

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université SAAD DAHLEB, BLIDA
Département d'aéronautique

MEMOIRE

Présenté par :

CHERIEF AMINA



En vue de l'obtention
Du DIPLOME d'INGÉNIEUR en AERONAUTIQUE
Option : structure

THEME

**Détermination des contraintes mécaniques
(traction) par la méthode des courants de
Foucault.**

Promoteur :

Monsieur Zergoug Mourad

Copromotrice :

Madame Kamel Ghania

Soutenue le 25 Septembre 2005.



Remerciements

Je remercie le bon dieu, le tout puissant de m'avoir donner la volonté pour faire ce bon travail.

Je remercie bien vivement mon promoteur monsieur Zergoug Mourad de m'avoir encouragé et m'a donné l'espoir de faire un bon travail, de m'avoir bien dirigé, de ces conseils, et m'a soutenu tout le long du stage.

Je remercie Mme Kamel Ghania qui m'a aidé et supporté durant toute l'année.

Je remercie aussi monsieur Humouda Amirouche qui était à mes côtés durant les expériences du projet.

J'exprime aussi mes vifs remerciements au membre de jury.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi au personnel du C.S.C en particulier à

Mr Mebrek Smain et Nacer, qui m'ont aidé le long de ce travail, sans oublier Hayet.

Je remercie bien vivement monsieur Maaza Halim, qui m'a accepté de réaliser les essais dans l'atelier mécanique du centre de recherche.

J'exprime aussi mes vifs remerciement au personnel de l'atelier mécanique de Blida, en particulier, Mr Hakim, à Karim d'Air Algérie, et surtout à Mustapha qui m'a encouragé, conseillé et aidé durant toute l'année.

Sans oublier tous les amis (es) de l'université de Blida.





Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

Mon défunt papa que je regrette qu'il n'est pas parmi nous pour me féliciter.

Ma très chère maman pour son encouragement et ces bons conseils précieux.

Mes frères : Adem, Ayoub, Abdelatif, Yaoumes et Yacine.

Particulièrement à Mr Zergoug Mourad et Mme Kamel Ghania sans oublier toute l'équipe du C.S.C, à Amirouche, Smain, Nacer, Idrix, Mr Haddad et sa femme, Warda et Rawda, et surtout à Hayet, que tous ceux que j'ai oublié, m'excusent.

Je le dédie également à tout mes amis (es) surtout à Mr Soileh qui m'a aidé.



ملخص:

المراقبة بتقنية تيارات فوكولت هي طريقة تستعمل بكثرة في مجال الكشف بالتقنية الغير متلفة للمعادن القابلة للناقلية.

هذه التقنية تمكنتنا أيضاً من إيجاد بعض الخصائص الابعاد و اكتشاف العيوب.

هذه التقنية نستعملها في الكثير من المجالات كدراسة المعادن.

الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد علاقة بين الطرق الغير المتلفة عن طريق تيارات فوكولت و الطرق المتلفة عن طريق الجذب.

Résumé :

Le contrôle par Courants de Foucault est une technique très utilisée en contrôle et évaluation non destructifs des matériaux. Il permet aussi les mesures de certaines propriétés, de dimensions et la détection d'anomalies.

Ce procédé trouve des applications dans des domaines métallurgiques

Notre but est de trouver une relation entre les méthodes non destructives par la méthode des courant de Foucault et les méthodes destructif par la méthode de traction.

Abstract:

Eddy current are very used in materials controls and no destructive evaluation. It allows the measurement of certain properties, dimension and detection of anomalies.

This process finds also applications in metallurgical.

Our objectif is to find the relation between the destructive methods by the application of the eddy curenets and the methods destructive by the method of traction.

Chapitre III :	L'essai de traction	20
	Introduction	20
	III.1. Définition	20
	III.2. Eprouvettes	20
	III.3. Diagramme de traction	20
	III.4. Déformation rationnelle	23
PROCEDURES EXPERIMENTALES		
Chapitre IV :	Etude et réalisation des sondes	25
	Introduction	25
	IV.1. Mesure de l'impédance de la sonde	25
	IV.2. Critère de choix de la sonde	27
	IV.3. Réalisation des sondes	28
Chapitre V :	Réalisation des essais	36
	Introduction	36
	V.1. Choix du métal	36
	V.2. Réalisation des éprouvettes	36
	V.3. Les essais de traction	37
	V.3.1. Synoptique du système de mesure	38
	V.3.2. Description de la machine de traction	38
	V.3.3. Présentation de l'appareil utilisée	39
	V.3.4. Description des essais	40
Chapitre VI :	Résultats et interprétations	47
	Introduction	47
	VI.1. Résultats des essais	48
	VI.2. Commentaires et interprétation	78
	VI.3. Caractéristiques classiques	81

Conclusion Générale	82
Bibliographie	83
Annexe	84

Liste des Symboles

Symbole	Désignation
A	Déformation après rupture
A_R	Déformation répartie
D	Diamètre de la sonde
e	Épaisseur du matériau
E	Module de Young
f	Fréquence
F	Force
F_e	Force élastique
F_m	Force maximale
I	Courant
J_0	Densité du courant de surface
ℓ_c	Longueur calibrée
ℓ_0	Longueur initiale
L	Inductance
N	Nombre de spires
P	Charge
R	Résistance
R_c	Rayon moyen du bobinage
R_D	Rayon externe
R_m	Résistance à la traction
R_e	Limite d'élasticité
R_{el}	Limite inférieure d'écoulement
R_{eff}	Limite supérieure d'écoulement
S	Section d'échantillon
S_0	Section initiale du matériau
V	Tension aux bornes de la bobine
Z	Impédance
$\Delta\ell$	Allongement
η	Coefficient de remplissage
σ_{elec}	Conductivité
σ	Contrainte mécanique
ε	Déformation nominale
μ	Perméabilité
μ_0	Perméabilité à vide
μ_r	Perméabilité relative
θ	Phase
δ	Profondeur de pénétration standard
ω	Pulsation
ρ	Résistivité électrique

Introduction

INTRODUCTION :

Dans la plupart des domaines de la technologie moderne, les perfectionnements dans le rendement et la rentabilité des systèmes sont souvent limités par les propriétés des matériaux disponibles. Il est tout à fait exceptionnel qu'au moyen d'un seul type de mesure on puisse caractériser un matériau, il faut toujours prévoir un ensemble de technique complémentaire pour parvenir vers une connaissance approfondie d'une propriété donnée.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à utiliser des matériaux qui sont très utilisés dans l'industrie aéronautique (Airbus et Boeing principalement). Les alliages d'Aluminium et d'Acier inoxydable austénitique.

Les contraintes et les sollicitations que subit la série d'alliage 2000 et 7000 et l'acier 304-L durant les vols répétés des avions, modifient leur microstructure et par suite leurs propriétés mécaniques.

Les modèles destructifs très coûteux, nécessitent des temps importants. Le contrôle par courants de Foucault offre alors une solution qui consiste à pratiquer un contrôle simple et dont l'analyse des matériaux permet d'avoir un gain économique et temporel (sans détruire le matériau).

Les courants de Foucault sont souvent utilisés pour résoudre les problèmes très complexes dans l'aérospatiale tel que la détection des dommages occasionnés en service, comme les crânes de fatigue qui résultent du chargement répété pendant le vol, le décollage et l'atterrissage.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche qui a pour objectif de faire une étude comparative entre une méthode non destructive (utilisant les courants de Foucault) et l'autre destructive (utilisant la traction) afin de déterminer les caractéristiques mécaniques.

Le travail effectué principalement au niveau du laboratoire d'électronique et d'électrotechnique du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle C.S.C de Cheraga est décrit dans notre manuscrit en six chapitres essentiels qui sont réparties en deux parties :

La première partie contient trois chapitres:

Le premier chapitre présente la technique de contrôle non destructif, à savoir la chaîne de mesure et les différents paramètres influant.

Nous verrons en particulier dans le deuxième chapitre certaines propriétés des alliages d'aluminium 2024, 7075 et l'acier inoxydable austénitique 304-L, surtout leurs caractéristiques, composition chimique et les additions diverses.

On citera dans le troisième chapitre l'essai qu'on a utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (l'essai de traction), en représentant la courbe de traction et les différentes définitions.

Pour la deuxième partie :

Le quatrième chapitre décrit un paramètre important dans le contrôle, à savoir la sonde à courant de Foucault où il est nécessaire de souligner que le succès d'une recherche de faisabilité dépend en grande partie de la bonne définition de ces capteurs de mesure.

En effet la sensibilité aux défauts, la précision de la détection et de la mesure dépend de sa conception.

Le cinquième chapitre cite les moyens misent en œuvre ainsi que les procédés expérimentaux ayant servi à notre étude à savoir la préparation des échantillons de différentes natures.

Le dernier chapitre présente les résultats des essais et les observations obtenues.

PARTIE I

Etude bibliographique

CHAPITRE I

Généralités (courant de Foucault)

INTRODUCTION :

Le contrôle par courants de Foucault est une technique très utilisée en contrôle et évaluation non destructif des matériaux. Cette technique est sollicitée pour résoudre des problèmes très complexes dans le nucléaire, l'aérospatiale et la construction navale, dans des conditions extrêmes de pression, température ou une haute précision est exigée. De même que les autres techniques non destructives, le contrôle par courants de Foucault permet la mesure de certaines propriétés de matériaux, de dimensions et la détection d'anomalies.

I.1 DEFINITION:

Les courants de Foucault sont les courants induits dans un matériau conducteur en présence d'un champ magnétique variable [18][22].

Les courants de Foucault suivent des trajectoires fermées, perpendiculaires aux flux magnétique et parallèles à la surface, et aux spires de la bobine. (Figure .I.1).

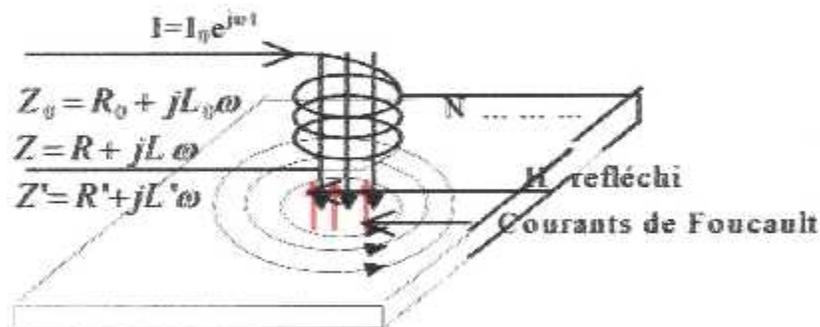


Figure (I.1)

De leurs parts ces courants produisent un champ magnétique qui s'oppose au champ d'excitation (champ induit) ce qui donne une variation de l'impédance de la bobine [18].

L'interprétation des résultats par la méthode des courants de Foucault peut être obtenue indirectement en connaissant la valeur de l'impédance Z à tout moment du contrôle à l'aide d'un capteur [4][6].

Un capteur à courant de Foucault sans la présence d'un échantillon à contrôler possède une valeur Z_0 (à vide), tel que les parties inductives et résistives sont successivement L_0 et R_0 . Lors de la présence d'un échantillon cette impédance devient Z_1 dont la partie inductive est L_1 et la partie résistive est R_1 ; après on trace la variation de la partie réactive en fonction de la partie active (figure I2).

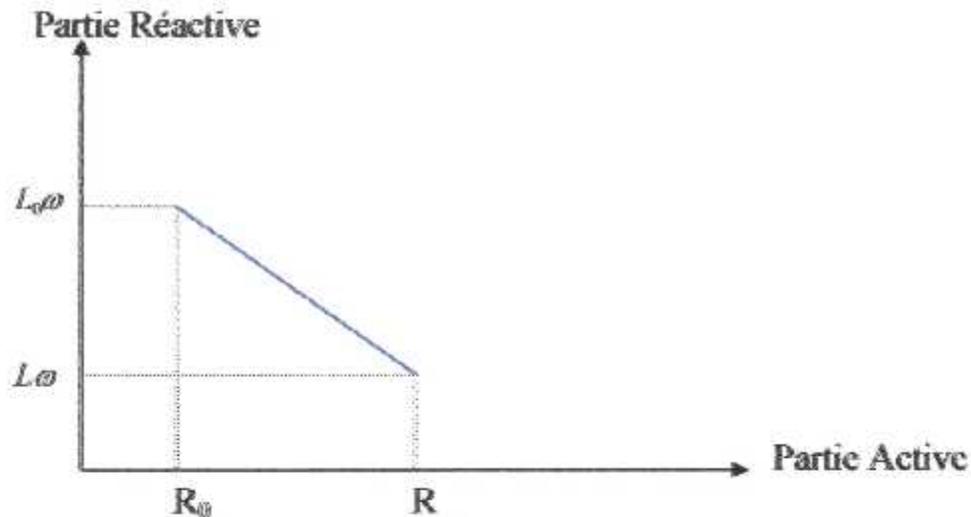


Figure (L2)

Les courants de Foucault dépendent de paramètres suivants :

1. Les caractéristiques du matériau (conductivité, perméabilité, fréquence à utiliser).
2. Le couplage entre l'échantillon et le capteur.
3. Le défaut dans le matériau.

I.2 RÉPARTITION DES COURANTS DE FOUCAULT :

La répartition des courants de Foucault dépend de la structure (la perméabilité , la conductivité , la géométrie ETC) . Donc pour toute anomalie dans le matériau (présence d'un défaut , fissures ETC) entraîne un changement du parcours et de l'intensité des courants de Foucault , et la variation du flux dans le capteur entraîne une variation d'impédance du celui-ci .

A. Cas des matériaux non ferromagnétiques :

Pour les matériaux non ferromagnétiques la composante inductive diminue, la circulation des courants induits dissipe par effet Joule une énergie électrique [1][4][6].

B. Cas des matériaux ferromagnétiques :

Pour les matériaux ferromagnétiques, et lorsque l'échantillon n'est pas saturé, la composante inductive et la composante résistive augmente, la pénétration de profondeur diminue.

Et pour un échantillon saturé, la perméabilité relative tend vers l'unité, les courants induits se comportent de la même façon que pour un matériau non ferromagnétique [4][6].

