

Si z est faible (<0.1) le matériau est semi-fragile .

Pour les matériaux fragiles, la rupture a lieu dans le domaine élastique.

Remarque : pour certains alliages ayant une valeur de Z moyenne (0.3 par exemple), la ductilité peut devenir très faible ou nulle dès qu'une entaille est introduite.

2) Ténacité

La ténacité peut être définie comme le travail nécessaire par unité de volume pour provoquer la rupture. Dans le cas d'un essai de traction uniaxiale: $dw/dv = \int \sigma \cdot d\epsilon$ (MPa).

La ténacité peut donc être interprétée comme l'aire sous-tendue par la courbe rationnelle de traction jusqu'au point de rupture (figure III-4.4)

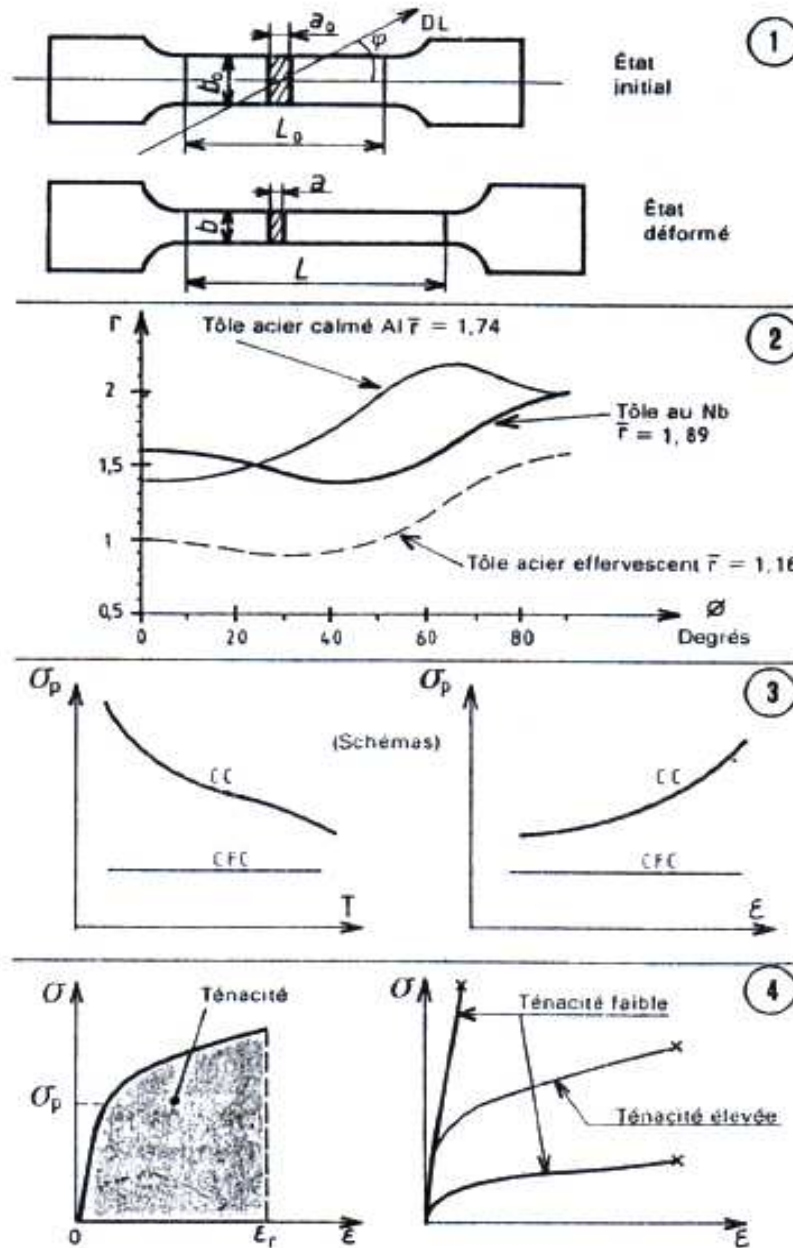


Figure III-4 : Caractéristique des essais de tractions

III.3.ESSAIS DE RESILIENGE

La connaissance des caractéristiques mécanique déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le métal fragile. Les facteurs fragilisants sont :

- L'abaissement de la température.
- L'augmentation de la vitesse de déformation ;
- L'augmentation de la dimension des pièces .

Un des moyens, le plus classique et le plus ancien pour caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience sur éprouvette entaillée

III.3.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm^2 nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette .

$\text{RESILIENGE} = \text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (joules)} / \text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}$

III.3.2.Machine d'essai

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O . Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette.

Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule.

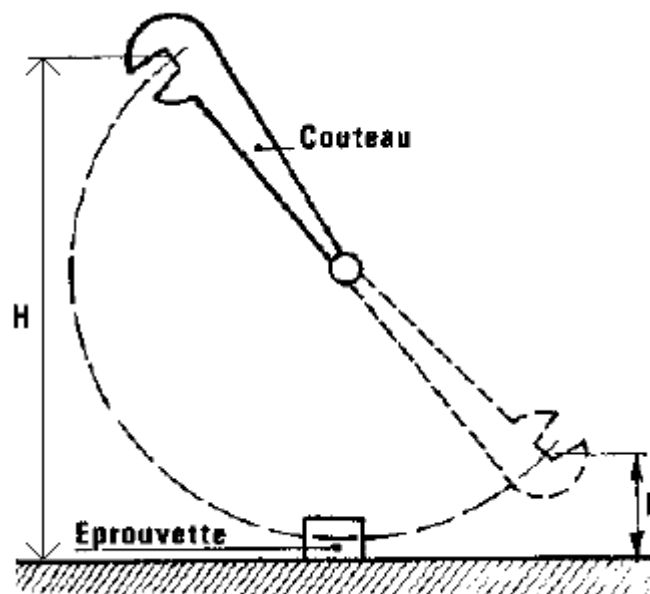


Figure III-5 : Mouton de Charpy

Caractéristique de la machine	Dimensions
Distance entre appuis	40 ^{0-0,5} mm
Rayon des arrondis des appuis	1à1,5mm
Pente de la dépouille du porte-éprouvette	1/5 30 ^{0±1}
Angle au sommet du couteau du mouton	2à2,5mm
Rayon de l'arete du couteau du mouton	

Tableau III-4 Caractéristique du Mouton de Charpy

III.4. ESSAIS DE FATIGUE

Lorsque l'on soumet un matériau métallique à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications de microstructure regroupés sous le terme général d'endommagement par fatigue ou plus simplement fatigue.

Cet endommagement ne se signale par aucune modification macroscopiquement décelable, et la rupture peut intervenir à des niveaux de contraintes élevés, souvent inférieurs à la limite d'élasticité, mais dont la répétition constitue le danger.

La capacité de résistance à la fatigue d'un matériau s'appelle l'endurance.

III.5. ESSAIS DE FLUAGE

III.5.1.Introduction

Aux températures élevées ($T(K) > 0,4$ à $0,5T_F$), un matériau soumis à une contrainte, inférieure à la limite d'élasticité, présente une déformation plastique évoluant en fonction du temps, pouvant conduire éventuellement à la rupture. Ce phénomène est appelé fluage.

III.5.2.Essai de fluage(NF A03-352, 03-353)

1) Principe

La méthode d'essai permet de déterminer en fonction du temps les allongements de fluage d'une éprouvette maintenue à une température T et soumise dans cet état à une charge de traction.

Les mesures de variation de longueur de l'éprouvette sont faites de façon interrompue.

La durée des essais peut dépasser 10 000 heures.

2) Eprouvettes

Les éprouvettes sont semblables à celles de l'essai de traction.

Dans le cas de l'acier, elles doivent avoir une section qui ne soit pas inférieure à $12,5\text{mm}^2$.

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons mettre en pratique l'étude théorique sur l'essai de traction contrôlé par les courants de Foucault et décrire les différentes étapes et les moyennes mises en œuvre pour la réalisation des essais.

Le but des essais effectués est de contrôler par courants de Foucault plusieurs échantillons sollicités par une machine de traction pendant une durée de temps définie.

VI.1. MATERIAUX UTILISES

Les matériaux utilisés dans notre étude comme mentionnée précédemment sont l'Aluminium 2024 et le Titan, qui sont disponibles au niveau de l'atelier d'AIR Algérie.

VI.2. REALISATION DES EPROUVETTES

- **L'Aluminium**

La tôle d'aluminium d'épaisseur $e=10$ mm, a été découpée dans un atelier de menuiserie d'aluminium à Blida avec une tronçonneuse munie d'un disque conçu pour l'aluminium, on a préféré ne pas l'usiner pour avoir une section maximale.

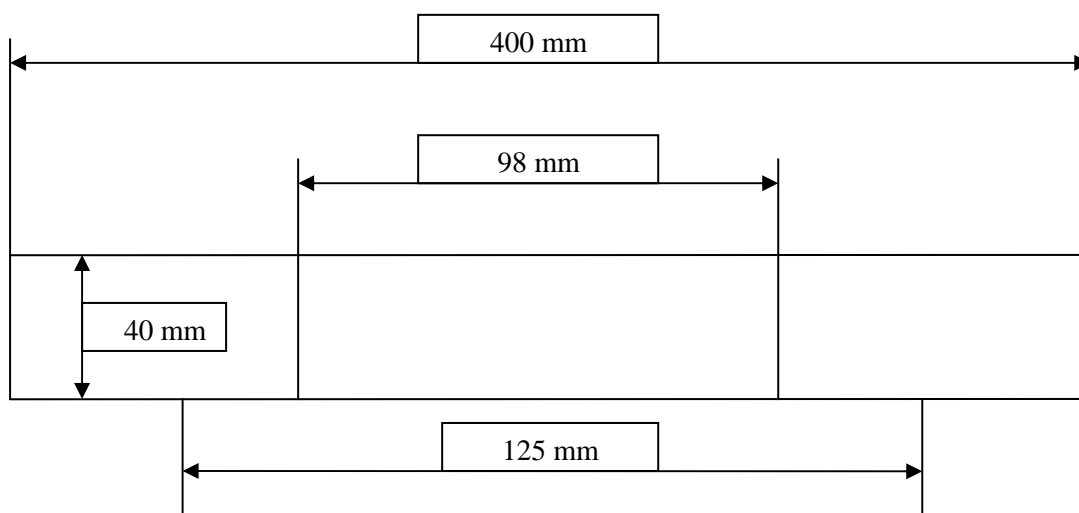


Figure IV-1 : Eprouvette d'Aluminium 2024

- **Le Titane**

La tôle de titane d'épaisseur $e=2,7$ mm, a été découpée avec une guillotine électrique à l'atelier de l'institut de mécanique de l'université de Blida, puis la mise en forme des éprouvettes était effectuée à l'aide d'une fraiseuse équipée d'une fraise à lames en hydrocarbure pour acier dur dans l'atelier du C.S.C à Cheraga suivant la norme NF EN 10002-1. (Les dimensions générales des éprouvettes sont mentionnées à III.2.3)