❖ Cas d'un plan :

La variation du courant dans le matériau en fonction de profondeur (Figure I.3) est exponentielle suivant la relation suivante :

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-\beta x} \sin(\omega t - \beta) \dots\dots\dots(I.1)$$

Tel que :

$e^{-\beta} = e^{-x/\delta}$: Décroissance exponentiel des courants induits avec la profondeur.

$\sin(\omega t - \frac{x}{\delta})$: La rotation de phase du segment avec la profondeur.

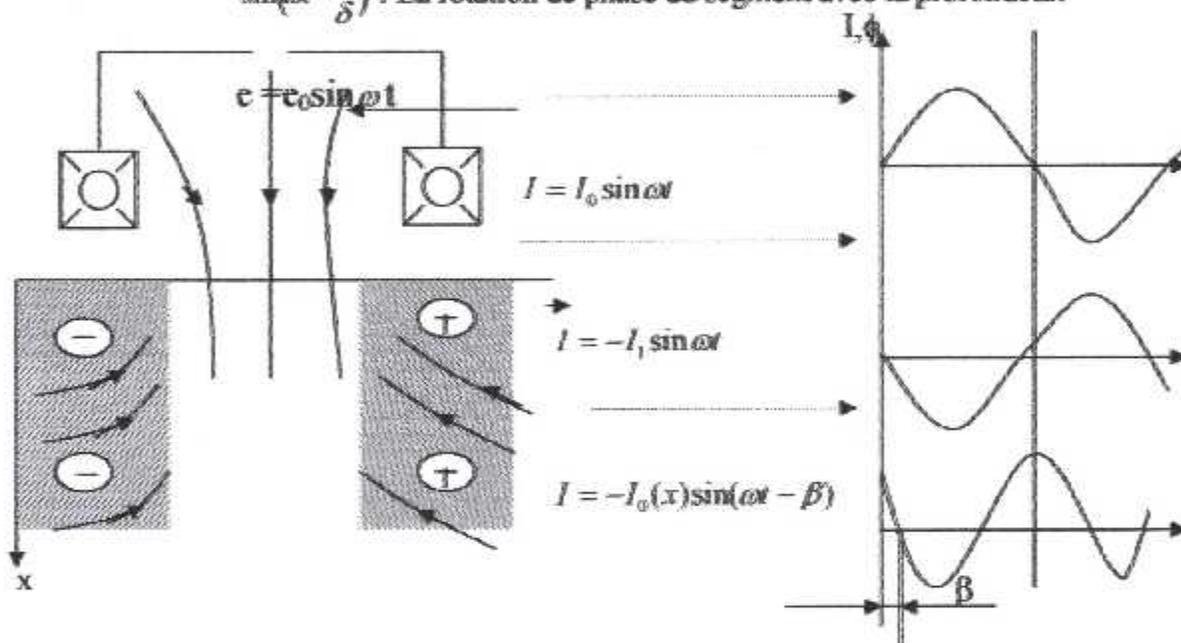


Figure (I.3) Courant de Foucault induit dans un matériau.

➤ La profondeur de pénétration standard :

La profondeur de pénétration standard ' δ ' est la profondeur pour laquelle l'amplitude du courant diminue dans le rapport $1/e$ ou 37% de la densité du courant de surface. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$J_0 / j_0 e^{-x/\delta} = \frac{1}{e} \dots\dots\dots(I.2).$$

j_0 : densité du courant de surface.

La pénétration de profondeur diminue lorsque la perméabilité, la conductivité ou la fréquence augmente, dans ce cas les courants circulent de plus en plus en surface ; ce phénomène s'appelle « effet de peau » [5].

La profondeur de pénétration standard est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu f}} \dots\dots\dots (I.3)$$

- $\omega = 2\pi f$
- f : La fréquence du travail.
- μ : La perméabilité.
- σ : La conductivité.
- ω : La pulsation.

La sensibilité de la détection des défauts dépend de ce paramètre.
 En réalité la pénétration des courants de Foucault est plus importante que la profondeur standard.

A une profondeur égale à deux fois la profondeur standard (2δ) la densité des courants de Foucault chute de $(1/e)^2$ ou de 13.5% de la densité à la surface. Et à trois fois la profondeur standard (3δ) la valeur de la densité est inférieure à 5%.

Afin de négliger l'influence d'épaisseur du matériau, il faut choisir la fréquence du travail telle qu'elle est déterminée pour des épaisseurs supérieures à (3δ) . (Figure I.4)

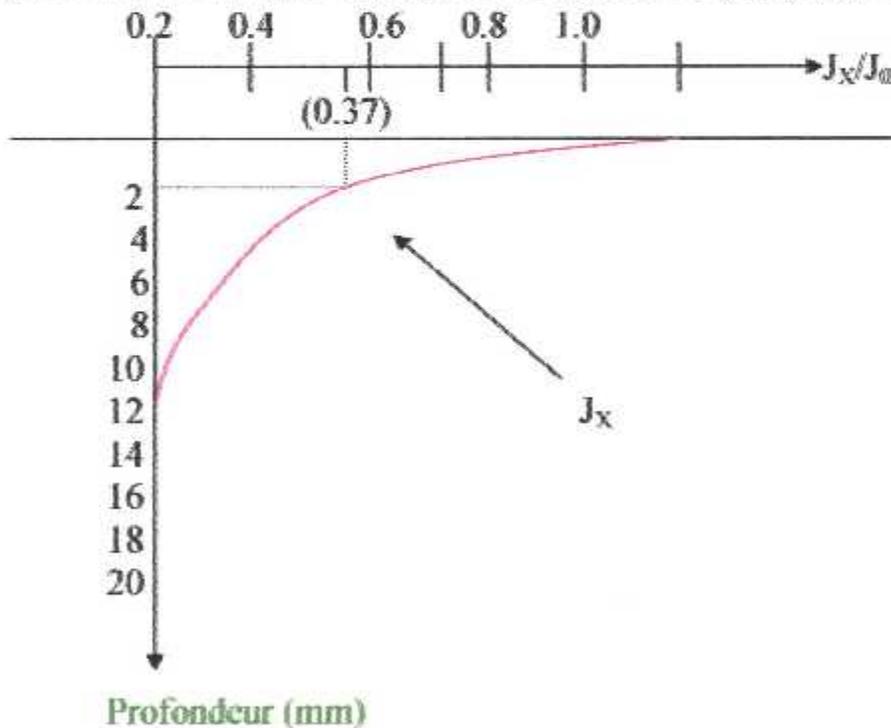


Figure (I.4) La profondeur de pénétration des courants de Foucault.

I.3 DIAGRAMME D'IMPEDANCE:

I.3.1 Construction de diagramme d'impédance :

Le but du diagramme d'impédance c'est l'utilisation pour l'interprétation des résultats obtenues lors du contrôle non destructif par courants de Foucault, aussi il a le rôle de déterminer les différentes caractéristiques du matériau (la conductivité, la perméabilité,), les paramètres importants à tenir compte dans l'évaluation du diagramme d'impédance sont [1][4][6] :

- L'augmentation de la fréquence à partir du zéro provoque l'apparition des courants de Foucault, qui se traduit par une augmentation de la résistance dans la bobine.
- Lorsque la fréquence augmente, les courants de Foucault circulent de plus en plus en surface, ils créent un champ opposé au champ induit, donc le flux total à l'intérieur de la bobine diminue.
- Quand la fréquence soit très élevée le flux total tend vers zéro, les courants de Foucault sont à la surface, et les parties résistives et réactives de l'impédance tendent vers zéro.
- L'impédance est caractérisée par l'augmentation de la partie active et une diminution de la partie réactive due à l'opposition de deux champs (le champ induit et le champ opposé à ce champ).

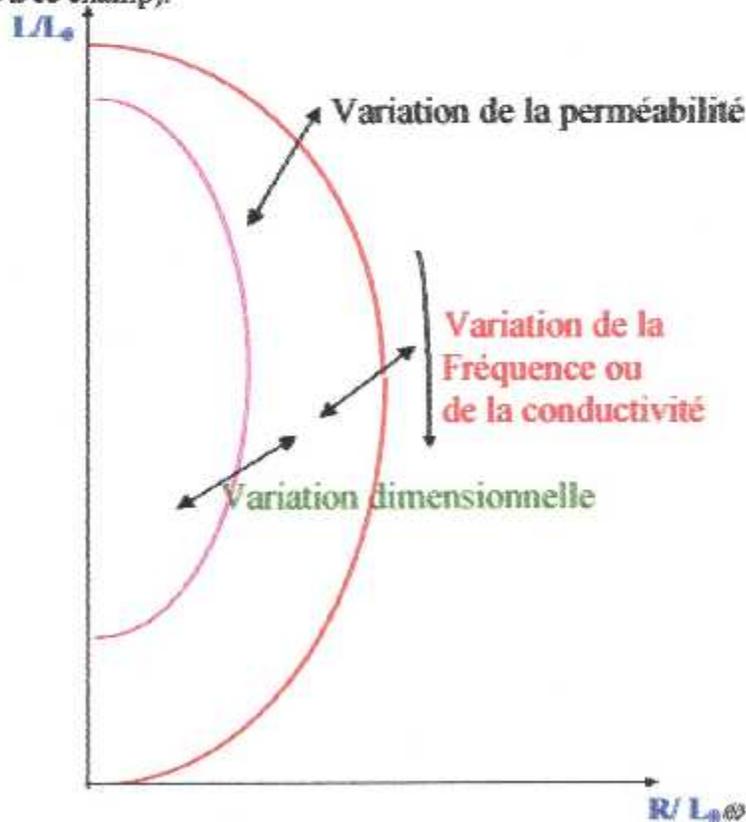


Figure (I.5) Le diagramme d'impédance

- Le point (0,0) indique que :

L'ensemble bobine matériau est en court circuit.
Le matériau possède une conductivité infinie.
La fréquence de travail est infinie.

- le point (0,1) indique :

La bobine ne contient aucun matériau.
La bobine contient un matériau isolant.
La bobine est excitée par un courant continu.

L3.2 Différents paramètres influents le tracé du diagramme :

Les paramètres les plus importants qui jouent un grand rôle lors du tracé de ce diagramme sont :

- Le coefficient de remplissage : c'est le rapport entre le rayon externe du produit et le rayon moyen du bobinage de mesure en cas d'un cylindre ; et pour le cas d'une plaque plane ce coefficient est la distance entre la bobine et le matériau à contrôler qui s'appelle lift off [5].

$$\eta = \frac{R_b^2}{R_c^2} \dots\dots\dots (1.5)$$

R_b : rayon externe.

R_c : rayon moyen du bobinage.

Pour des résultats plus précis, il est nécessaire de travailler avec un coefficient très proche de l'unité (1) pour le cas d'un cylindre, et très petit (proche de zéro) pour le cas d'une plaque plane.

La diminution du facteur de remplissage entraîne une diminution de la sensibilité de mesure.

- La résistivité : une augmentation de la résistivité résulte une augmentation de la circulation des courants de Foucault, dont le point d'efficacité se déplace vers le haut du diagramme.

• Pour un matériau isolant, les courants de Foucault ne sont pas créés, une variation de la conductivité électrique entraîne une diminution de la profondeur de pénétration. Pour des conductivités élevées, les courants de Foucault ne sont plus créés.

- Une augmentation de la fréquence fera descendre le point d'efficacité vers le bas du diagramme.

• La perméabilité magnétique : si la perméabilité relative est supérieure à l'unité (matériau ferromagnétique), la composante réactive du capteur se trouve amplifier, le diagramme se déplace vers le haut. (figure I.6)

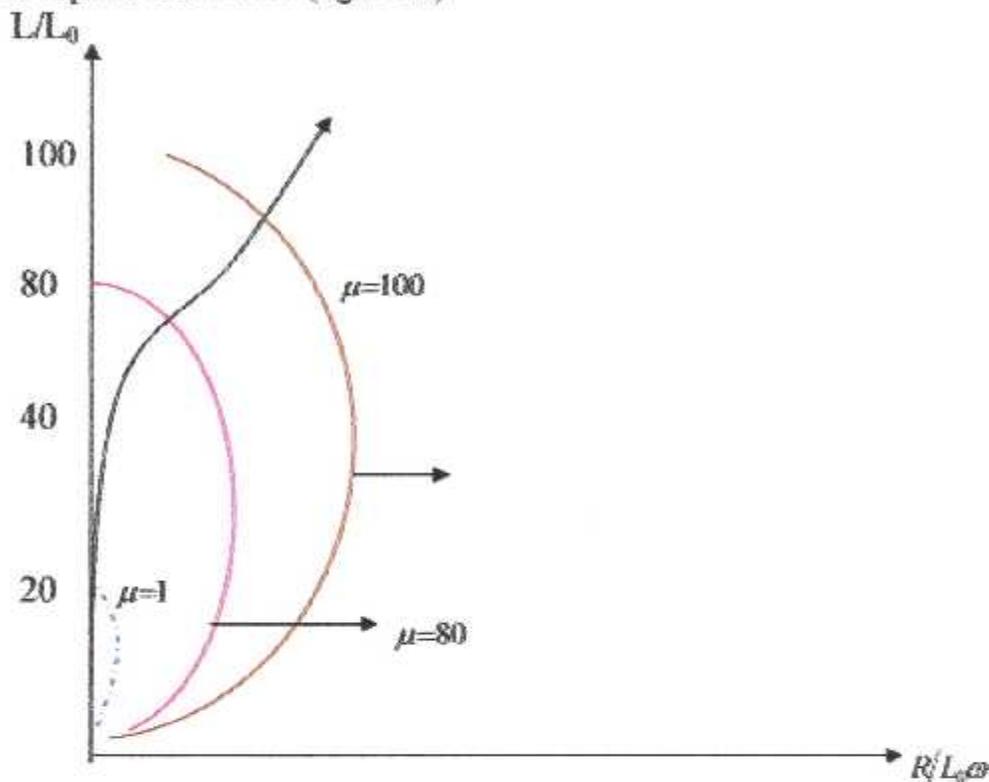


Figure (I.6) Diagramme d'impédance normalisée.