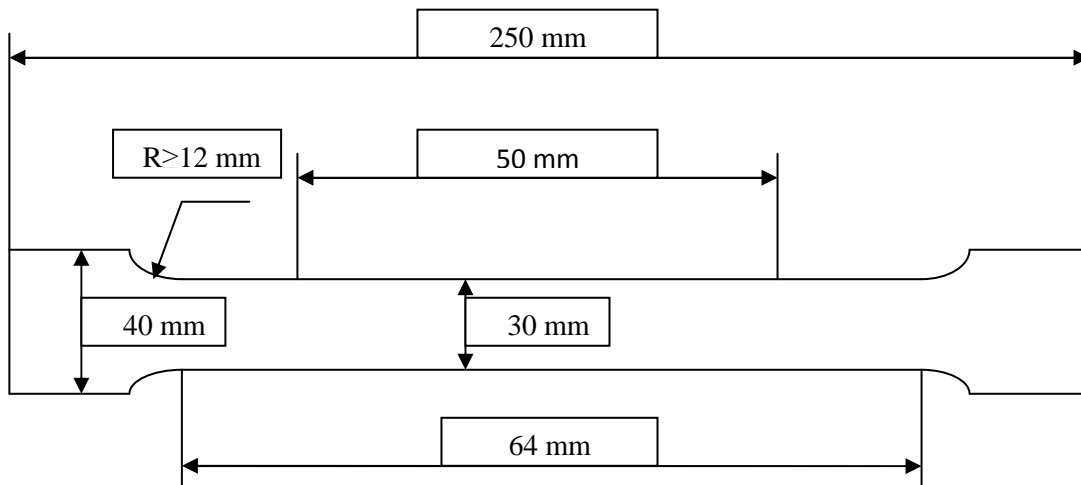


Figure IV-2 : Epreuve de Titan

N.B: Toutes les éprouvettes ont subi un passage afin d'améliorer leur état de surface.

IV.3. REALISATION DES SONDES

Les sondes utilisés dans les CF sont de dimensions différentes, de diamètre inférieur à 2,5 mm jusqu'à atteindre un diamètre important supérieur à 300 mm. Elles peuvent être aussi longues ou courtes, à une ou plusieurs couches, avec noyau à section transversale, rectangulaire, circulaire ou conique.

- **Supports de sondes :**

La fabrication des sondes dépend de la fréquence à utiliser, donc du choix du noyau.

- La sonde à noyau Nylon est équivalente aux sondes à aire.
- Acier doux est utilisé pour les sondes internes et les palpeurs à surface, dont la gamme de fréquence varie entre 1 à 50 KHz.
- La ferrite qui a une très large bande de fréquence, mais elle est difficile à usiner.

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

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

Les sondes utilisées dans notre expérience (figure IV-3) ont les caractéristiques suivantes :

- Le noyau a un diamètre faible.
- Le nombre de spires est grand (200 spires).
- Le diamètre du fil est petit (0,09mm).
- Le nombre de couche est grand (4 couches).

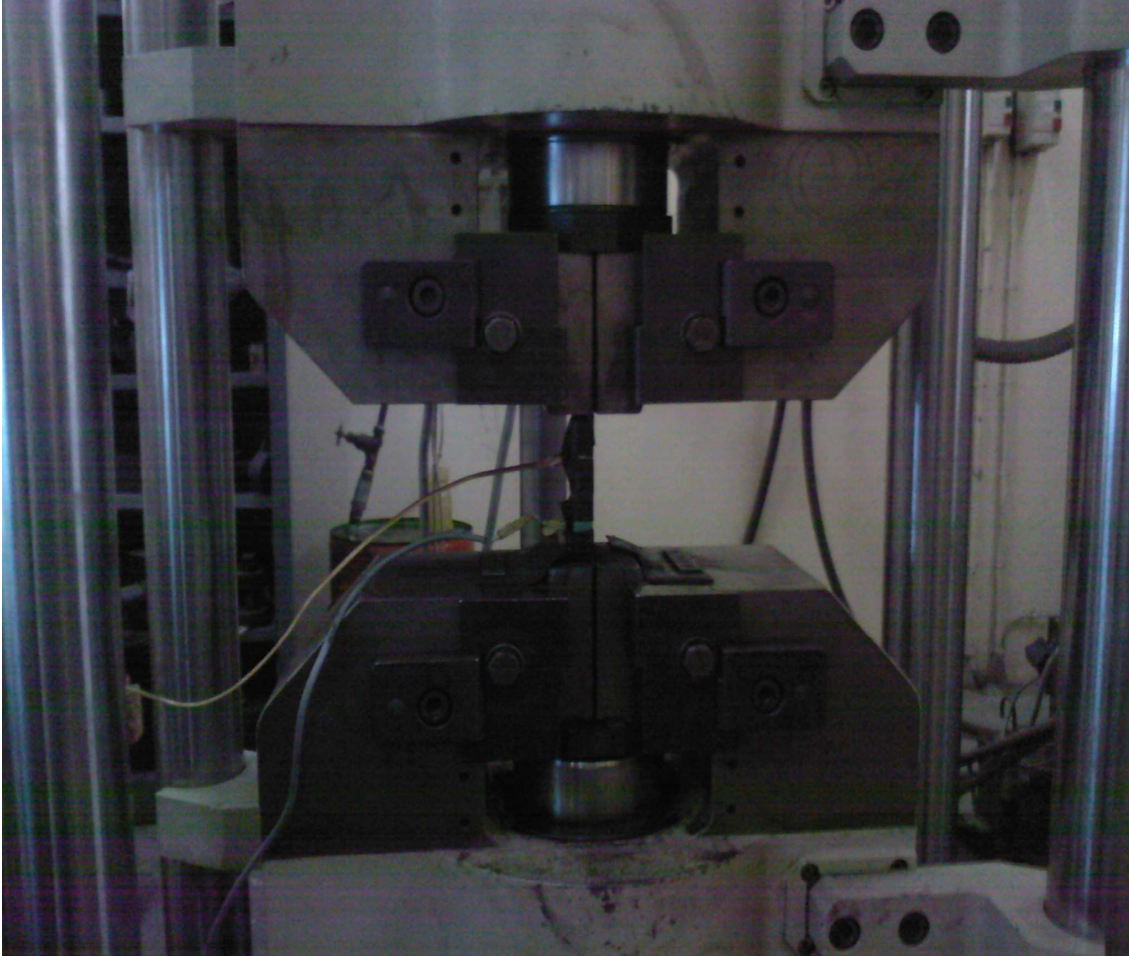


Figure IV-3 : Eprouvette amarrée sur machine de traction, avec les deux sondes attachées

IV.4.REALISATION DES ESSAIS

Les expériences que nous allons exposer ont été fait au URASM à Annaba (direction des recherche appliquer -el hadjar-) dans le laboratoire des essais mécanique, et pour leur réalisation nous avons utilisé une machine de traction, un appareille de mesure, deux sondes qui prélève les données et un pc pour les enregistrer. (Figure IV-4)

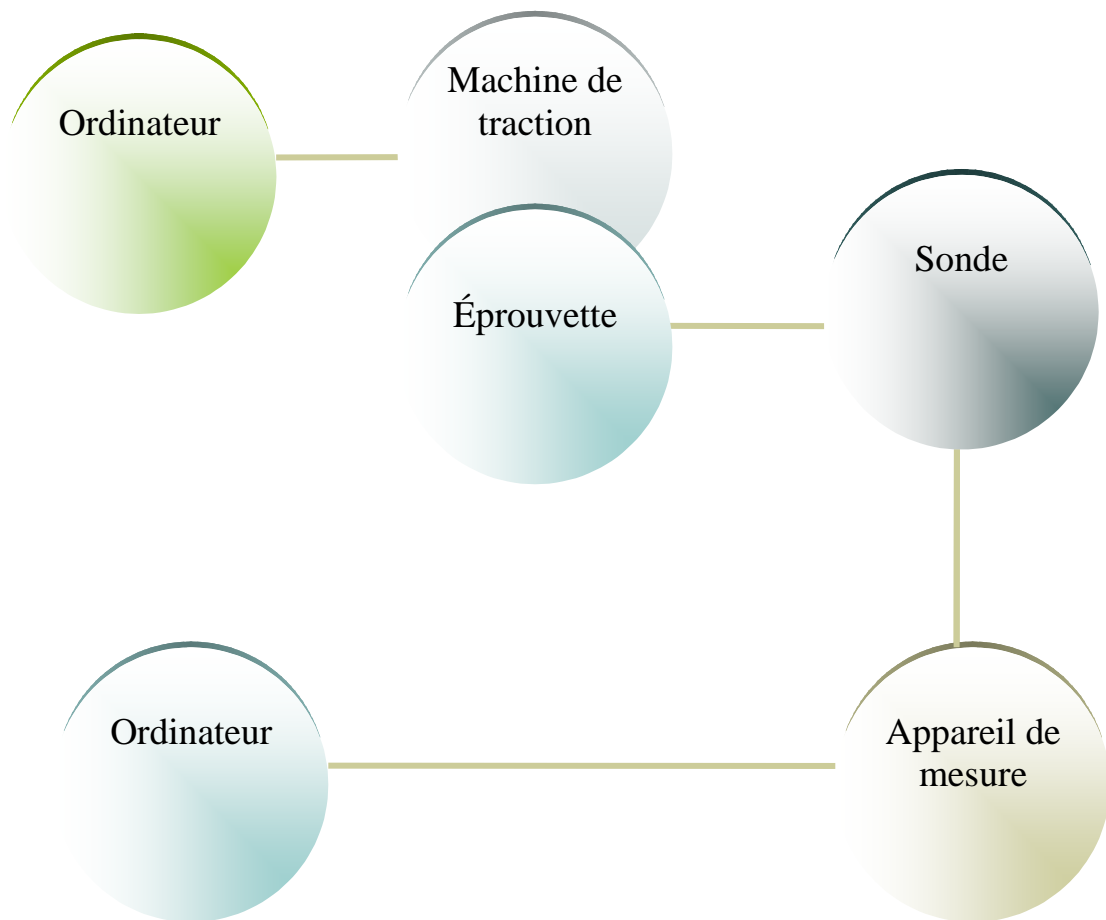


Figure IV-4 : Organigramme de la chaîne de montage

IV.4.1.DESCRPTION DES INSTRUMENTS

1) La machine de traction

Une machine servohydraulique de marque (ZWICK) de fabrication allemande qui fait l'essai de traction et de compression, a température ambiante ou a température élevée, et qui fait aussi l'essai de pliage (figure IV-3).



Figure IV-5 : Machine de traction ZWICK

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 Δl ou le module de YOUNG.

3) 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 1 MHz qui sont prélevés par les sondes fixées sur l'éprouvette (figure IV-6).



Figure IV-6 : Appareil de mesure pour les C.F (AGILEN)

4) 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.

IV.4.2.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 en cliquant sur le bouton (Man).
- Un simple clic 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.5. REALISATION DES ESSAIS

IV.5.1 Aluminium 2024

1) 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.

Eprouvette n° 1, n°2	Longueur entre repères (L_0)	98 mm
	Largeur : b	42 mm
	Epaisseur : e	10 mm
	Longueur calibrée : L_c	116 mm
	Section initiale : S_0	420 mm ²
Vitesse de l'essai Eprouvette n° 1 (contrôle déplacement)	Zone élastique	50 mm/m
	Zone plastique	20 mm/m

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

- Prélèvement de l'allongement de la zone calibrée pour l'éprouvette n°1

$$\varepsilon = 59,4\%$$

2) Essai N° 2

Pour la 2^{ème} éprouvette on réalise l'essai de traction jusqu'au début de la zone plastique et on maintient la force constante ($F \approx 160000$ N) pendant deux heures et on prélève l'impédance et la résistance chaque 15 minute, et à la fin des deux heures on a augmenté la force jusqu'à la limite de la zone proche de la rupture ($F = 186445$ N), puis on arrête la machine pendant une durée de deux heures et on effectue la même opération précédente.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
19	22528.5	360.9	---	---	205700.2	489.8	35.16	39.69	420.00	10.00

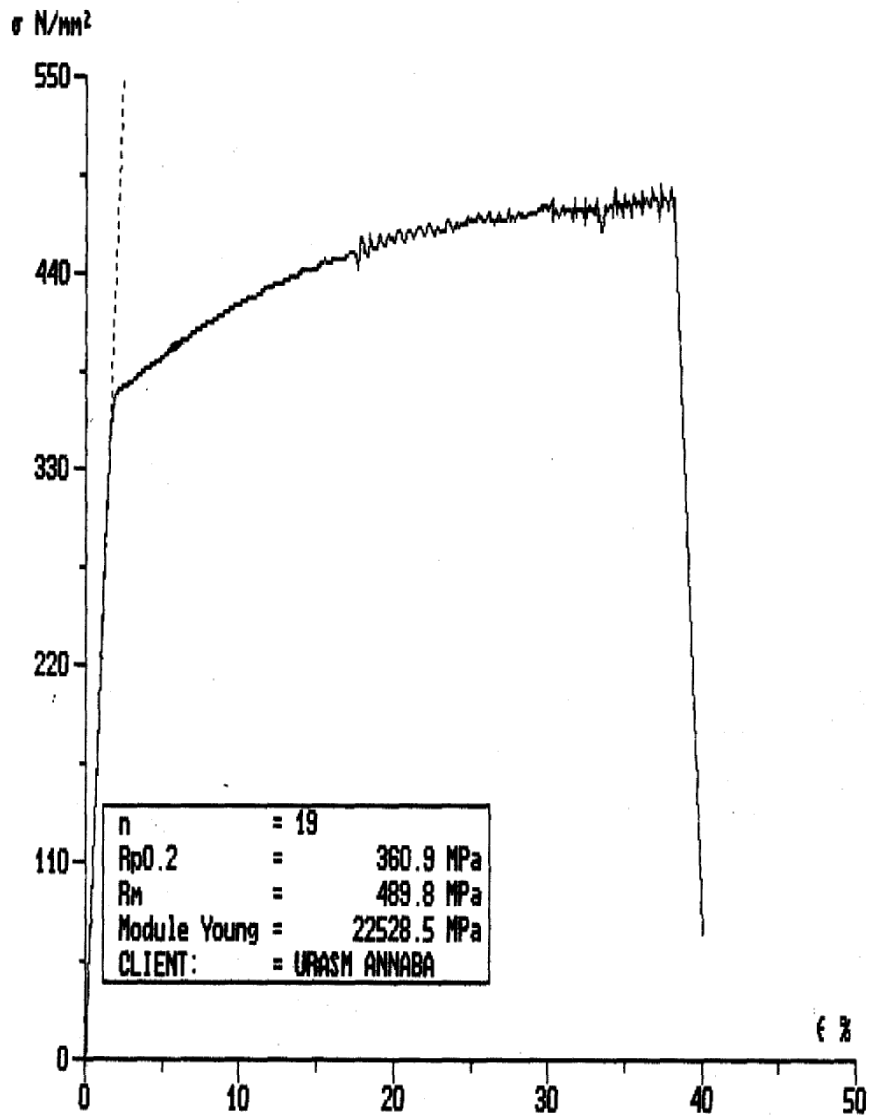


Figure IV-7 : Diagramme de traction pour l'éprouvette d'Aluminium N° 1

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section 80 mm ²	D0 mm
1	---	---	---	---	186445.3	433.6	---	---	430.00	10.00

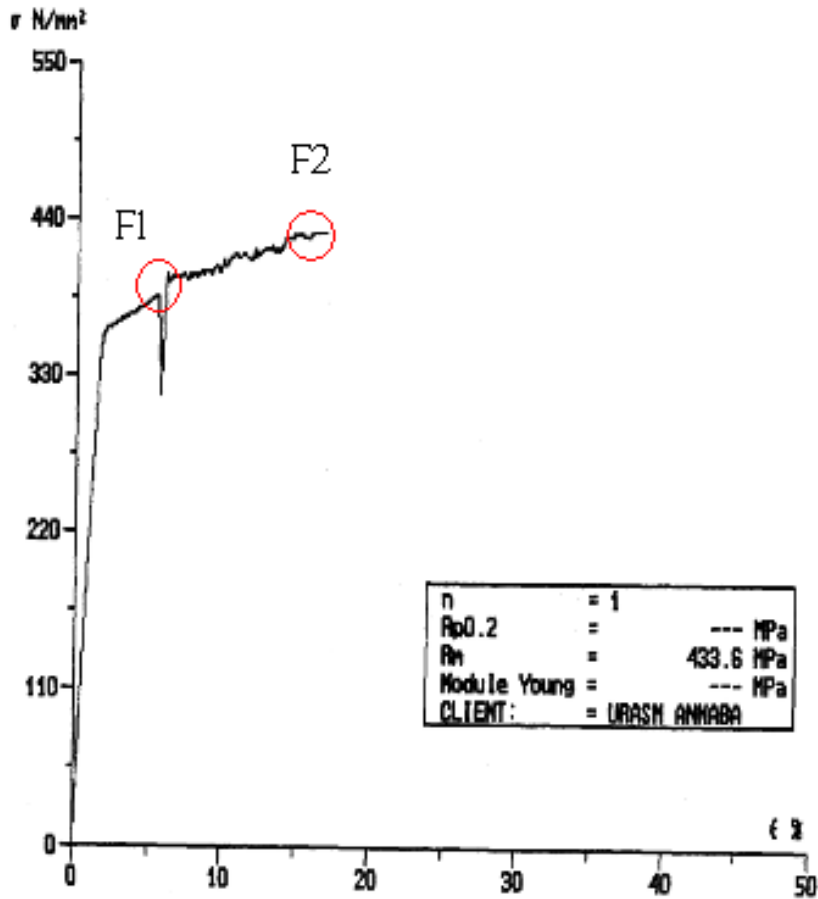


Figure IV-8 : Diagramme de traction pour l'éprouvette d'Aluminium N° 2

IV.5.2.Titane

1) 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 (L_0)	50 mm
	Largeur : b	30 mm
	Epaisseur : e	2,7 mm
	Longueur calibrée : L_c	64 mm
	Section initiale : S_0	81 mm ²

Tableau IV-2 : Dimension des éprouvettes de Titane

Remarque

Toute les éprouvettes de titane son identiques.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
2	31436.2	667.5	---	---	71040.3	877.0	5.94	16.23	81.00	2.70

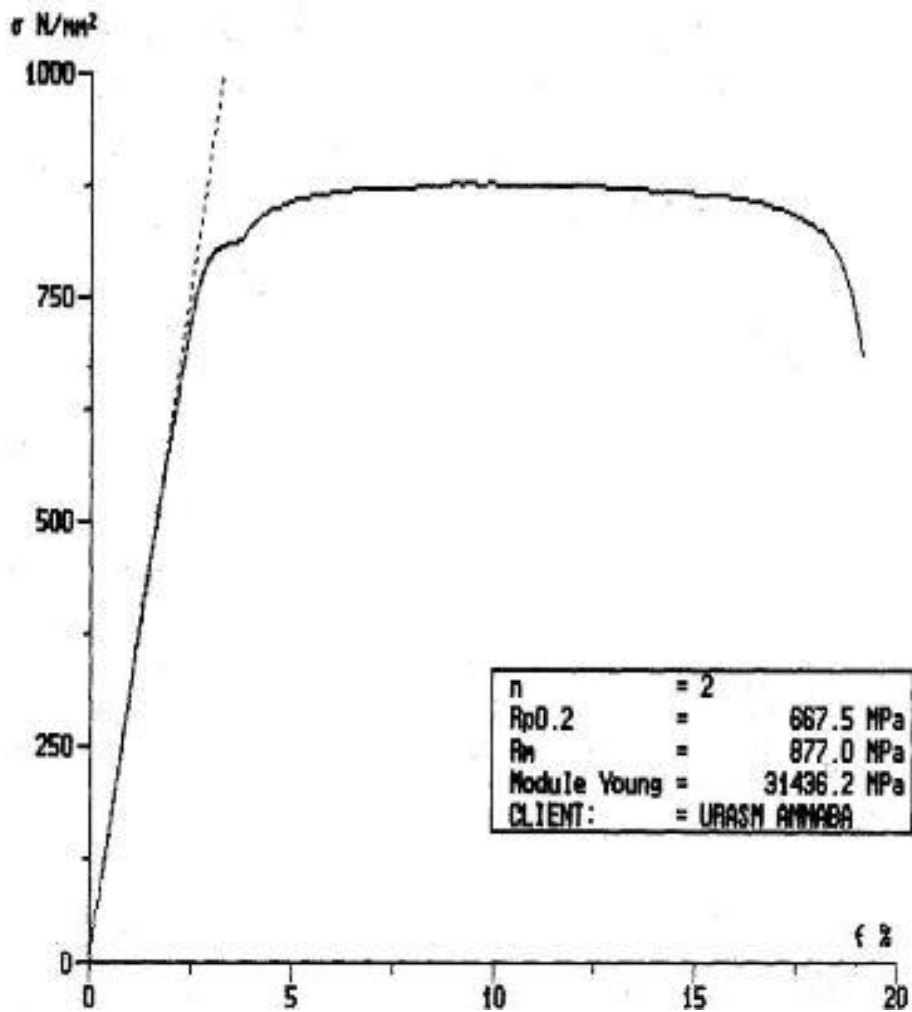


Figure IV-9 : Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°1

2) Essai N° 2

Pour la 2^{ème} éprouvette on choisira un point dans la zone élastique, et on laisse la force de traction constante (F= 36437 N) pendant deux heures, et prélève l'impédance et la résistance chaque 15 minute.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
1	---	---	---	---	36347.6	448.7	---	---	81.00	2.70