I.3.3 Le choix de la fréquence :

Le premier facteur qui intervient dans le choix de la fréquence c'est la pénétration des courants de Foucault.

Pour un matériau non ferromagnétique, l'application de la formule donnant la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence donne de bons résultats ; par contre, si le matériau est ferromagnétique, la gamme de la fréquence est faible [1].

Pour un contrôle volumique, la fréquence est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{3 \cdot \rho}{e^2} \dots\dots\dots (I.6)$$

Tel que :

- ρ : C'est la résistivité électrique.
- $e = 3\delta$: C'est l'épaisseur de l'échantillon.
- δ : C'est la profondeur de pénétration.

Une basse fréquence entraîne une sensibilité et pénétration dans le matériau très élevée.

Pour pouvoir détecter les petits défauts il faut choisir une fréquence élevée.

I.4 SYNOPTIQUE D'UN APPAREIL A COURANT DE FOUCAULT :

Un appareil de mesure par la technique du contrôle non destructive par la méthode des courants de Foucault est basé sur un système électrique délivrant un signal variable. Le système de mesure qui génère le champ magnétique tel que le capteur est l'élément essentiel.

Lors du contrôle les mesures obtenues sont traitées immédiatement ou stockées par l'enregistreur pour une exploitation ultérieure.

La gamme des appareils à courants de Foucault est très large, la bande de fréquence utilisée dans ces appareils se situe entre 1Hz à quelque Mhz.

Généralement un appareil à courants de Foucault comprend :

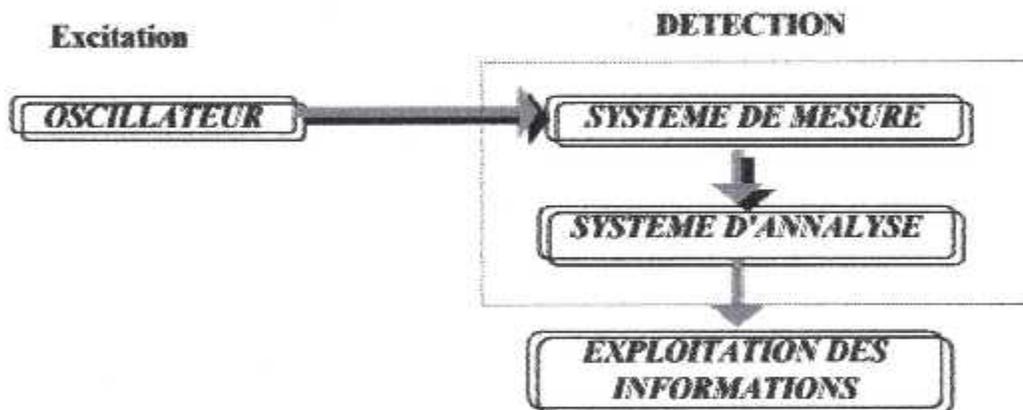


Figure (I.7) Synoptique d'un appareil à C.F

I.5 LES CAPTEURS :

Les capteurs à courants de Foucault sont des enroulements électriques qui génèrent un champ magnétique lorsqu'ils sont alimentés par un signal électrique, variable. C'est l'élément le plus important pour ce contrôle.

I.5.1 La méthode de bobinage :

❖ Capteur absolu :

Un seul bobinage est utilisé pour l'excitation et la réception, la mesure fournie directement.

❖ Capteur différentiel :

Deux bobinages sont enroulés sur le même support en opposition, l'un est utilisé pour l'excitation et l'autre pour la réception, la mesure est la différence entre les deux.

I.5.2 La méthode de mesure :

- ❖ La méthode de l'impédance :

Toute variation de l'impédance, grâce aux diagrammes d'impédances normalisés, permet d'avoir des informations physiques du matériau.

- ❖ La méthode de la transmission et de la réception :

Dans cette méthode le contrôle par courant de Foucault se base sur les variations de la différence de tension aux bornes des deux capteurs et au déphasage entre les deux.

I.5.3 Les modes de mesure :

- ❖ Mode absolu :

La chaîne de mesure comporte un seul capteur, il génère les courants de Foucault, la mesure se fait directement à ces bornes ; c'est une bonne méthode pour la mise en évidence des défauts longs (corrosion étendue, défauts géométriques longs).

- ❖ Mode différentiel :

Un capteur est utilisé pour l'excitation et l'autre pour recevoir le champ induit par courants de Foucault. La mesure est la variation de la différence des potentiels aux bornes des capteurs, si cette variation est nulle cela indique que le matériau est sain. Ce mode est adapté pour la recherche d'un défaut ponctuel (craque.....). Il est insensible aux variations lentes (variation de température, dimensionnelles).

I.5.4 Différents types de sondes :

On distingue trois principaux types d'éléments de mesure :

- ❖ bobines encerclant :

Elles sont utilisées pour le contrôle des produits cylindriques.

- ❖ Sondes :

Elle permet le contrôle interne des produits cylindriques creux. Elle a une petite section.

- ❖ Palpeurs de surfaces :

Ils sont utilisés pour le cas d'une surface plane ; maintenus perpendiculaires à eux ; leurs profils doivent épouser le mieux possible celui de l'échantillon pour l'obtention d'une meilleure sensibilité.

CHAPITRE II

Les alliages d'aluminium et l'acier inoxydable austénitique

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 [12]. 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.

Les aciers inoxydables sont caractérisés par la présence de chrome en quantité minimale de 11 à 12 % qui leur confère leur caractère lié essentiellement au fait que le chrome est très facilement oxydable à l'air ; cela entraîne la formation à la surface des pièces d'une couche dite passive composée d'oxydes durs et résistants qui fait ainsi écran en empêchant l'attaque du métal par les produits corrosifs au contact desquels il peut se trouver [8].

II.1 L'ALUMINIUM :

II.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.

➤ Conductibilité électrique : pour l'aluminium pur, atteint 62% de celle de cuivre, à des caractéristiques électriques égales, et pour une même intensité de courant, un conducteur en aluminium, dont la masse est deux fois moindre que celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins.

➤ Propriétés mécaniques : puisque l'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à face centrée, ils font preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité, et ce à toute température.

II.1.2 Alliages d'aluminium :

Il existe de nombreux alliages d'aluminium, que ce soit 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.

Dans notre étude on a travaillé avec deux alliages de séries 2000 et 7000, qui sont les alliages 2024 et 7075.

a) Série 2000 (Al - Cu et Al-Cu-Mg) :

❖ Composition chimique et addition [7] :

➤ 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 inférieures 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_3 , 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 Al 2618 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.

b) Série 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu) [7] :

❖ Composition chimique et addition :

➤ Eléments de base :

Les teneurs en Zinc varient de 4 à 8% et celles de magnésium de 1 à 3%.

Leur durcissement structural est dû principalement à la précipitation de formes transitoires (zones GP) du composé $MgZn_2$.

➤ Additions diverses :

L'ajoute de Cu jusqu'à une teneur de 2%, durcit ces aluminiums par solution solide et par précipitation, la présence de Cu dans les zones GP augmente leur stabilité à chaud.

Le cuivre diminue la trempabilité, la soudabilité et la ténacité des alliages Al-Zn-Mg.

Le chrome <0,3% améliore leur résistance à la corrosion sous tension.

L'inconvénient de cette série est leur faible résistance à chaud.

Les caractéristiques mécaniques de ces deux séries sont mentionnés dans ce tableau [7]:

	Etat	$R_{0,2}$ (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
7075 5,6Zn- 2,5Mg- 1,6Cu- 0,3Cr	O	120	260	19	/	Aéronautique, boulonnerie, bâtons de ski.	0,35- 0,8
	T6	490	560	13	160		0,35- 0,8
		490	560	14			0,8-3,2

Tableau II.1 Caractéristiques mécaniques de l'Al 2024 et Al 7075.

II.2 LES ACIERS INOXYDABLES :

II.2.1 Classification des aciers inoxydables :

❖ Notions de base :

Ces aciers contiennent tous du chrome. Le carbone et le nickel vont également influencer sur les qualités de ces aciers. Les autres additions qu'on peut rencontrer sont, dans tous les cas, du manganèse et du silicium et accessoirement de l'azote, du molybdène et du cuivre ; ces additions ne joueront que fort peu sur les caractères de base.

❖ Diagramme fer-chrome :

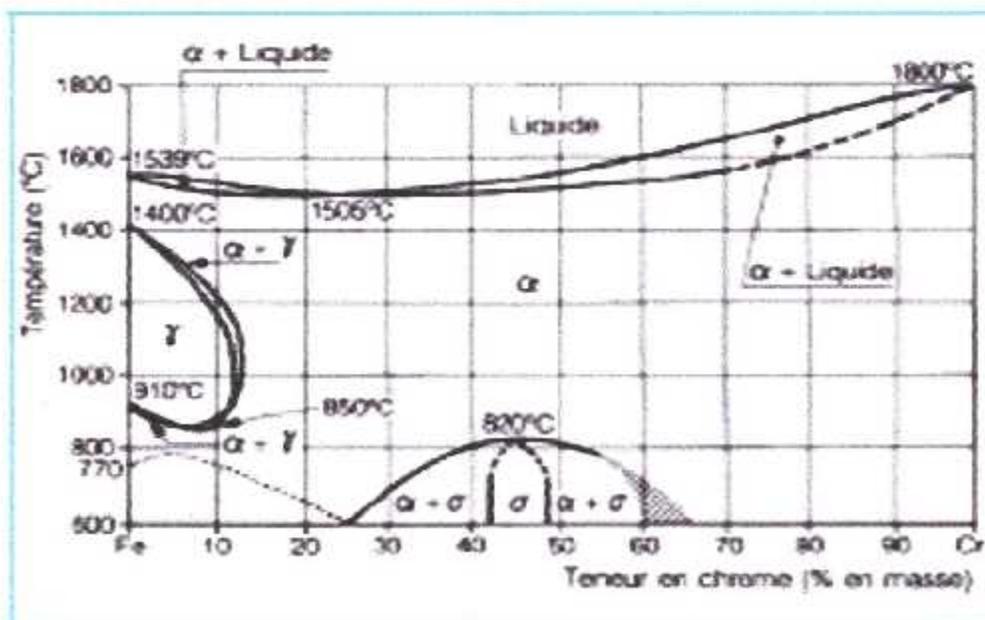
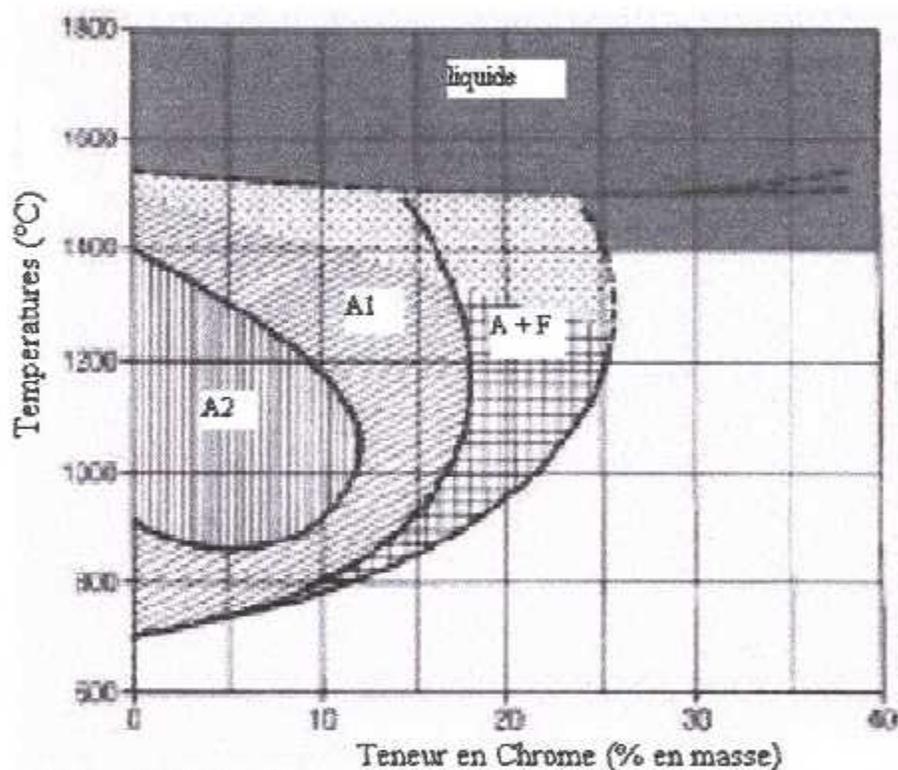


Figure (II.1) Diagramme des alliages fer-chrome : C < 0.01

Les figures II.1 et II.2, nous permettent de faire les remarques suivantes :

- Les aciers dont la droite de refroidissement traverse la boucle γ sont dits **martensitiques** ou **semi-ferritiques**, ils comportent des points de transformation.
- L'étendue de la boucle dépend essentiellement de la teneur en carbone :
 - Pour $C=0$, l'acier est martensitique jusqu'à une teneur en chrome de 10,5 % environ ;
 - Pour $C=0,6$ %, l'acier est martensitique jusqu'à une teneur en chrome de 25,5 % environ.
- Au-delà de la boucle, l'acier est **ferritique**.
- À partir de 25 % de chrome et jusqu'à 65 à 70 %, des constituants fragiles peuvent se former au-dessous de 850 °C environ ; un de ces constituants fragiles est la phase σ .



- A+F austénite + ferrite : zone à deux phases dans les alliages Fe-Cr-C (C=0.6%)
 A1 austénite : boucle γ dans les alliages Fe-Cr-C (C=0.6%)
 A2 austénite : boucle γ dans les alliages Fe-Cr (sans carbone)

Figure (II.2) Influence du carbone dans les alliages fer-chrome

❖ Influence du nickel :

Si le nickel est ajouté en quantités inférieures à 1 %, il n'a que peu d'incidence sur le comportement des aciers. Entre 1 et 6 %, ses effets n'offrent que peu d'intérêt, mais, au-delà de 6 % à 8 %, l'acier devient austénitique à toutes les températures ; il ne comporte alors plus aucun point de transformation.