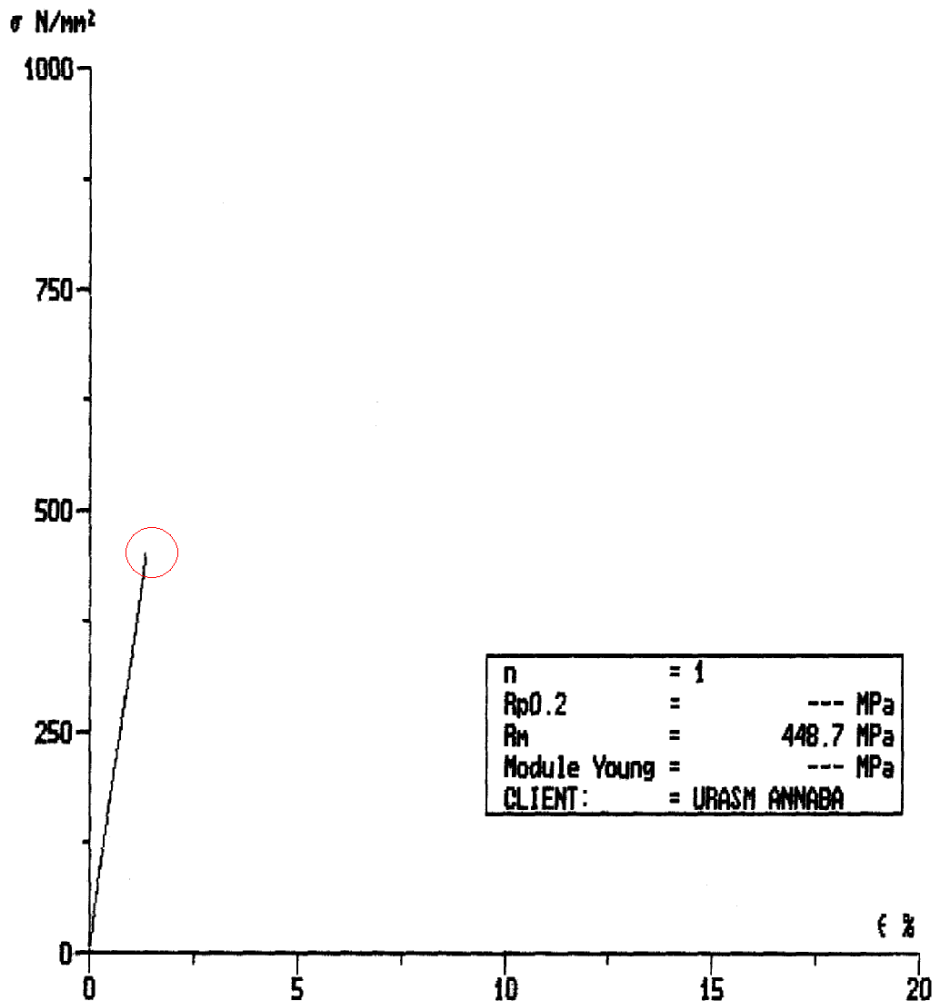


Figure IV-10 : Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°2

3) Essai N°3

Pour la 3^{ème} éprouvette on choisira un point qui se trouve dans la zone plastique, et on laisse la force de traction constante ($F \approx 60000$ N) pendant deux heures, et on prélève l'impédance et la résistance chaque 15 minutes.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	P-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
36	32683.5	848.7	---	---	85247.9	1052.4	4.35	7.28	81.00	2.70

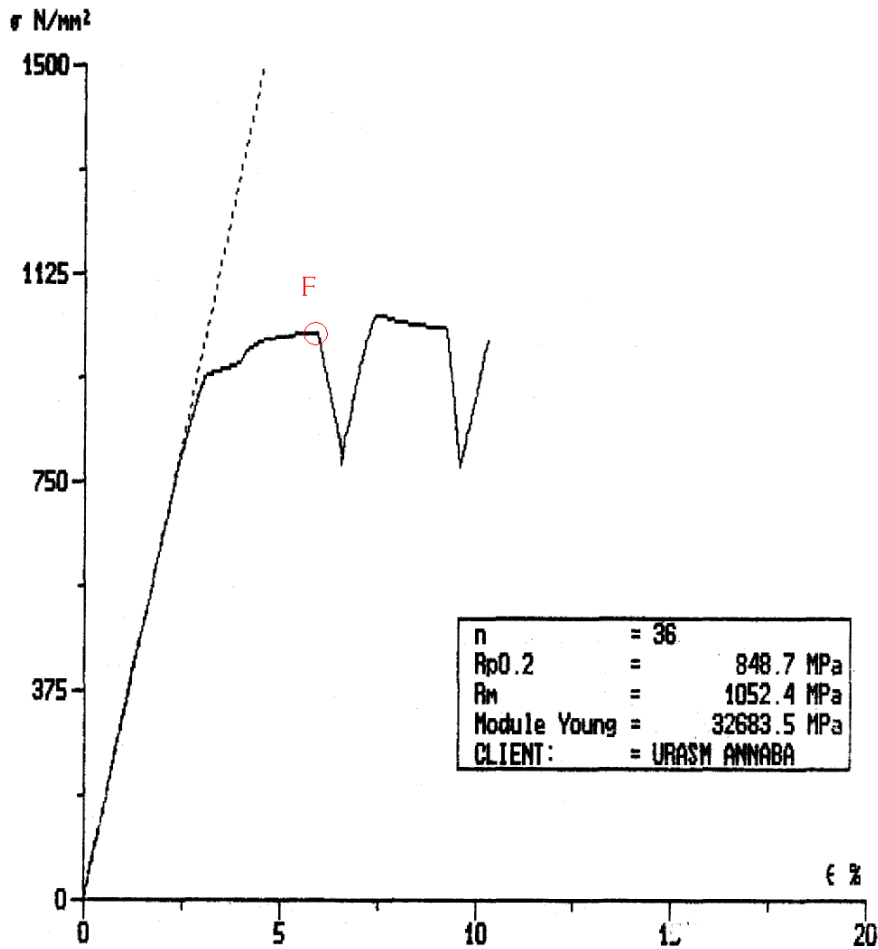


Figure IV-11 : Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°3

4) Essai N°4

Pour la 4^{ème} et dernière éprouvette on choisira deux points, le premier se trouve dans la zone plastique, et on laisse la force de traction constante ($F \approx 60000$ N) pendant deux heures, et on prélève l'impédance et la résistance chaque 15 minutes, et le deuxième se trouve dans la zone proche de la rupture, et on répète la même opération précédente.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
2	29290.3	828.1	---	---	78826.8	1006.7	6.28	---	78.30	2.70

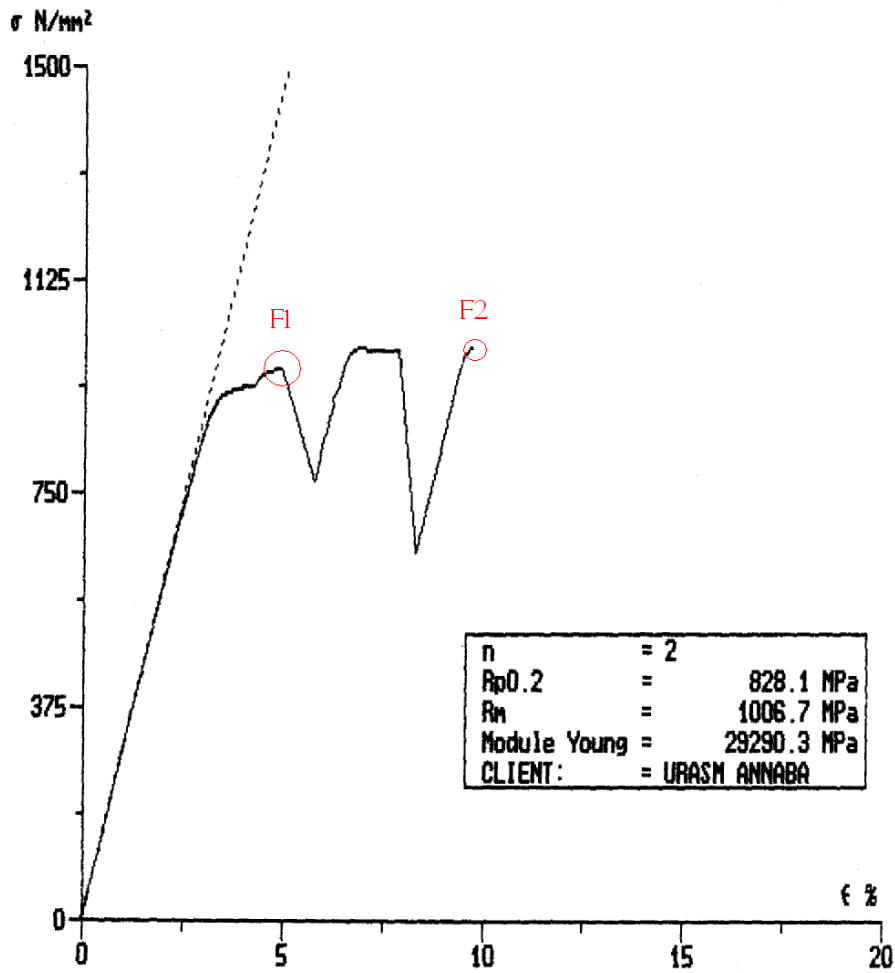


Figure IV-12 : Diagramme de traction pour l'éprouvette de Titane N°4

INTRODUCTION

L'interaction entre la contrainte et la microstructure provient du phénomène de magnéto-élasticité des matériaux à magnétostriction positive. Rappelons que cette propriété est le phénomène inverse de la magnétostriction. Si un matériau est soumis à une contrainte, la microstructure magnétique va se modifier dans le sens qui provoque, par magnétostriction, une déformation additive à celle induite par la contrainte (minimisation d'énergie). Par exemple une contrainte de traction provoque un allongement dans son propre sens et les domaines qui, par Les pièces réalisées ont été soumises à une procédure expérimentale définie de façon à obtenir différente modification de caractère mécanique dans le matériau. Nous avons choisi pour notre étude l'aluminium 2024 et le Titane Une analyse physico-chimique a été effectué pour déterminer les nuances des deux matériaux étudiés. Les échantillons utilisés sont de dimension $300 \times 40 \times 2,7 \text{ mm}^3$ pour le Titane et de $420 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$ pour l'Aluminium. Ils ont été prélevés sur la même tôle de façon à obtenir la même structure.

Les éprouvettes ont été découpées et ont été usinées en conformité avec la norme française NF EN 10002-1.

Ces éprouvettes ont été soumises à des contraintes de traction. Afin d'être dans des cas de forte sollicitation dans les zones critiques, nous avons voulu prendre deux charges pour l'Aluminium :

- Une charge supérieure à la limite d'élasticité (état 1) correspondant à F_1 .
- Une charge proche de la limite de rupture (état 2) correspondant à F_2 .

Et trois charges pour le titane :

- Une charge dans zone élastique (état 1) correspondant à F_1
- Une charge supérieure à la limite d'élasticité (état 2) correspondant à F_2 .
- Une charge proche de la limite de rupture (état 3) correspondant à $F_3 = F_1 + F_2$.

Ces forces seront appliquées pendant deux heures. Des mesures par des sondes à courant de Foucault, seront effectuées toutes les 15 minutes. Les systèmes d'acquisitions sont placés au niveau de la zone critique.

La commande et l'acquisition des données se fait par un PC relié par une interface IEEE 488. Des conditions optimales de travail doivent être prises en considération de façon à éviter des erreurs systématique ou d'expérience.

Procédure expérimental

- Échantillon soumis à une force F_1 pendant 2 heures avec des mesures par courant de Foucault toutes les 15 minutes par deux sondes.
- Échantillon soumis à une force F_2 pendant 2 heures avec des mesures par courant de Foucault toutes les 15 minutes par deux sondes
- Un autre échantillon soumis à la méthode dite « continue ». Elle consiste à appliquer la force F_1 pendant 2 heures, puis d'appliqué la force F_2 pendant 2 heures, d'une façon continue. Les acquisitions ont été effectuées pendant chaque charge, toutes les 15 minutes.

Dans le contrôle par courant de Foucault il est nécessaire de procéder à la caractérisation de la sonde suivant le cas étudié. Une étude de faisabilité dépend énormément de la sonde utilisée et du matériau à traiter. Dans ce travail, nous citerons uniquement le diagramme d'impédance (figure V-1.1 et V-1.2), car il résume en lui-même la stabilité des sondes utilisées. De plus il nous permet de déterminer la fréquence optimale permettant un

échange d'énergie maximale entre la sonde et le matériau et une profondeur de pénétration satisfaisante.

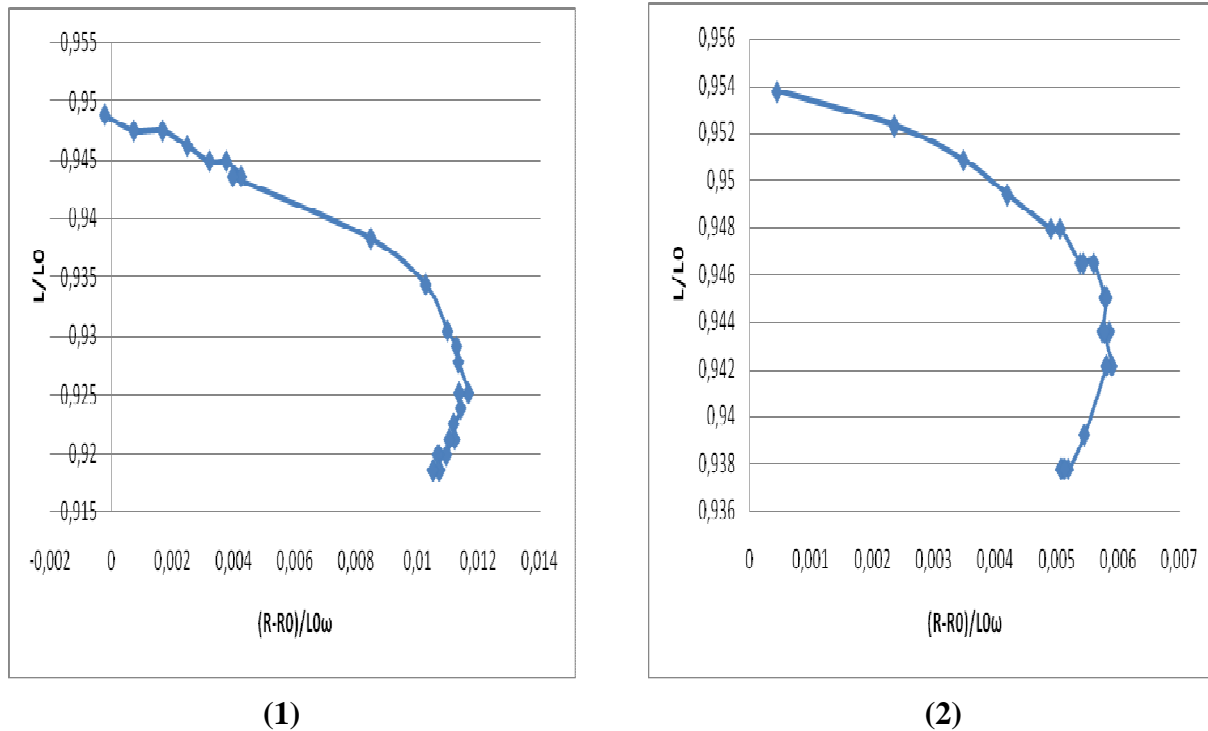


Figure V-1 : (1) Diagramme d'impédance pour l'aluminium 2024 (sonde 1)
 (2) Diagramme d'impédance pour l'aluminium 2024 (sonde 2)

V.1. ACQUISITION PAR COURANT DE FOUCAULT

Les mesures par courant de Foucault sont effectuées toutes les 15 minutes par deux sondes qui sont placées au niveau de la zone critique (Voir figure V-2).

La chaîne permettant la mesure par CF est constitué par un analyseur d'impédance de type (Agilent 4284A) (Voir figure V-2), relié à deux sondes. Ces sondes sont constituées de nombre de spire. Bobiné sur un support ferromagnétique de façon à augmenter notre champ électromagnétique d'excitation. La commande et l'acquisition des données se fait par un PC relié par une interface IEEE 488. Des conditions optimales de travail doivent être prises en considération de façon à éviter des erreurs systématique ou d'expérience.

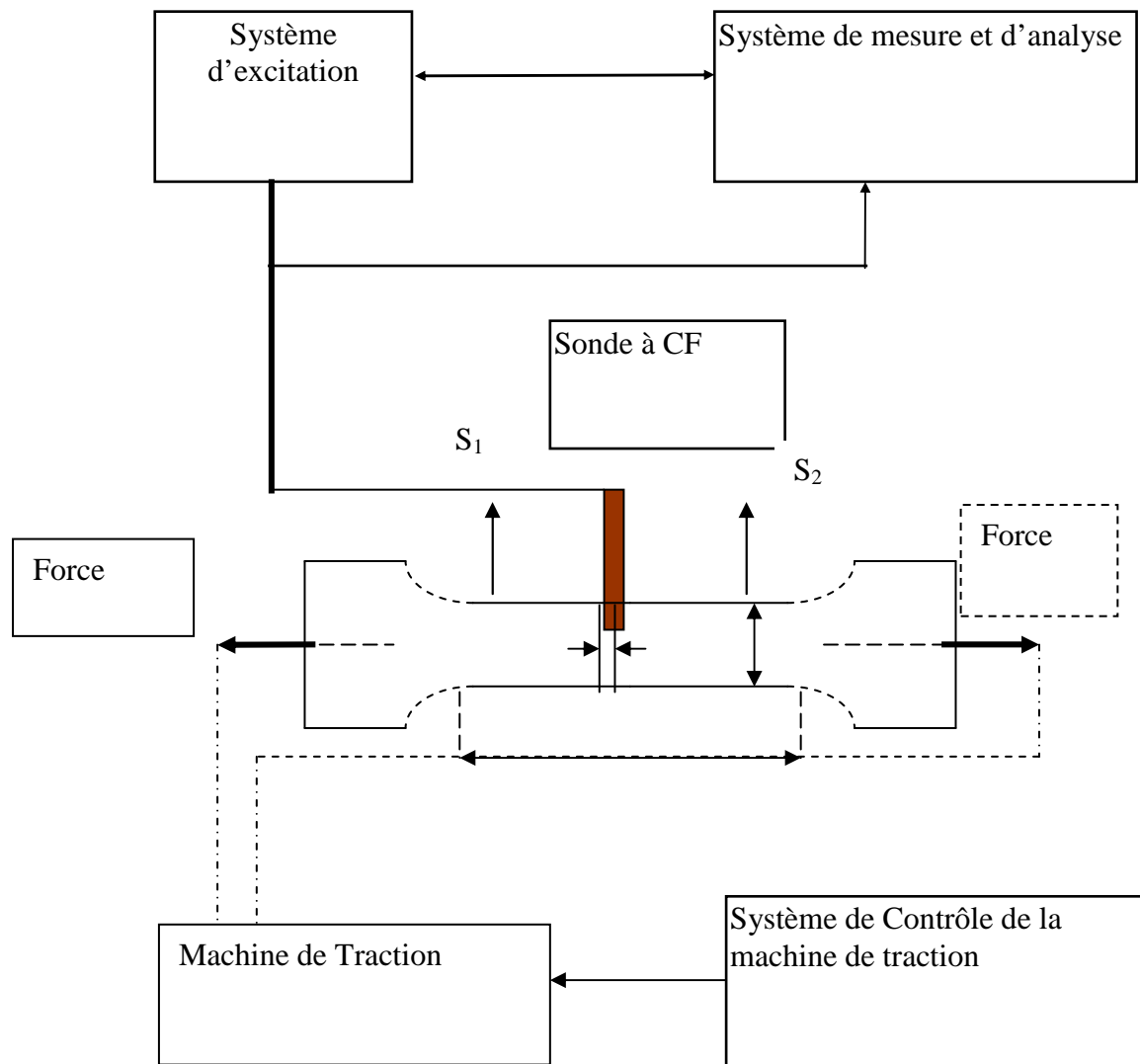


Figure V-2 : Principe du système de mesure (Traction et courants de Foucault)

Les étapes d'acquisition par courant de Foucault sont les suivants :

Un échantillon soumis à une force F_1 pendant 2 heures. Le même échantillon est soumis à la force F_2 pendant 2 heures. Cette force F_2 est appliquée continuellement.

Les acquisitions par courant de Foucault ont été effectuées pendant chaque charge, toutes les 15 minutes.

Dans le contrôle par courant de Foucault il est nécessaire de procéder à la caractérisation de la sonde suivant le cas étudié. Une étude de faisabilité dépend énormément de la sonde utilisée et du matériau à traiter.

Dans ce travail, nous citerons uniquement le diagramme d'impédance, car il résume en lui-même la stabilité des sondes utilisées. De plus il nous permet de déterminer la fréquence optimale permettant un échange d'énergie maximale entre la sonde et le matériau et une profondeur de pénétration satisfaisante.