❖ Classification :

L'étude des aciers inoxydables doit être partagée entre différentes familles dont chacune comprendra des aciers inoxydables de comportements voisins :

- aciers inoxydables ferritiques ;
- aciers inoxydables austénitiques.
- Aciers inoxydables martensitiques.

Nous étudierons en détail la famille des aciers inoxydables austénitiques en examinant:

- la composition chimique de base et les additions.

II.2.2 Cas des aciers inoxydables austénitiques :**❖ Composition chimique et addition [8]:****➤ Eléments de base :**

Ce sont essentiellement le chrome et le nickel :

- Le chrome doit être supérieur à 16 % pour assurer l'inoxidabilité.
- Le nickel doit être supérieur à 8 % pour obtenir la structure austénitique.

En outre, ces aciers contiennent tous :

- Du carbone dont la teneur peut être classée en trois catégories :
C < 0,030 % : aciers dits à bas carbone,
0,03 % C < 0,08 % : aciers dits à carbone moyen,
C > 0,08 % : aciers dits à carbone élevé ;
- Du manganèse dans la limite maximale de 2 % sauf cas particuliers ;
- Du silicium dans la limite maximale de 1 % sauf cas particuliers ;
- Du soufre et du phosphore en tant qu'impuretés dans la limite maximale de 0,040 %.

➤ Additions diverses :

Ces diverses additions correspondent à la recherche d'un effet particulier et peuvent être un ou plusieurs de ceux définis ci-dessous :

a) Stabilisation du carbone :

Pour éviter la formation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % et pour protéger l'acier contre le risque de corrosion inter granulaire :

- Par addition de titane :

$$4 \text{ à } 5C < Ti < 0,6 \%$$

- Par addition de niobium plus tantale :

$$8 \text{ à } 10 C < Nb + Ta < 1,1 \%$$

b) Amélioration de la résistance à la corrosion en présence de certains fluides :

- Par addition de molybdène dans la proportion, sauf cas particuliers, de 2 à 4 %, qui améliore la tenue à la corrosion en présence de produits halogènes ou d'acides réducteurs ;

- Par addition de cuivre dans la proportion, sauf cas particuliers, de 1 à 2 % qui améliore la tenue à la corrosion en présence, par exemple, d'acide sulfurique ;

- Par addition de silicium dans la proportion de 3 à 4 % qui améliore la tenue à la corrosion en présence d'acide nitrique très concentré (supérieur à 85 % en acide pur).

c) Amélioration des caractéristiques mécaniques :

- Par addition d'azote dans la proportion de 0,12 à 0,20 % ; en l'absence d'addition volontaire d'azote, les aciers austénitiques peuvent en contenir sous forme d'impuretés dans la limite maximale de 0,08 à 0,10 %.

d) Recherche de conditions particulières :

- *En variante des nuances classiques en remplaçant une partie du nickel par du manganèse dans la proportion de 6 à 10 %, la teneur en nickel se trouvant alors ramenée de 10 % à 5 à 8 % ;*

- *Renforcement de la tenue à l'oxydation aux hautes températures par augmentation de la teneur en silicium jusqu'à environ 1,5 %.*

II.2.3 Caractères généraux des structures austénitiques :

Les structures austénitiques ont des caractères très particuliers qu'il faut bien connaître pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre.

a) La structure est entièrement austénitique à l'état de livraison après hypertrempe entre 1 025 et 1 150°C suivie d'un refroidissement rapide à l'air ou à l'eau ; la faible teneur en ferrite que l'on peut constater (entre 0 et 5 %) ne modifie absolument pas le comportement global.

Le système est cubique à faces centrées, ce qui conduit à de fortes capacités de déformation.

b) La courbe de traction diffère de celle des aciers au carbone non alliés ou légèrement alliés ce qui confère à ces aciers un comportement très particulier (figure II.3).

c) Ces aciers ont un bon comportement aux basses et très basses températures (jusqu'à - 269°C, soit 4 K).

d) Ils ont une bonne stabilité aux températures élevées.

e) Leur coefficient de dilatation linéique est de l'ordre de 1,6 à 1,8 mm/(m · 100°C) ou 16×10^{-6} à $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ contre 1,2 mm/(m · 100°C) ou $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour les aciers ferritiques.

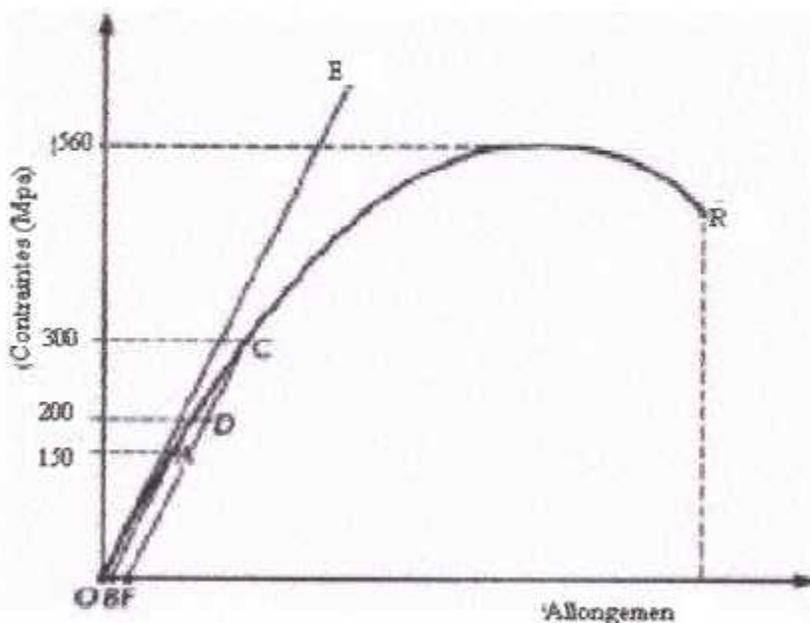


Figure (II.3) Courbe de traction pour un acier inoxydable austénitique.

Quelques données numériques concernant les propriétés de l'acier inoxydable austénitiques 304 L [8].

Désignation de l'acier		Produit (1)	Epaisseur Max. (mm)	Limite d'élasticité min.		Résistance à la traction R_m (N/mm ²)	déformation à la rupture A (%)	Résistance à la corrosion intergranulaire	
				$R_{p0.2}$	$R_{p1.0}$			A l'état écroui	Après traitement de sensibilisation
symbolique	Numérique			(N/mm ²)					
X2 Cr NI 18-9 (304 L)	1.4307	C	6	220	250	520 à 670	45	oui	oui
		H	12	200	240				
		P	75	200	240	500 à 650			

C = bande laminée à froid.
 H = bande laminée à chaud.
 P = tôle laminée à chaud.

CHAPITRE III

L'essai de traction

INTRODUCTION :

Les matériaux métalliques sont très employés dans les constructions civiles, mécaniques, ... Etc. Scientifiquement on adopte des méthodes d'essais suivant l'utilisation du matériau dans n'importe qu'elle construction.

Pour faire le choix de n'importe qu'elle matériau, il faut étudier leur propriétés.

Les propriétés mécaniques sont les caractéristiques qui déterminent le comportement d'un métal ou d'un autre matériau sous l'effet de forces extérieures.

Lorsqu'on exerce une contrainte sur un échantillon, on observe un allongement qui traduit une déformation, les valeurs obtenues sont données sous forme d'un diagramme « contrainte - déformation ».

Il existe plusieurs essais mécaniques :

- Essais statiques : Englobe la traction, compression, flexion, torsion et cisaillement.
- Essais dynamiques : On peut les classer suivant les essais de choc et les essais de fatigue.
- Essais complémentaires : On peut citer les essais d'usure et les essais de dureté qui ont une grande importance dans la pratique.

Ce qui nous intéresse dans notre travail c'est l'essai de traction.

III.1 DEFINITION :

C'est l'essai le plus fréquemment utilisé, il s'agit d'exercer une force de traction sur une éprouvette normalisée jusqu'à sa rupture en vue d'établir le diagramme effort – allongement qui se traduit à un diagramme contrainte – déformation, qui nous donne les caractéristiques mécaniques du matériaux, ainsi de comparer les matériaux à tester [1].

Il se fait à l'aide de machine d'essais spéciaux qui permettent d'appliquer une charge croissante sur l'éprouvette et d'enregistrer au cours de l'essai les efforts appliqués sur l'éprouvette et les déformations de celle-ci.

III.2 EPROUVETTES:

Les éprouvettes peuvent être usinées ou brutes. Elles comportent une partie calibrée et deux têtes d'amarrage. La section droite de l'éprouvette peut être sous forme circulaire, rectangulaire, hexagonale [1].

Dans notre étude on utilise des éprouvettes de forme plaque (prismatique), et qui sont usinées c'est-à-dire que la partie calibrée doit être raccordée par des congés de rayons suffisants aux têtes d'amarrage (généralement supérieurs à 25mm) ; celles-ci avoir une forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine d'essai.

III.3 DIAGRAMME DE TRACTION:

Le diagramme présente une série de zones et de points caractéristiques qui correspondent à diverses étapes de déformations de l'éprouvette (Figure III.1).

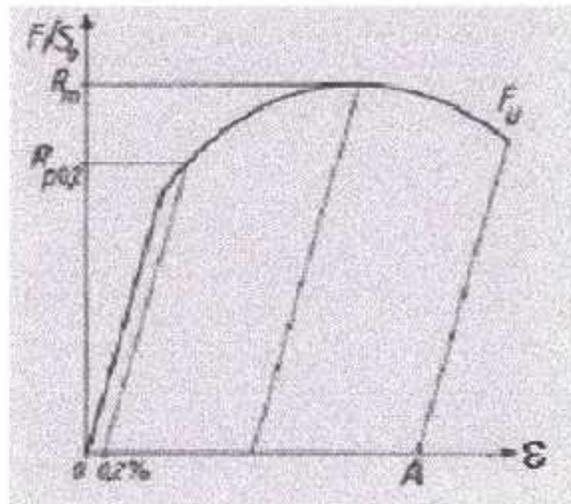


Figure (III.1) Diagramme de traction.

Dans le cas général on observe :

- Une partie rectiligne correspondant au domaine d'élasticité ;
- Le domaine de déformation plastique uniforme ;
- Un maximum correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette, appelée charge de rupture ;
- Le domaine de striction dans lequel les déformations se localisent dans une zone limitée dont la section diminue rapidement ;
- Finalement la rupture de l'éprouvette.

La norme EN 10002-1 fournit les définitions des caractéristiques mécaniques que permet de déterminer l'essai de traction.

NB :

Pour transformer la variation de " $F - \Delta \ell$ " en variation " $\sigma - \varepsilon$ " il faut rapporter la force à la section S_0 et l'allongement à la longueur ℓ_0 de l'éprouvette, on obtient ainsi la contrainte nominale [14] :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{III.1})$$

Et la déformation nominale ε est exprimée par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (\text{III.2})$$

La courbe de traction nous permet d'obtenir les valeurs des caractéristiques mécaniques suivantes :

- ❖ Le module d'élasticité E ou module de Young : Donnée par la pente de la partie élastique de la courbe contrainte σ -déformation ε ; ce module élastique est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou molécules constituant le matériau.
- ❖ La limite d'élasticité R_e : Correspond à la contrainte au moment où apparaît la première déformation plastique irréversible, elle correspond la contrainte à partir de laquelle il n'y a aucune proportionnalité entre la contrainte et la déformation. Comme la déformation plastique apparaît souvent progressivement, la limite d'élasticité est difficile à déterminer avec précision ; on lève toute ambiguïté en définissant la limite de proportionnalité conventionnelle à 0.2% notée $R_{e0.2}$, tel que cette limite est la contrainte minimale correspondant à une déformation permanente de 0.2%.
- ❖ La résistance à la traction R_m : Est défini par la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.
- ❖ La limite supérieure d'écoulement R_{eH} : Est la valeur de la charge unitaire au moment où l'on observe effectivement une chute de l'effort (succédant immédiatement au domaine d'élasticité) (figure IV.2).
- ❖ La limite inférieure d'écoulement R_{eL} : Est la plus faible valeur de la charge unitaire pendant l'écoulement plastique (figure IV.2).

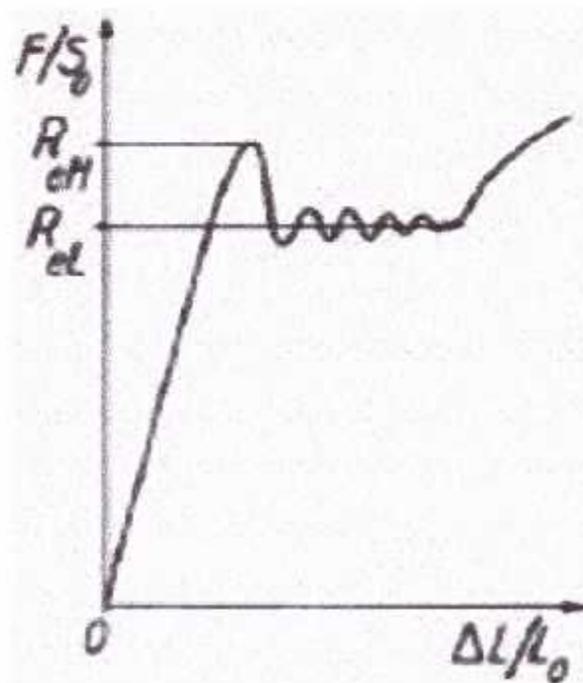


Figure (III.2) Limites supérieures et inférieures d'écoulement.

❖ **L'allongement** : Est à un instant donné, la variation de la longueur entre repère comptée à partir de la longueur initiale entre repère ℓ_0 . L'allongement est une mesure de la ductilité.

Généralement on considère les allongements relatifs qui sont les rapports des allongements à la longueur initiale entre repère ℓ_0 , ils sont exprimés en %.

➤ **L'allongement rémanent après rupture** : est la variation de la longueur entre repères L_u-L_0 mesurée après rupture de l'éprouvette en rapprochant soigneusement les deux fragments (L_u est la longueur entre repères après rupture de l'éprouvette).

$$\Delta \ell_v = \ell_v - \ell_0 \quad (III.3)$$

ℓ_v : La longueur ultime après rupture.