V.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE :

1) Aluminium

- Un échantillon avec une charge appliqué dans le domaine plastique (état 2) correspondant à F_1 , puis dans la zone proche de la rupture (état 3) correspondant à F_3 , cette force F_2 est appliqué continuellement.

La force est appliquée d'une manière constante pendant 2 heures. Des mesures toutes les 15 minutes sont effectuées avec aussi les deux sondes déjà décrites précédemment.

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section S0 mm ²	D0 mm
19	22528.5	360.9	---	---	205700.2	489.8	35.16	39.69	420.00	10.00

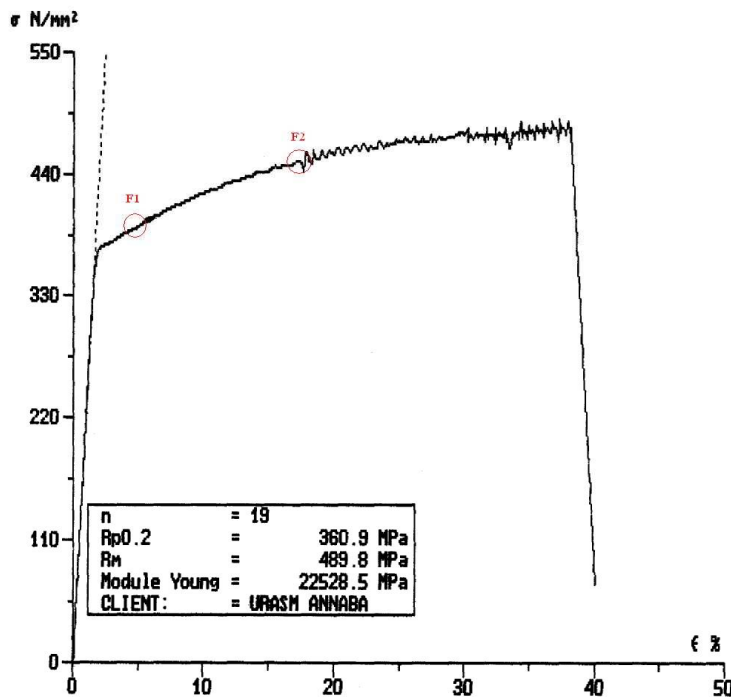


Figure V-3 : Courbe moyenne de traction uni-axiale (Aluminium 2024)

Avec :

$$F_1 \approx 165 \text{ KN}$$

$$F_2 = 186,45 \text{ KN}$$

2) Titane

De la même manière que pour l'aluminium, chaque échantillon est soumis à une force dans le domaine élastique, une autre situé dans le domaine plastique et une autre dans la zone proche de la rupture, de la manière suivante:

- Un échantillon avec une charge appliqué dans le domaine d'élasticité (état 1) correspondant à F_1 .
- Un échantillon avec une charge appliqué dans le domaine plastique (état 2) correspondant à F_2 .
- Un échantillon avec une charge appliqué dans la zone proche de la rupture (état 3) correspondant à F_3 .

- Un échantillon avec une charge appliquée dans le domaine plastique (état 2) correspondant à F_2 , puis dans la zone proche de la rupture (état 3) correspondant à F_3 , cette force F_3 est appliquée continuellement.

Les pièces réalisées ont été soumises à une procédure expérimentale définie de façon à obtenir différentes modifications de caractère mécanique dans le matériau. Ces éprouvettes ont été soumises à des contraintes de traction.

De la même manière que pour l'aluminium, et à partir de la courbe moyenne obtenue de traction, nous avons déterminé les forces F_1 , F_2 et F_3 , ces forces sont :

RESULTATS ESSAI :

n	Module Young MPa	Rp0.2 MPa	ReH MPa	ReL MPa	F-max N	Rm MPa	ag %	Agt %	Section SO mm ²	DO mm
2	31436.2	667.5	---	---	71040.3	877.0	5.94	16.33	81.00	2.70

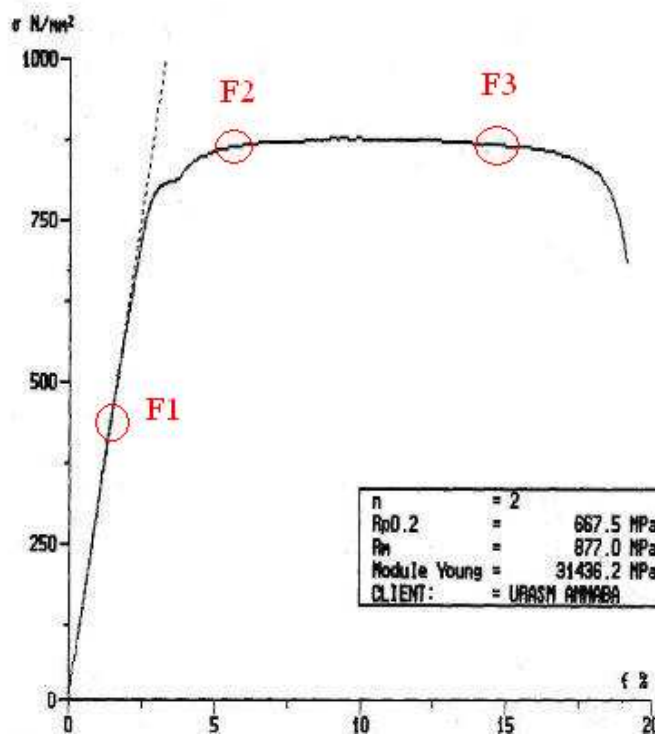


Figure V-4 : Courbe moyenne de traction uni-axiale (Titane)

Avec :
 $F_1 \approx 40$ KN
 $F_2 \approx 60$ KN
 $F_3 \approx 80$ KN

Ces forces seront appliquées pendant deux heures. Des mesures par des sondes à courant de Foucault seront effectuées toutes les 15 minutes au moyen de la chaîne de mesure par courants de Foucault réalisée (CF).

V.3.LES RESULTATS ET LES INTERPRETATIONS

V.3.1.L'Aluminium

En L'utilisation des courants de Foucault est très importante dans l'évaluation des microstructures. Nous allons étudier le comportement de l'impédance et de la phase sur les différentes sollicitations appliquées aux matériaux.

Le Diagramme d'impédance présente une grande instabilité pour F_1 et une variation aléatoire pour F_2 . (Voir Figures V-5 et Figures V-6)

En effet pour l'aluminium, pour une charge F_1 nous remarquons des oscillations pour chaque pas de mesure avec une augmentation de l'impédance vers les temps de sollicitations plus élevés (Voir Figures V-13). Pour une charge située juste avant la rupture ; les oscillations sont plus prononcées avec une impédance plus élevée. Des pics d'amplitude sont enregistrés à 60 minutes pour la charge F_1 et une stabilité est observée pour la charge F_2 . Cela confirme la présence de mouvement électromagnétique au sein du matériau contrôlé, ces mouvements provoquent des amplitudes assez importantes qui peuvent être due à des dislocations, ou à l'agitation dans la structure par exemple. (Voir Figure V-14)

Afin d'être dans les mêmes conditions de comparaison les résultats obtenus pour le contrôle de la partie continue se fera d'une manière indépendante, c'est à-dire l'échantillon est soumis à une première charge pendant deux heures et le même échantillon subit la deuxième charge proche de la rupture pendant deux autres heures.

Nous remarquons que les oscillations ne sont pas régulières, et que chaque échantillon donne une réponse différente en amplitude et en position.

Cela est confirmé par la méthode continue, en effet la charge F_2 est approximativement la même alors que les échantillons sont différentes, nous remarquons la présence d'oscillation d'amplitude différentes entre les deux échantillons. Cela peut être dû à des mouvements électromagnétiques différents. (Voir Figure V-13 et figure V-14)

V.3.2.Titane

Du Diagramme d'impédance la première remarque par rapport à l'aluminium est la régularité des trajectoires et donc la stabilité du titane.

Le traitement des résultats obtenus par courants de Foucault sur les échantillons montre que pour la charge F_1 des oscillations avec un pic d'amplitude à 60 minutes. Une stabilité de l'impédance avec de faibles oscillations est perçue pour la charge F_2 , l'impédance diminue contrairement à la charge F_1 , les oscillations sont plus importantes et d'amplitude élevée. (Voir Figure V-7 et figure V-8)

Cela s'explique par les mouvements électromagnétiques, qui sont plus importants dans ce cas. La charge appliquée F_2 provoque des mouvements dans la microstructure qui se modifie la conductibilité des matériaux sollicités. Cela ne peut s'expliquer que par la dureté du matériau et donc les sollicitations et donc l'agitation microstructurale est très difficile. (Voir Figure V-9)

La méthode continue confirme la conclusion citée pour l'aluminium, à savoir que les mouvements électromagnétiques sont aléatoires et que la contrainte interne subie par les sollicitations répondant différemment d'un échantillon à un autre sans pour autant différencier dans le fond. Nous remarquons que deux positions de sondes et pour la même charge les résultats de l'impédance obtenus sont différents sans pour autant changer le fond. Une stabilité est perçue au-delà de ce temps. (Voir Figure V-12)

Nous remarquons que pour des charges très élevés, le mouvement s'accélèrent et donc l'agitation microstructurale et donc l'impédance. Cela ne peut être causé que par des contraintes internes subites par les sollicitations de traction.

Aluminium

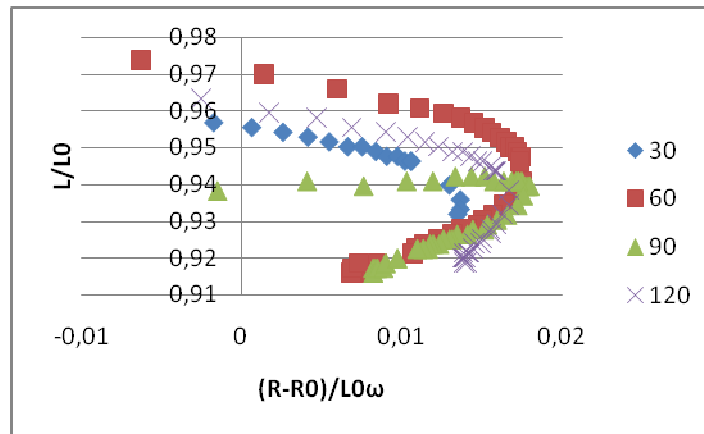


Figure V-5 : Graphe d'impédance avec $F_1 \approx 160$ KN

Zone proche de la rupture

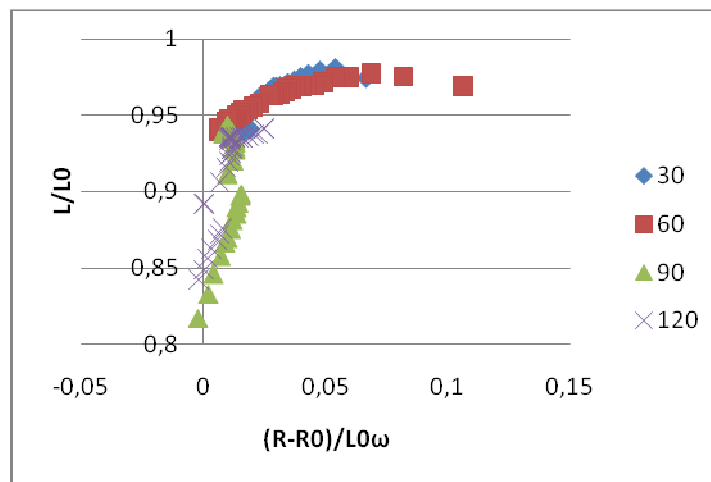


Figure V-6 : Graphe d'impédance avec $F_2 = 186445,3$ N

Titane

Zone élastique

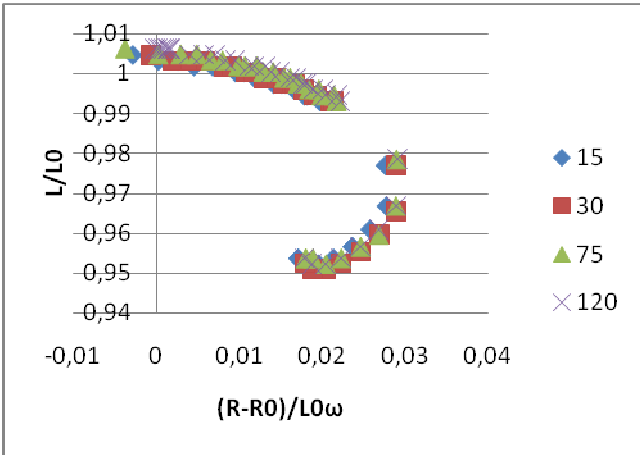


Figure V-7 : Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°1 avec $F_1=36347,6$ N

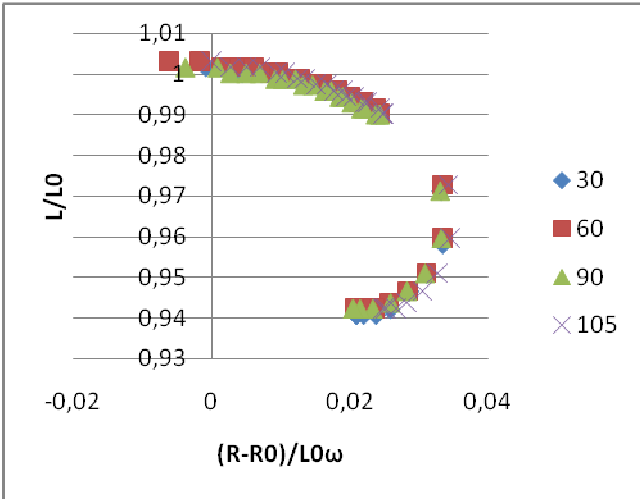


Figure V-8 : Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°3 avec $F_1=45451,7$ N

Zone plastique

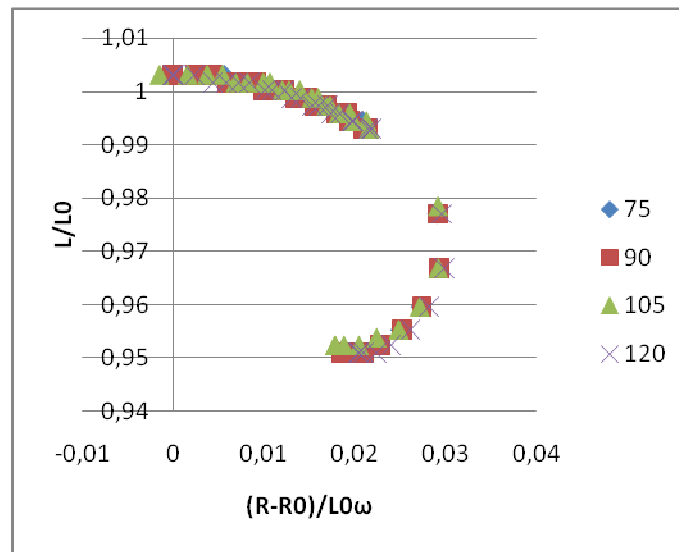


Figure V-9 : Graphe d'impédance pour Eprouvette N°2

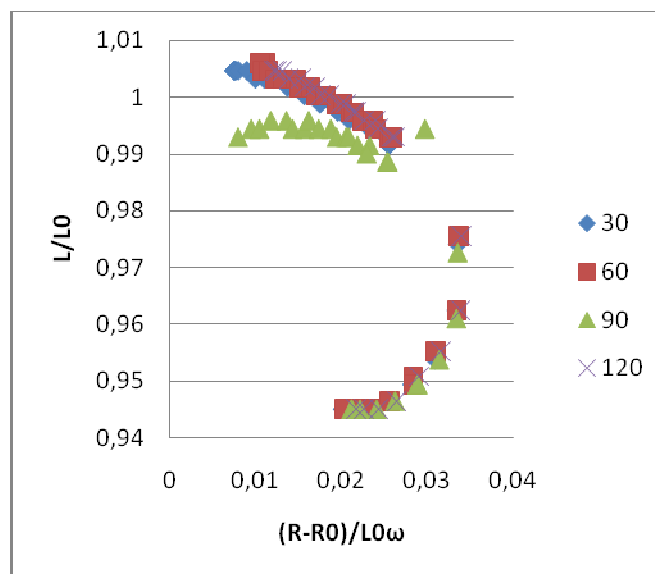


Figure V-10 : Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°3 avec $F_2 \approx 75000$ N

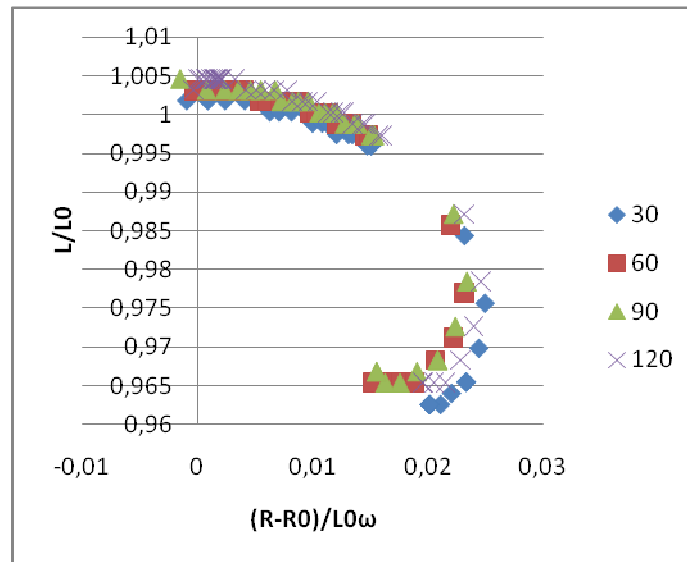


Figure V-11 : Graphe d'impédance pour l'éprouvette N°4 avec $F_2 \approx 70000$ N

Zone proche de la rupture

sonde 01

sonde 02

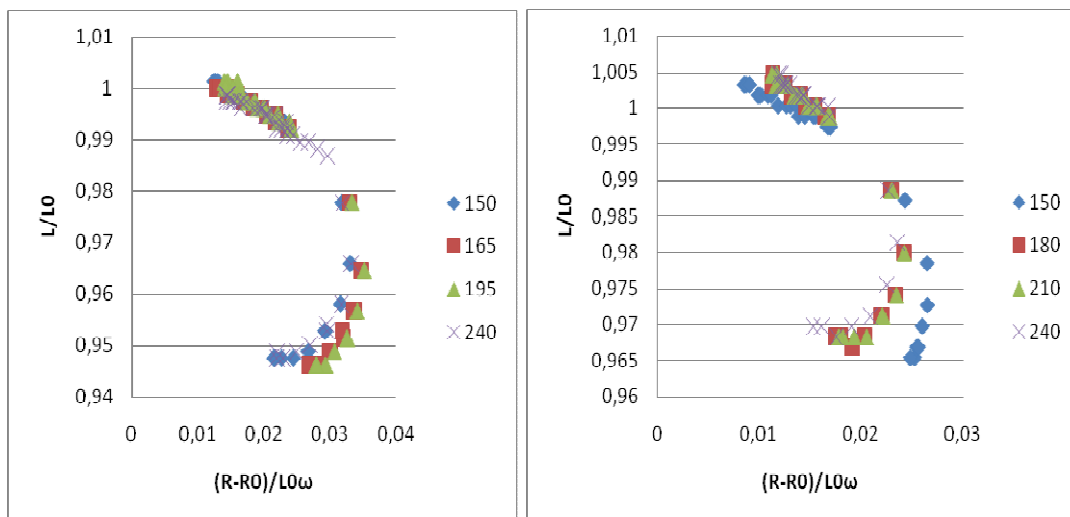


Figure V-12 : Graphe d'impédance pour Eprouvette N°4 avec $F_3 = (F_1 + F_2) = 78826,8$ N

Aluminium 2024

Zone plastique

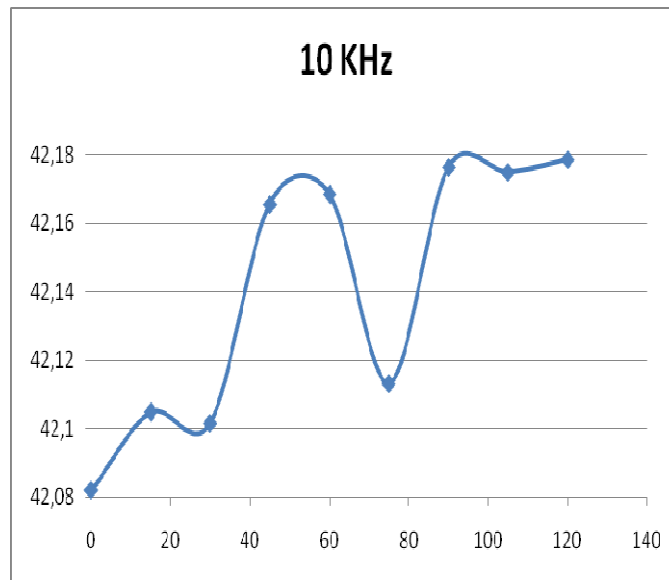


Figure V-13 : Courbe Z=f(t)