❖ **Déformation après rupture A** : Est l'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture $\ell_v - \ell_0$, exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères L_0 :

$$A = \frac{\ell_v - \ell_0}{\ell_0} \times 100 \quad (III.4)$$

❖ **Striction à la rupture** : C'est la variation de la section à l'endroit où se produit la rupture.

$$Z_s = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad (III.5)$$

La striction donne une indication de la ductilité du matériau.

III.4 DEFORMATION RATIONNELLE [8][21]:

III.4.1 Diagramme rationnel :

❖ **Définition** :

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** : tient compte de la variation de la section au cours de l'essai, et est égale à la charge rapportée à la section instantanée.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (III.6)$$

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

$$S_0 \ell_0 = S \ell = S(\ell_0 + \Delta \ell) \quad (\text{III.7})$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \frac{\Delta \ell}{\ell_0}} \quad (\text{III.8})$$

D'où :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} (1 + e) \quad (\text{III.9})$$

➤ **Déformation rationnelle ε** : l'allongement instantané est égal à $\Delta \ell / \ell$, et au même instant l'allongement depuis le début de l'essai est en considérant des allongements infiniment petits $d\ell$:

$$\varepsilon = \int_{\ell_0}^{\ell} \frac{d\ell}{\ell} = \ln \frac{\ell}{\ell_0} = \ln \left(\frac{\ell_0 + \Delta \ell}{\ell_0} \right) \quad (\text{III.10})$$

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{\ell_0} = \ln(1 + e) \quad (\text{III.11})$$

→

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell} = \frac{de}{1+e} \quad (\text{III.12})$$

L'avantage de cette définition est la **propriété d'additivité**, utile pour le calcul de la plasticité.

On peut aussi tirer des relations entre la déformation rationnelle et le coefficient de striction Z_S :

$$\frac{\ell}{\ell_0} = 1 + A = \frac{S_0}{S} = \frac{1}{1 - Z_S} \quad (\text{III.13})$$

Il existe aussi ce que l'on appelle la **déformation répartie A_R** qui est celle que l'on mesure au maximum de la charge au moment où se déclenche la striction. Cette déformation répartie est aussi reliée à la variation de section Z_R du fût de l'éprouvette qui n'a pas subi la striction :

$$1 + A_R = \frac{1}{1 - Z_R} \quad (\text{III.14})$$

PARTIE II

Procédures expérimentales

CHAPITRE IV

Etude et réalisation des sondes

INTRODUCTION :

Dans la méthode du contrôle non destructive par courants de Foucault, l'élément le plus important est le capteur. Pour cela le succès d'une recherche de faisabilité dépend en grande partie de la bonne définition des capteurs de mesure, de telle sorte que ceux-ci soient pour le mieux adapté au problème considéré.

Dans ce travail, il nous a proposé de faire l'étude sur une plaque plane, c'est pour ça il est évidemment d'utiliser des sondes.

L'utilisation des sondes nous permet de caractériser des matériaux (la détection des défauts, l'épaisseur du matériau).

IV.1 MESURE DE L'IMPEDANCE DE LA SONDE :

La méthode de l'impédance pour le contrôle par courants de Foucault consiste à contrôler la chute de tension aux bornes d'une bobine du contrôle. L'impédance a des parties résistives et inductives ainsi que capacitives ; elle est donnée par la formule :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2 + \frac{1}{(C\omega)^2}} \quad (IV.1)$$

Négligeant l'effet capacitif, la valeur de l'impédance devient :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad (IV.2)$$

La phase de l'impédance est donnée par :

$$\theta = \text{Arctg} \frac{L\omega}{R} \quad (IV.3)$$

La tension aux bornes de la bobine du contrôle est :

$$V = I \times Z \quad (IV.4)$$

Tel que :

I : Est le courant passant dans la bobine.

Z : Est l'impédance.

Pour le tracé du diagramme d'impédance, on est obligé de déterminer l'inductance et la résistance de la sonde à vide, et en présence du matériau conducteur.

Théoriquement elles sont obtenues en appliquant les deux lois suivantes :

Pour le calcul de la résistance, on applique la loi d'Ohm :

$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \rho \frac{\pi DN}{S} \quad (\text{IV.5})$$

Tel que :

ℓ : Longueur du fil [m].

ρ : Résistivité du fil [Ω/m].

S : Section du fil [m²].

D : Le diamètre de la sonde [m].

N : Le nombre de spire.

R : Résistance en [Ω].

La partie réactive peut être négligeable à cause de l'effet d'échauffement (effet de Joule), donc on calcul seulement la partie inductive qu'elle est donnée par la loi de Nagaoka :

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \mu \frac{N^2 S}{\ell} \quad (\text{IV.6})$$

Tel que :

μ : La perméabilité du milieu ; est égale à $\mu_0 \cdot \mu_r$, μ_0 est la perméabilité à vide et μ_r est la perméabilité relative (Annexe I.2.1)

N : Le nombre de spire.

ℓ : La longueur du solénoïde.

S : La section du solénoïde.

L : La valeur de l'inductance en (henry).

Si la longueur de la bobine est petite devant le diamètre de la sonde, un paramètre correcteur « k » est introduit est appelé le coefficient de NAGAOKA :

$$L = 4\pi\mu_r \bar{r} N^2 \left[l_n \frac{8F}{k} - 0.2 \right] \times 10^{-10} \mu H \quad (\text{IV.7})$$

Avec : $\bar{r} = \frac{D_0 + D_s}{4}$ en mm

$$K = 0.112 \left[21 + D_0 + D_s \right] \text{ en mm.}$$

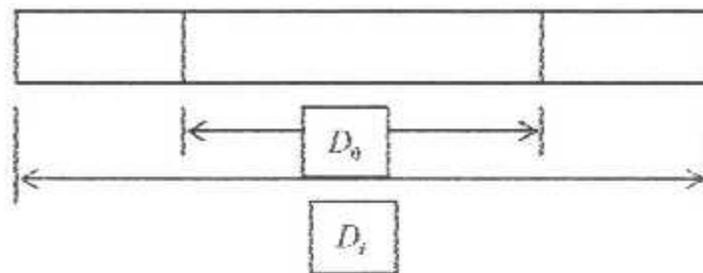


Figure (IV.1) Dimension de la sonde

Notre étude a pour but d'assimiler le champ magnétique résultant à un point matériel.

La conception de la sonde peut influencer sur la sensibilité du contrôle du défauts et autres paramètres, alors on doit bien choisir les paramètres de la sonde et la caractériser.

Les sondes que nous allons réaliser ont une forme conique pour avoir une meilleure sensibilité. Elles sont maintenues perpendiculaire à la surface, la distance entre le bout de la sonde et l'échantillon à contrôler doit être minimum (lift off).

L'obtention de la bonne sonde est en fonction des paramètres suivants :

- La réponse de la sonde par le diagramme d'impédance.
- La réponse de la résistance et de l'inductance en fonction de la fréquence, et cela sans et en présence d'un échantillon conducteur ferreux ou non ferromagnétique.
- La distribution du champ, sa réponse en présence d'un matériau vis-à-vis d'un défaut (fissure, trou, discontinuité) et de la distance du matériau (lift off).

IV.2 CRITERE DE CHOIX DES SONDES :

❖ Le choix de la sonde dépend du :

- Point d'efficacité sur le diagramme d'impédance.
- Inductance et la résistance de la sonde.
- Sensibilité de la sonde en présence d'un noyau.

❖ La fréquence du travail dépend de :

- La profondeur de pénétration, telle que une basse fréquence implique une bonne pénétration des courants de Foucault dans le matériau.
- Du déphasage.
- De la position du point d'efficacité sur le diagramme d'impédance.
- De la résonance du circuit de mesure qui est fournit par le diagramme $R=f(f)$, $L=f(f)$, $Z=f(f)$.
- Pour un matériau non ferreux, il faut choisir une haute fréquence (les CF circule à la surface); par contre pour un matériau ferreux, on doit choisir les basses fréquences.

- ❖ **La perméabilité magnétique influe sur les paramètres suivants :**
 - La profondeur de pénétration.
 - L'inductance de la sonde.
 - La position du point d'efficacité sur le diagramme d'impédance.
 - Le rapport signal/bruit, qu'elle affaiblit radicalement.

IV.3 REALISATION DES SONDES :

Les sondes peuvent être très petites, de diamètre inférieur à 2,5 mm ou atteindre un diamètre important supérieur à 300mm. 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 air.
- 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) importante.
- D'augmenter le flux magnétique.
- Diminuer la surface du contact pour focaliser le champ magnétique.

❖ **Caractérisation de sondes :** La caractérisation des sondes est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance dont les fréquences utilisées varient entre 50Hz et 100KHz.

Le diagramme d'impédance nous permet de voir :

- La meilleure gamme de fréquences où l'échange d'énergie entre la sonde et le matériau est optimal.
- La sensibilité du capteur.

Le bobinage de la sonde a été établi au niveau du laboratoire (C.S.C).

Les résultats obtenus sont mentionnés dans les figures suivantes :

❖ L'influence du diamètre de la ferrite (noyau) :

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
195	9	0.09	A l'extrémité	1

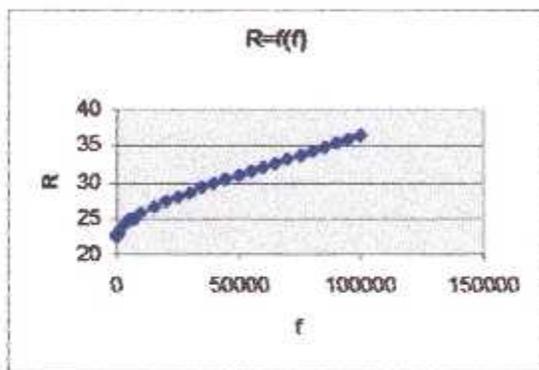
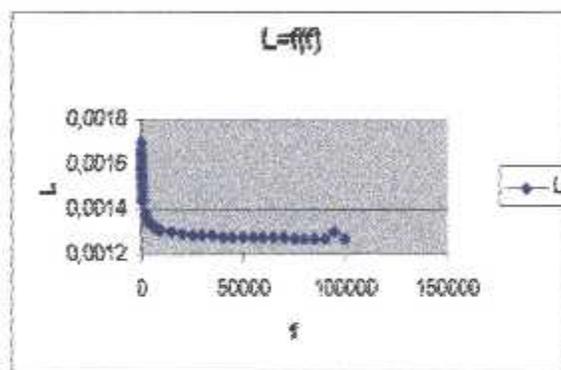


Figure (IV.2) $R=f(f)$ pour un diamètre de 9mm.



Figure(IV.3) $L=f(f)$ pour un diamètre de 9mm

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
195	3	0.09	A l'extrémité	1

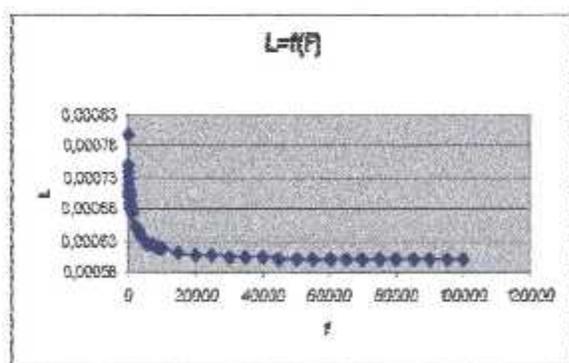
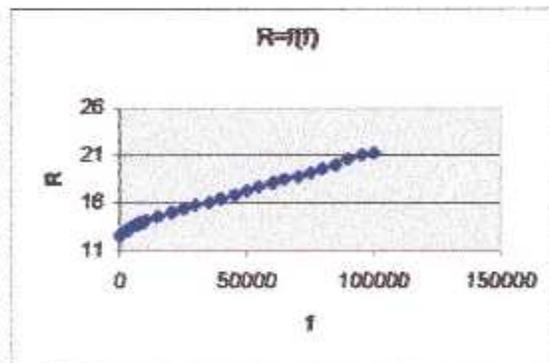


Figure (IV.4) $R=f(f)$ pour un diamètre de 3mm



Figure(IV.5) $L=f(f)$ pour un diamètre de 3mm

Pour les deux sondes on a une augmentation de la résistance en fonction de la fréquence et une stabilité de l'inductance, alors on peut dire que les deux sondes sont stables.