Zone proche de la rupture

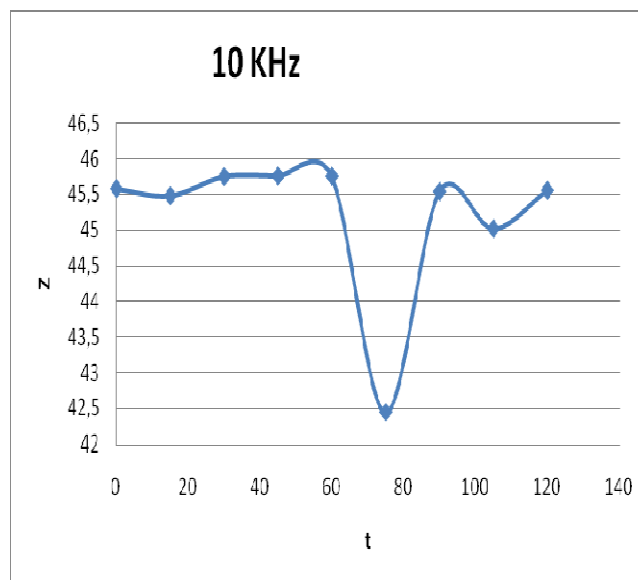


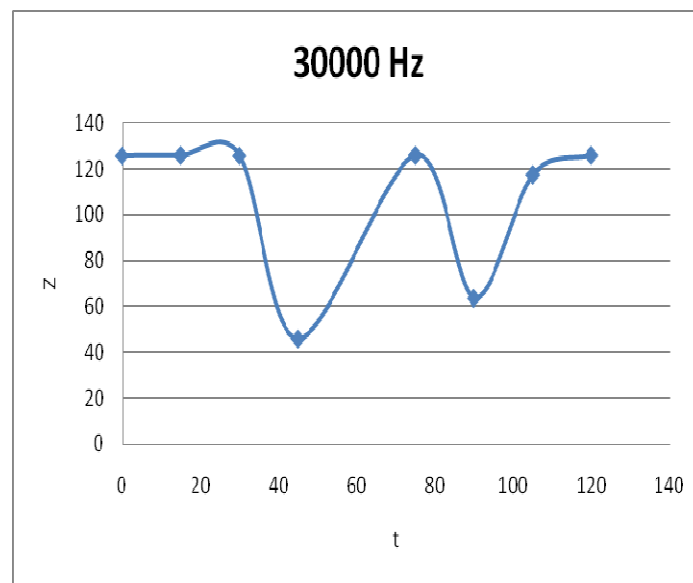
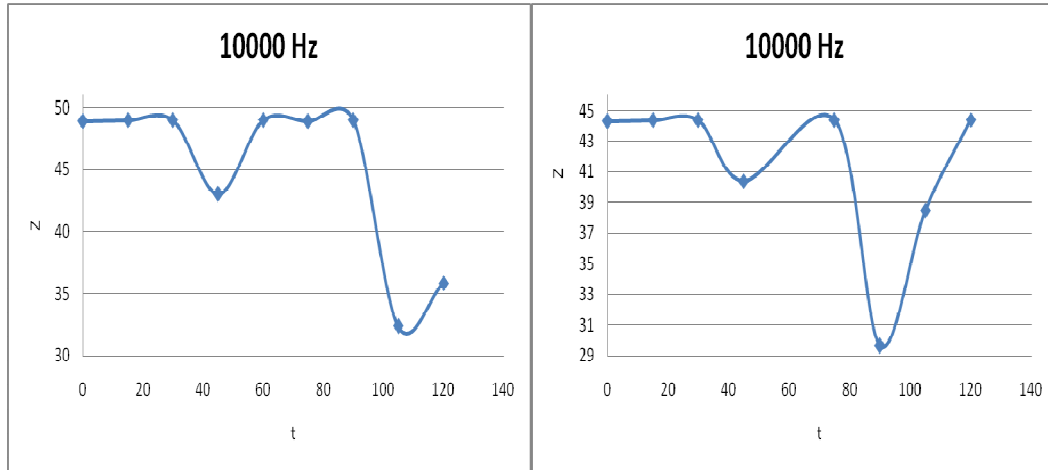
Figure V-14 : Courbe Z=f(t)

TITANE

Zone élastique

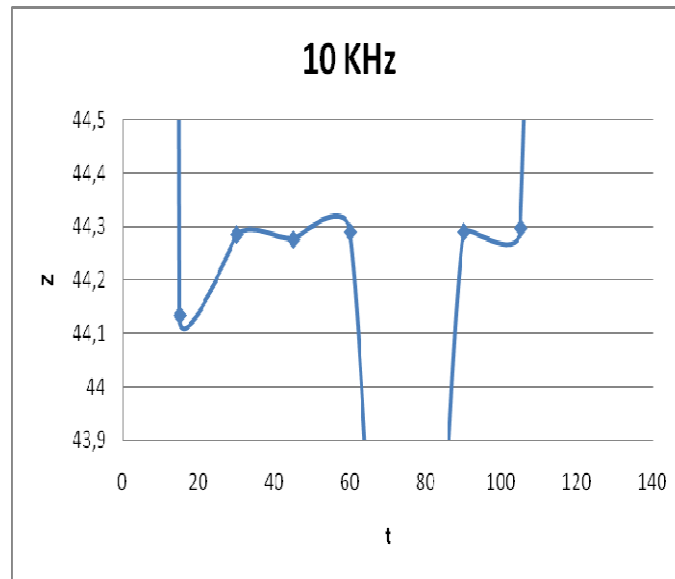
Sonde 1

sonde 2



Éprouvette n°1 F1=36437 N

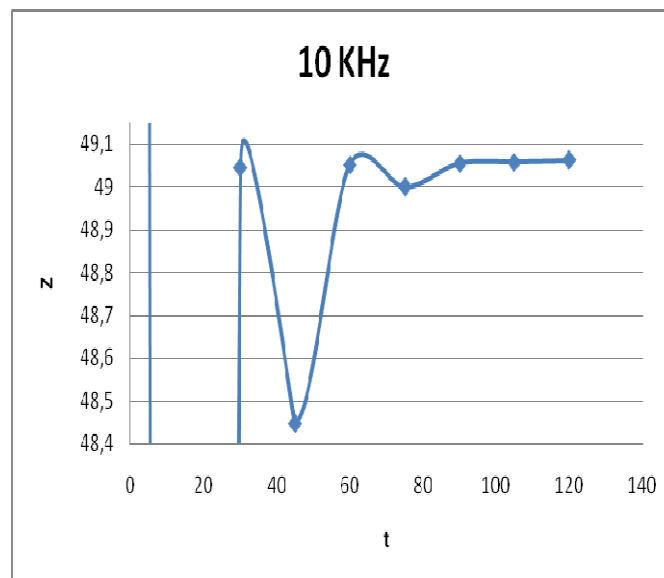
Figure V-15 : Courbe Z=f(t)



Éprouvette n°3 F1=45451,7 N

Figure V-16 : Courbe Z=f(t)

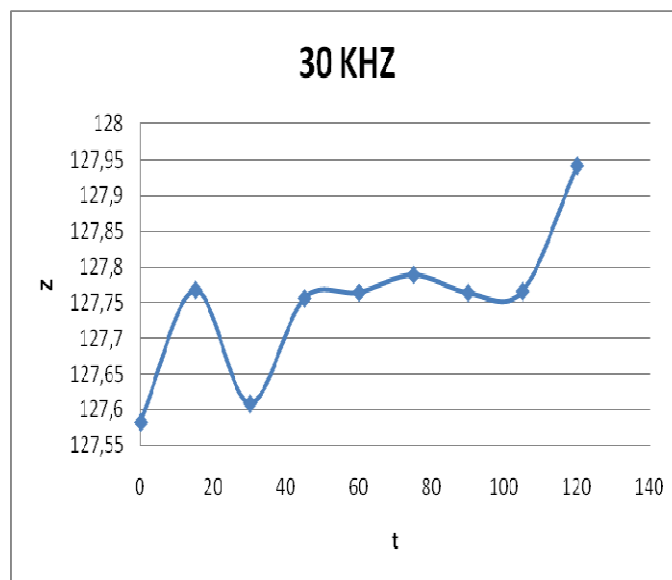
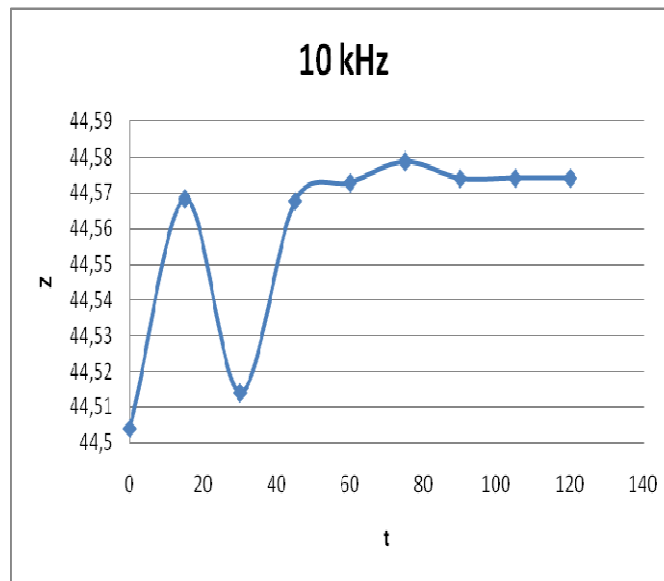
Zone plastique



Éprouvette n°2 F≈60000 N

Figure V-17 : Courbe Z=f(t)

Zone proche de la rupture



Éprouvette n°4 F3=78826,8 N

Figure V-18 : Courbe Z=f(t)

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.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J.BARRALIS, G.MAEDER**
Précis de métallurgie 5^{eme} édition 1990
Elaboration, structures-propriétés et normalisation
- [2] **BAILON.J.P, DORLOT J.M**
Des matériaux troisième édition
Presse internationales polytechnique
- [3] **Jacques DUMONT-FILLON 2000**
Ingénieur de l'École Centrale de Paris
Contrôle non destructif (CND)
Techniques de l'Ingénieur R 1 400 – 1
- [4] **Roger DEVELAY 2000**
Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés
Techniques de l'Ingénieur M 440
- [5] **Yves COMBRES 1999**
Propriétés du titane et de ses alliages
Techniques de l'Ingénieur M 557
- [6] **TOUIMER Amina 2006/2007**
Détermination des contraintes par les méthodes de contrôle non destructif
dans les matériaux
Mémoire d'ingénierie, université Saad Dahleb BLIDA.
- [7] **MEKHLOUF Sarah 2007**
Caractérisation des contraintes dans les matériaux par des procédés
magnétiques.
Mémoire de Magistère, université Saad Dahleb BLIDA.

BIBLIOGRAPHIE

[8] **Bailon J.B, Dorolt J.M**

« Matériaux », Presse Internationales Polytechnique.
Troisième édition 2000

Site d'internet :

- www.techniques-ingenieur.fr
- www.sciencedirect.com