❖ L'influence du diamètre du fil :

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
300	9	0.09	N à l'extrémité	1

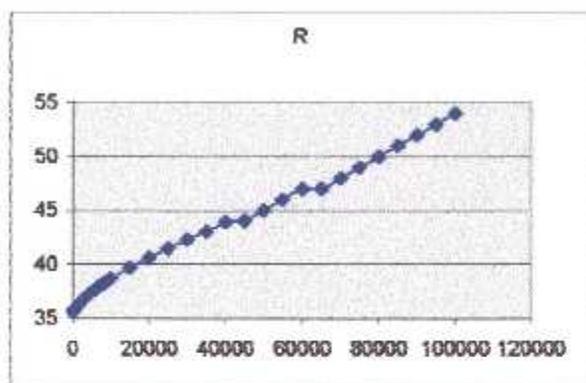
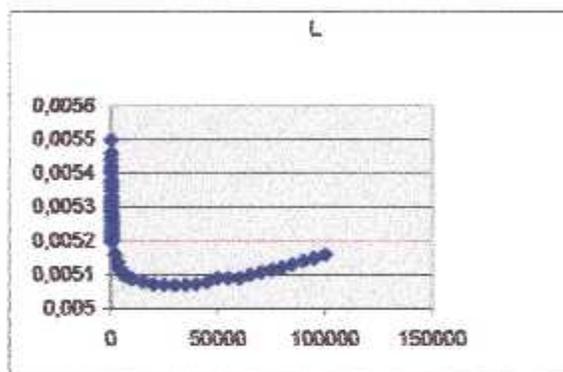


Figure (IV.6) $R=f(f)$ pour un diamètre du fil de 0,09



(IV.7) $L=f(f)$ pour un diamètre du fil de 0,09

de 0,09mm, Nombre de spires	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
300	9	0.132	N à l'extrémité	1

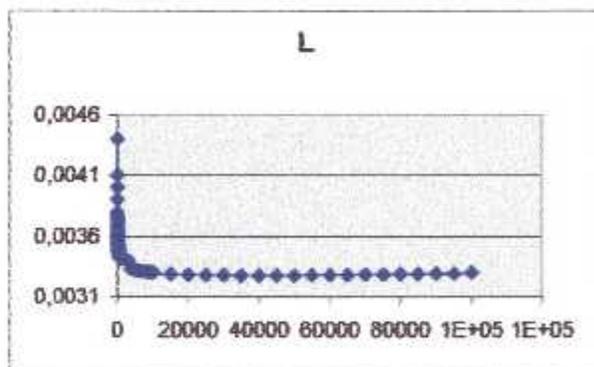
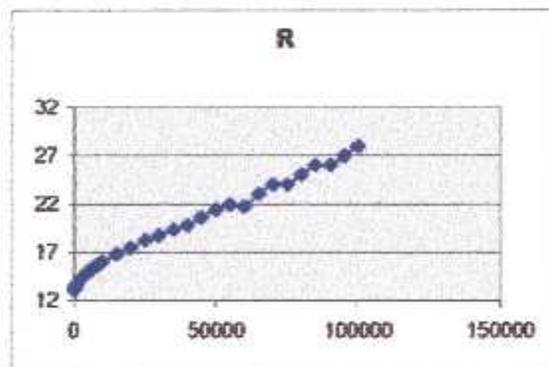


Figure (IV.8) $R=f(f)$ pour un diamètre du fil de 0,132

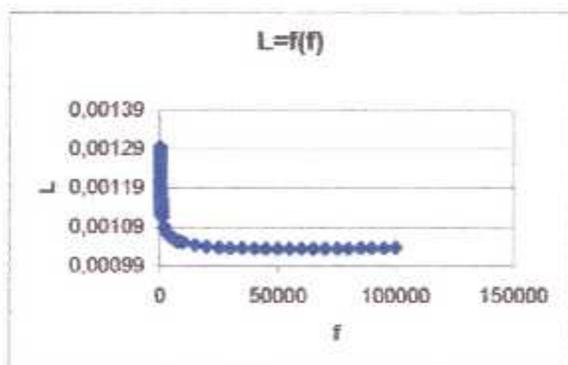
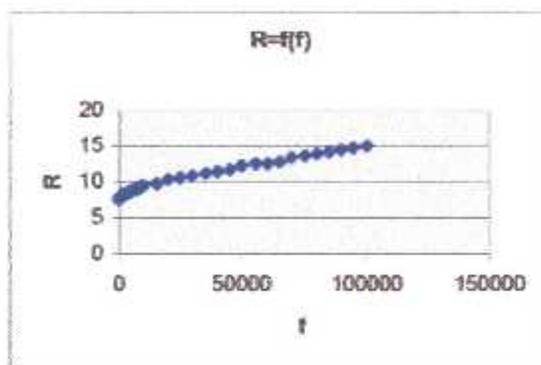


(IV.9) $L=f(f)$ pour un diamètre du fil de 0,132

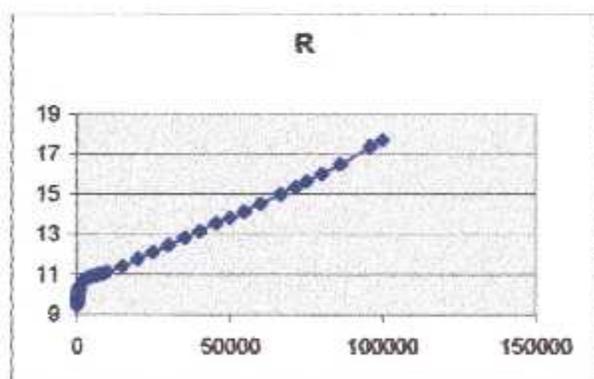
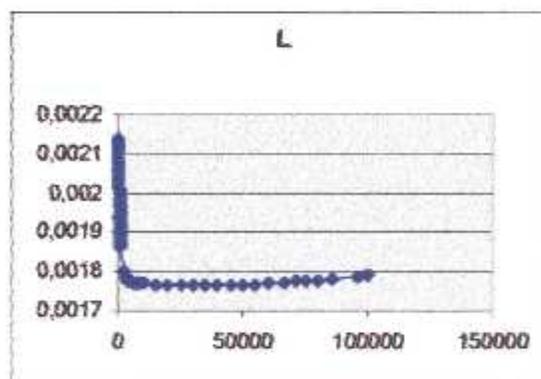
D'après ces graphes, on remarque que pour les deux sondes il y'a une augmentation de la résistance en fonction de la fréquence, mais pour l'inductance, la première n'est pas stable, par contre la deuxième est meilleure au point de vue stabilité.

❖ L'influence du nombre de spire :

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
160	9	0.132	N à l'extrémité	1

Figure (IV.10) $R=f(f)$ pour un nombre de spire de 160 spires(IV.11) $L=f(f)$ pour un nombre de spires de 160 spires

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
200	9	0.132	N à l'extrémité	1

Figure (IV.12) $R=f(f)$ pour un nombre de spires de 200 spires(IV.13) $L=f(f)$ pour un nombre de spires de 200 spires

Comme tous les graphes qu'on a vue auparavant, la résistance augmente toujours en fonction de la fréquence, et l'inductance diminue jusqu'à atteindre une certaine valeur, après elle reste stable. Ces deux sondes sont stables, en particulier la première sonde.

❖ L'influence de couche :

Nombre de spire	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
300	9	0.132	N à l'extrémité	2

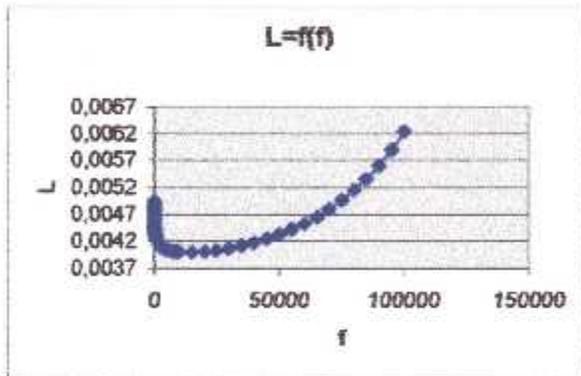
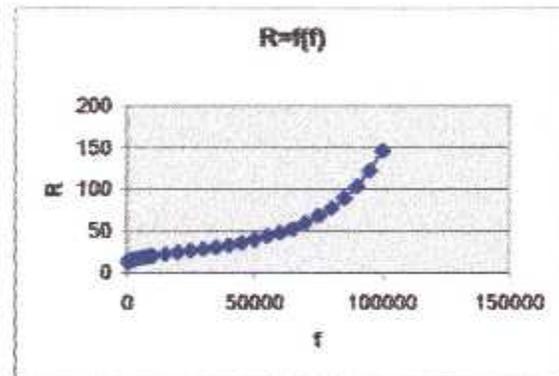


Figure (IV.14) $L=f(f)$ pour deux couches



(IV.15) $R=f(f)$ pour deux couches

Nombre de spires	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
300	9	0.132	N à l'extrémité	1

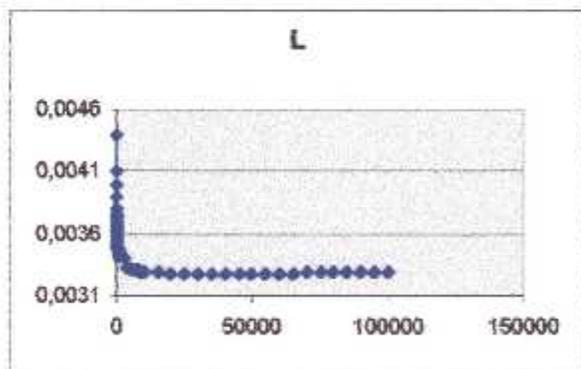
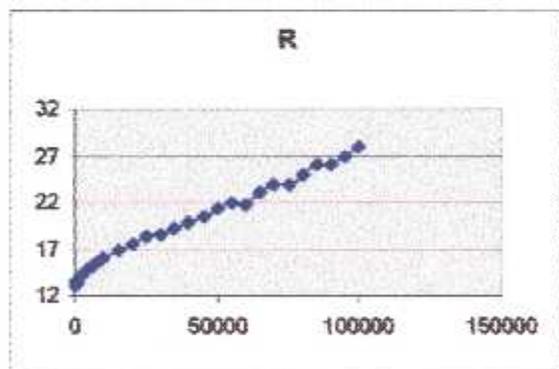


Figure (IV.14) $L=f(f)$ pour une couche



(IV.15) $R=f(f)$ pour une couche

On remarque que la première sonde n'est pas stable puisque l'inductance augmente en fonction de la fréquence, par contre le graphe de la deuxième sonde représente une stabilité.

❖ Influence de la position du bobinage :

Nombre de spires	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
195	3	0.09	A l'extrémité	1

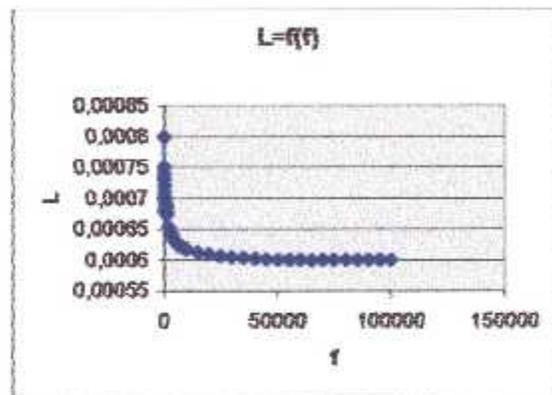
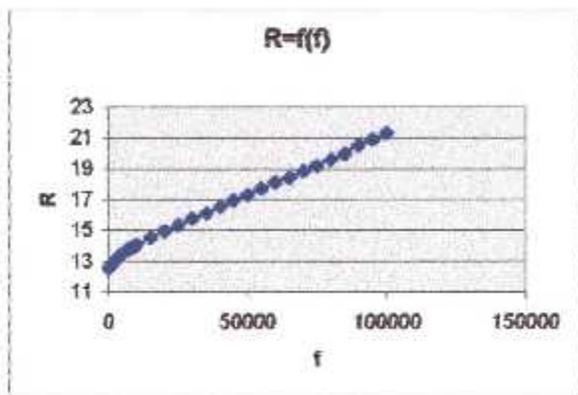


Figure (IV.14) $L=f(f)$ pour des couches se situent pas à l'extrémité

(IV.15) $R=f(f)$ pour des couches se situent à l'extrémité

Nombre de spires	Diamètre de la ferrite (mm)	Diamètre du fil (mm)	La position du bobinage	Nombre de couche
195	3	0.09	N à l'extrémité	1

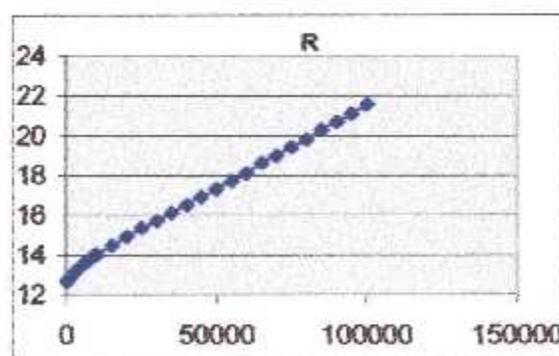
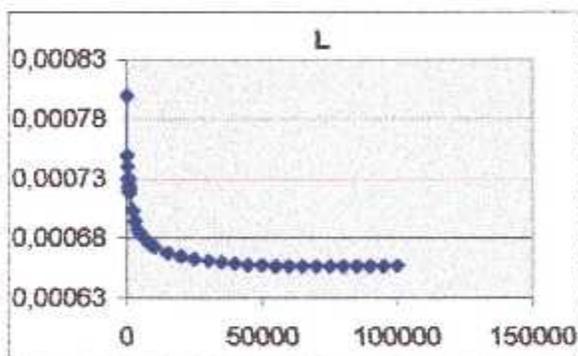


Figure (IV.16) $L=f(f)$ pour des couches ne situent pas à l'extrémité

(IV.17) $R=f(f)$ pour des couches ne situent pas à l'extrémité

Les deux sondes représentent une augmentation de la résistance en fonction de la fréquence, et une stabilité de l'inductance, donc les deux sondes peuvent être utilisées en contrôle non destructif par courants de Foucault.

Les résultats obtenus indiquent que pour avoir un champ maximal, il faut choisir un grand diamètre du noyau et un petit diamètre du fil de façon à avoir un nombre de spires important. La sonde doit être à multicouches. Notre sonde possède les caractéristiques suivantes :

- Le noyau a un diamètre faible.
- Le nombre de spire est grand.
- Le diamètre du fil est petit.
- Le nombre de couche est grand.

Afin d'utiliser notre sonde dans le contrôle non destructif, nous avons préféré tracer les diagrammes d'impédance sur les nuances que nous allons étudier, les résultats obtenus sont concluants en ce qui concerne les alliages d'Aluminium et l'acier 304-L.

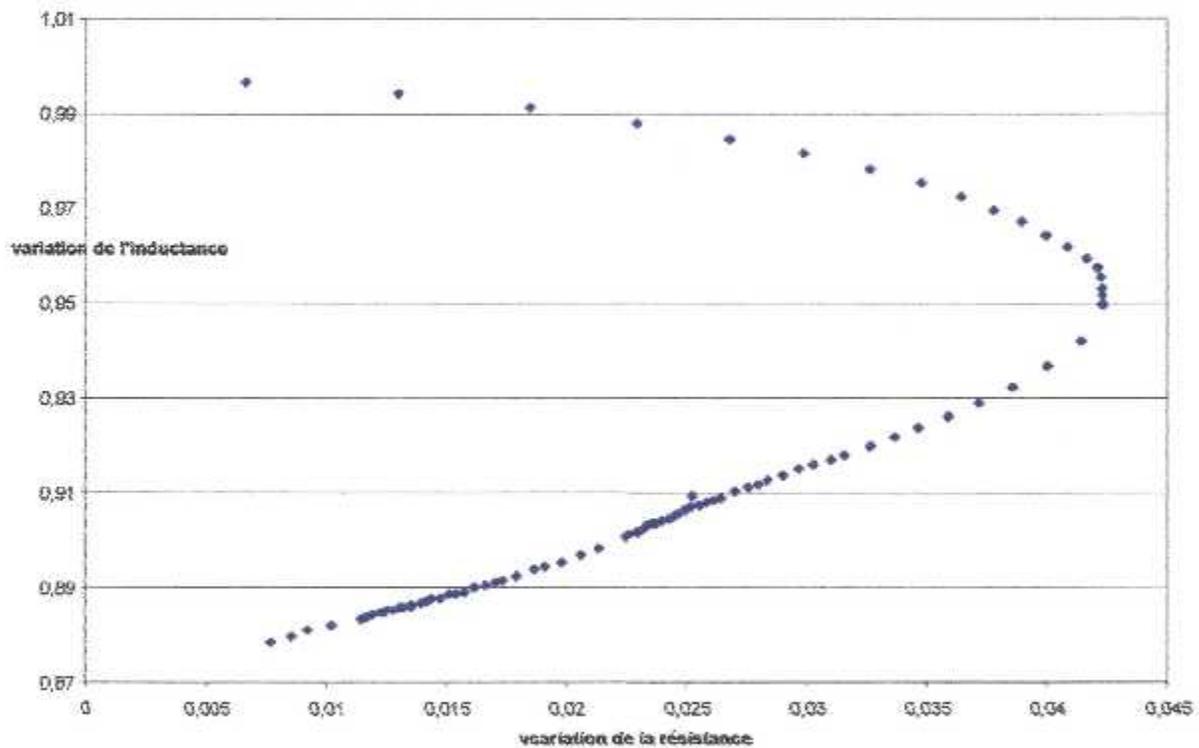


Figure (IV.1) Diagramme d'impédance pour l'Aluminium 2024

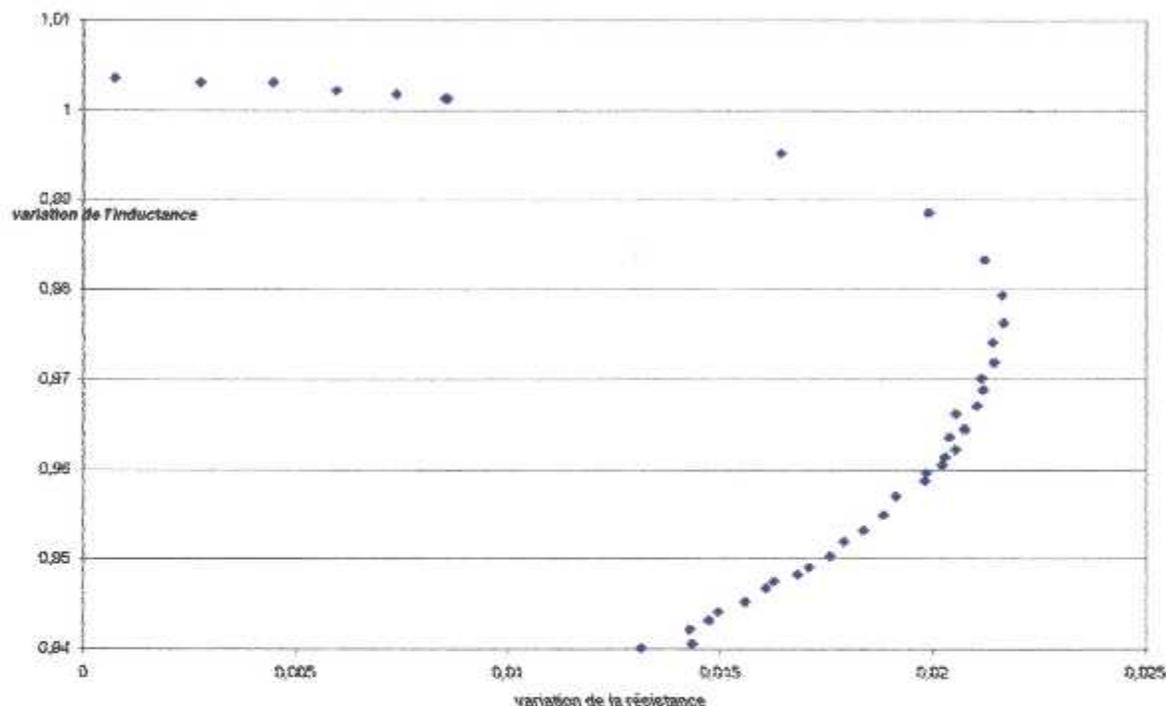


Figure (IV.2) Diagramme d'impédance pour l'acier 304-L

Nous constatons que le tracé des diagrammes d'impédance sur les différentes nuances a confirmé nos constatations faite ci-dessus.

Pour les alliages d'Aluminium, le résultat obtenu confirme les lois sur l'évolution du diagramme d'impédance normalisée.

Pour l'Acier 304-L, le tracé est conformé à la théorie mais les valeurs maximales sont presque confondues avec celles d'un matériau non ferromagnétique puisque cet acier a un comportement d'un matériau non ferromagnétique.

Pour le choix de la gamme de fréquence, le choix des fréquences du travail était satisfait en ce qui concerne l'alliage 2024 et 7075 et le 304-L, mais pour un autre échantillon d'aluminium, pour des problèmes d'aspect pratique, il nous a été impossible de procéder à la caractérisation physico-chimique de ce matériau, et donc il était il était impossible de l'interpréter. Le choix de la fréquence n'est pas satisfait puisque l'épaisseur de ce matériau est très faible. On a choisi une fréquence très élevée, donc les résultats ne nous renseigne pas sur le matériau. Les conditions du travail et les modalités d'acquisition du matériel sont très difficiles, on n'a pas pu procéder à d'autres essais.

CHAPITRE V

Réalisation des essais

INTRODUCTION :

Ce chapitre décrit les différents outils et moyens qui ont été nécessaires pour réaliser et concrétiser notre étude.

Le but est de contrôler les échantillons soumis à la traction par la méthode des courants de Foucault. Pour cela nous avons opté pour une variation de plusieurs paramètres à savoir :

- La nature du matériau.
- La nuance.
- Les différentes épaisseurs.

Et de procéder à la mesure de l'impédance et la phase.

V.1 CHOIX DU METAL :

Comme on a indiqué dans le deuxième chapitre de la première partie, les différents métaux choisis sont l'Al 2024 et l'Al 7075, et l'acier inoxydable austénitique 304-L. Les alliages d'aluminium sont disponibles au niveau de l'aéroport 'Air Algérie' et l'Acier est disponible au niveau du centre de recherche (C.S.C).

V.2 REALISATION DES EPROUVETTES :

Les éprouvettes ont été découpées au département mécanique de Blida à l'aide d'une guillotine électrique, et ont été usinées au centre de recherche (CSC) à l'aide d'une fraiseuse.

Les éprouvettes d'aluminium ont été usinées selon la norme NF A03-151 [16], et pour l'acier selon la norme NF A03-160.

La forme et les dimensions de l'éprouvette sont illustrées dans le schéma qui suit [16] :

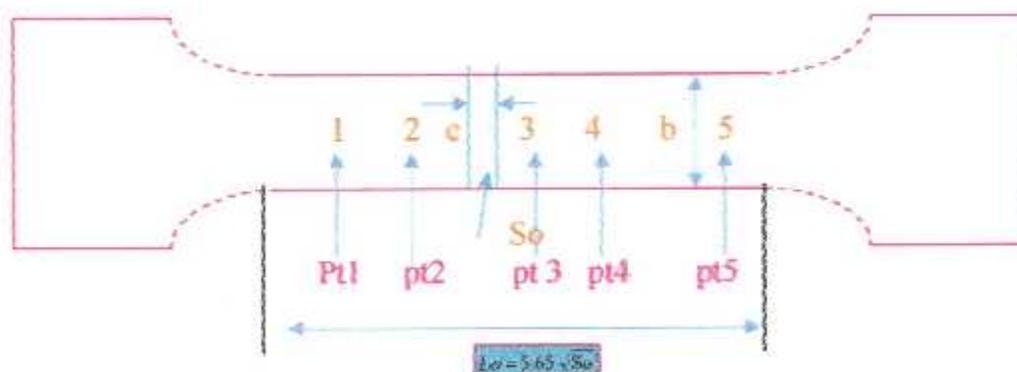


Fig. V.1 - dimensions de l'éprouvette

e : épaisseur.

$r > 25$ mm

$$L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$$

$$L_0 + \frac{b}{2} \leq L_c \leq L_0 + 2b$$

Avec :

S_0 : section transversale.

L_c : longueur calibrée.

Avant de commencer à réaliser les essais, il faut qu'on polisse la surface de chaque éprouvette.

V.3 LES ESSAIS DE TRACTION :

Comme nous l'avons précisé auparavant l'essai envisagé est l'essai de traction.

Pour réaliser ces essais on a besoin d'une machine de traction qu'elle est disponible au niveau du (CSC), et aussi l'appareil de mesure (AGILENT).

La machine de traction est une machine servohydraulique de marque **INSTRON** muni d'un logiciel (MERLIN), qui permet de la commander, ainsi que la gestion de l'interface.

❖ Merlin :

Le MERLIN c'est le logiciel qui accompagne la machine de traction, et qui nous permet de fixer les différents paramètres, ainsi de suivre son évolution durant son déroulement.

Le MERLIN nous donne la possibilité de choisir la méthode à utiliser pour calculer les différents coefficients tels que : la limite élastique et le module de Young ainsi que tout les autres résultats.

Les résultats de l'essai sont donnés automatiquement dans un tableau ainsi que la courbe de traction.

Les essais ont été répartis comme suit :

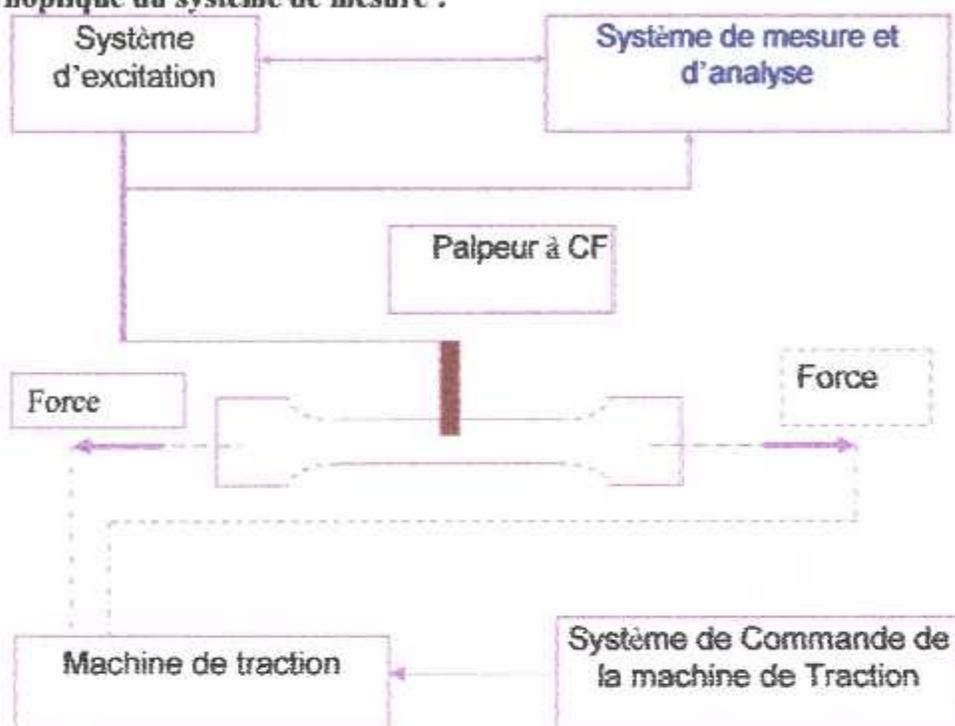
Le 1^{er} essai : 2 échantillons en aluminiums de différentes épaisseurs et différentes nuances → essais simples jusqu'à rupture.

Le 2^{ème} essai : 2 échantillons en aciers de différentes épaisseurs → essais simples jusqu'à rupture.

Le 3^{ème} essai : 2 échantillons en aluminiums de différentes épaisseurs et différentes nuance avec paliers de 2 minutes → essais jusqu'à rupture.

Le 4^{ème} essai : 2 échantillons en aciers de différentes épaisseurs avec paliers de 2 minutes → essais jusqu'à rupture.

V.3.1 Synoptique du système de mesure :



V.3.2 Description de la machine de traction :

La machine comporte un dispositif permettant d'appliquer un effort sur l'éprouvette, et des systèmes de mesure pour déminer d'une part la charge et d'autre part l'allongement. Quel que soit le dispositif du chargement, il doit assurer un effort de traction pur, donc un alignement rigoureux des axes d'amarrage de l'éprouvette.

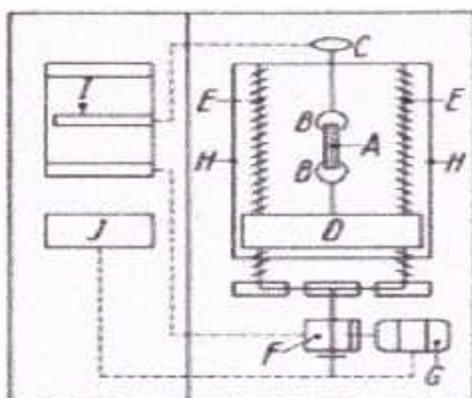
L'effort peut être fourni par un vérin hydraulique ou par un moteur électrique agissant sur une vis attaquant une traverse mobile.

1^{er} cas est utilisé lorsqu'on veut contrôler la charge et le 2^{ème} dans le cas où l'on veut contrôler le déplacement.

Première partie commandant le déplacement :

Un système de boîte de vitesses permet de choisir la vitesse de déplacement de la traverse dans une gamme élevée (0,1 mm/min à 150 mm/min par exemple).

La mesure de la charge se fait à l'aide de cellules placées généralement à la partie supérieure du bâti. Il s'agit d'anneaux ou de cylindres dynamométriques équipés de jauges de contraintes ou de capteurs de déplacement à induction.



- | | |
|-------------------|------------------------|
| A : éprouvette. | F : boîte de vitesses. |
| G : moteur. | B : têtes d'amarrage. |
| H : colonnes. | C : cellule de charge. |
| I : enregistreur. | D : traverse |
| J : commande | E : Vis |

Fig. V.2 – système commandant le déplacement

Deuxième partie commandant la charge appliquée.

Il utilise un vérin hydraulique pour transmettre l'effort, le débit est piloté par une vanne asservie. Le signal de commande de cette vanne provient de la différence entre le signal délivré par l'appareil qui mesure la grandeur à contrôler et le signal imposé.

V.3.3 Présentation de l'Appareil utilisée :❖ **Description de l'appareil :**

C'est un appareil de mesure, destiné à mesurer les paramètres électriques de la sonde avec une précision de $1/10^{12}$ pour des fréquences allant de 20 Hz à 1Mkz. Il est de type AGILEN, les différents paramètres de la sonde qui sont mesurés par cet appareil sont :

- La valeur de l'impédance.
- La valeur de la résistance.
- La valeur de l'inductance.
- La capacité.
- La phase.

L'appareil est interfacé avec le micro-ordinateur par le biais de l'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 stockage.

❖ **Mesure des caractéristiques de la sonde :**

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 cliquant sur le bouton **Man.**
- Un simple clique sur la case à cocher permet de définir les paramètres désiré (l'impédance ou la phase).
- Définir les deux fréquences.
- La transmission de chaque fréquence au mesureur d'impédance AGILEN, la mesure et le stockage des paramètres mesurés dans un fichier dont le nom et la destination sont introduits dans la zone **nom de Fichier.**

V.3.4 Description des essais :

❖ Essai N° 1 : Essais à vide :

Pour cet essai, on prend 2 échantillons d'aluminiums.

Les caractéristiques des éprouvettes sont mentionnées dans les tableaux suivants :

a) Al 2024 :

Eprouvette n° 1	Longueur entre repères (L_0)	54 mm
	Largeur : b	30 mm
	Épaisseur : e	2,98 mm
	Longueur calibrée : L_c	110 mm
	Section initiale : S_0	89,1 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	Zone élastique	0,486 mm/min
	Zone plastique	21,6 mm/min

b) Al 7075 :

Eprouvette n° 2	Longueur entre repères (L_0)	44 mm
	Largeur : b	30 mm
	Épaisseur : e	1,98 mm
	Longueur calibrée : L_c	100 mm
	Section initiale : S_0	59,4 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	Zone élastique	0,396 mm/min
	Zone plastique	17,6 mm/min

❖ Essai N° 2 : Essais à vide :

On prend deux échantillons d'aciers de même nuance, mais de différentes épaisseurs :

a) Acier 304-L :

Eprouvette n° 4	Longueur entre repères (L_0)	64 mm
	Largeur : b	30,20 mm
	Épaisseur : e	4,03 mm
	Longueur calibrée : L_c	120 mm
	Section initiale : S_0	121,706 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	9,6 mm/mn	

b) Acier 304-L :

Eprouvette n° 5	Longueur entre repères (L_0)	90 mm
	Largeur : b	31,64 mm
	Épaisseur : e	7,99 mm
	Longueur calibrée : L_c	150 mm
	Section initiale : S_0	252,80 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	13,5 mm/mn	

❖ **Essai N° 3 : Essais avec paliers :**

Les essais sont réalisés pour 2 échantillons d'aluminums en arrêtant à chaque fois la machine de traction pendant 2 minutes pour pouvoir mesurer l'impédance et la phase.

Pour ces essais la vitesse est donnée d'après la norme NF A-03-151.

a) Al 2024 avec pas de 3 KN :

Eprouvette n° 6	Longueur entre repères (L_0)	54 mm
	Largeur : b	30 mm
	Épaisseur : e	2.98 mm
	Longueur calibrée : L_c	110mm
	Section initiale : S_0	89.1mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	Zone élastique	0,486 mm/min
	Zone plastique	21,6 mm/min

b) Al 7075 avec pas de 3KN :

Eprouvette n° 7	Longueur entre repères (L_0)	44,07 mm
	Largeur : b	30,74 mm
	Épaisseur : e	1.98mm
	Longueur calibrée : L_c	100mm
	Section initiale : S_0	60,865 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	Zone élastique	0,396 mm/min
	Zone plastique	17,6 mm/min

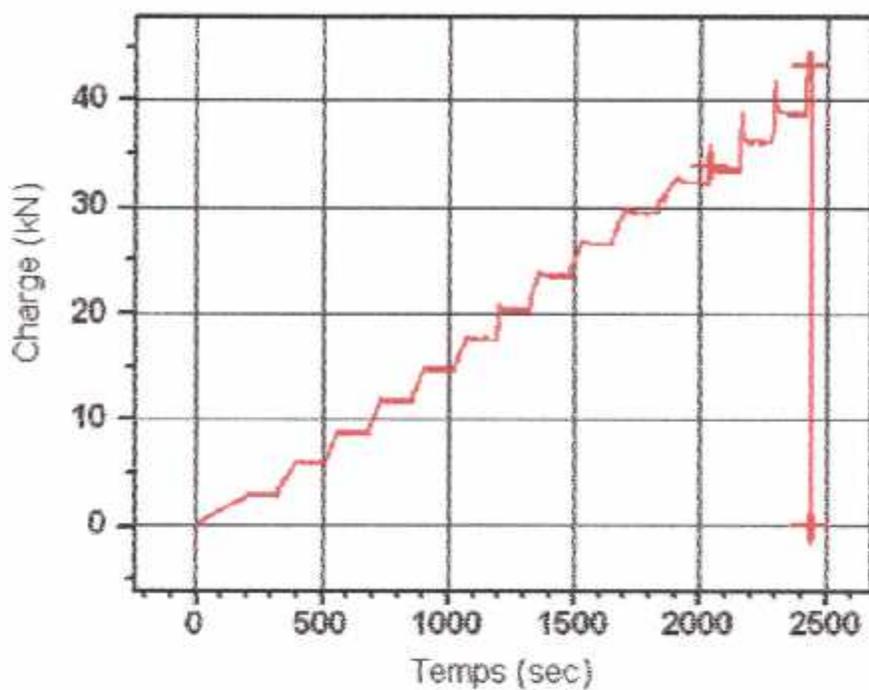


Figure (V.3) Essais avec palier pour l'Aluminium 2024.

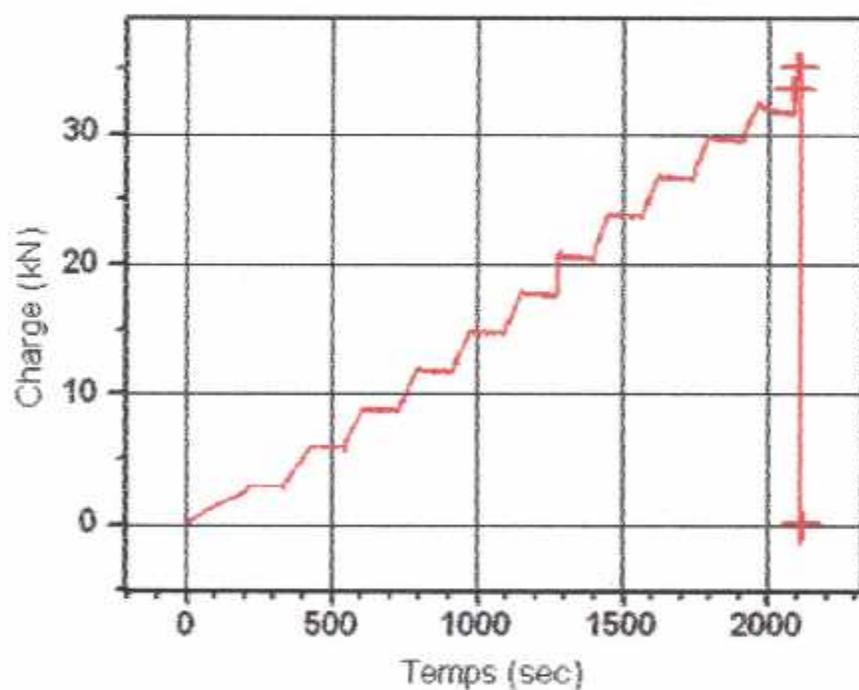


Figure (V.4) Essai avec palier pour l'aluminium 7075.

❖ Essai N° 4 : Essais avec paliers :

Les essais sont réalisés pour 2 échantillons d'acier (304-L) avec deux épaisseurs différentes en arrêtant à chaque fois la machine de traction pendant 2 minutes pour pouvoir mesurer l'impédance et la phase.

a) Acier 304-L :

Eprouvette n° 9	Longueur entre repères (L_0)	64 mm
	Largeur : b	30,20 mm
	Epaisseur : e	4,03 mm
	Longueur calibrée : L_c	120 mm
	Section initiale : S_0	121,706 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	9,6 mm/min	

b) Acier 304-L :

Eprouvette n° 10	Longueur entre repères (L_0)	90 mm
	Largeur : b	31 mm
	Epaisseur : e	7,92 mm
	Longueur calibrée : L_c	150 mm
	Section initiale : S_0	245,52 mm ²
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	13,5 mm/min	

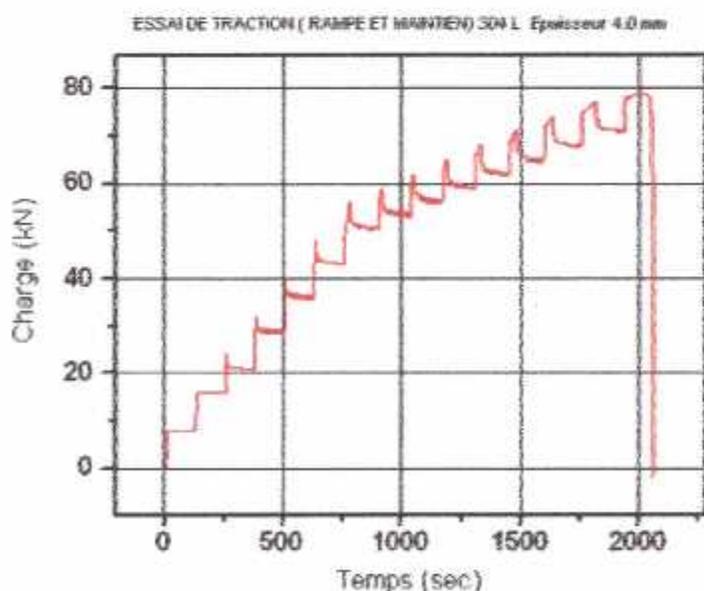


Figure (V.5) Essai avec palier pour l'acier 304-L, d'épaisseur 4mm.

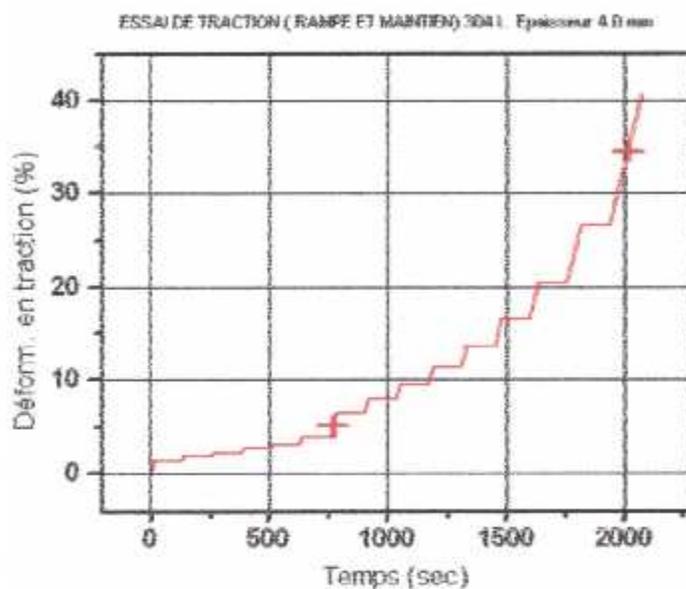


Figure (V.6) Déformation fonction du temps pour l'acier 304-L, d'épaisseur 4mm.

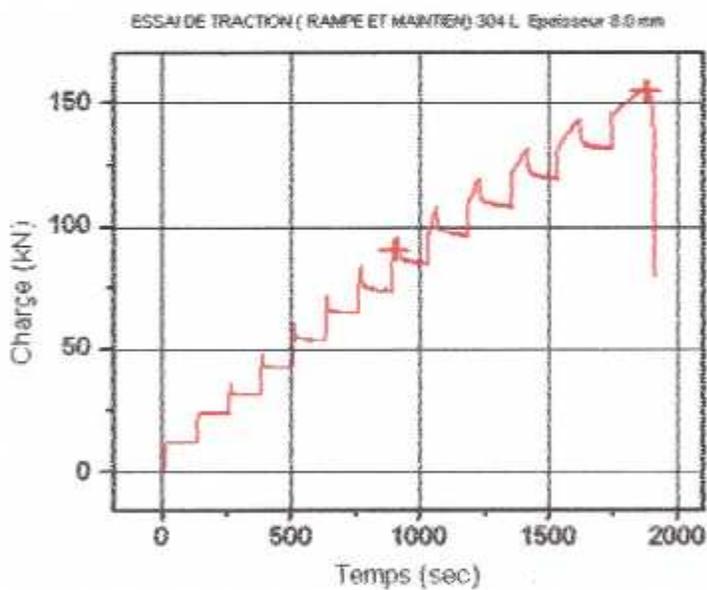


Figure (V.7) Essai avec palier pour l'acier 304-L, d'épaisseur 8mm.

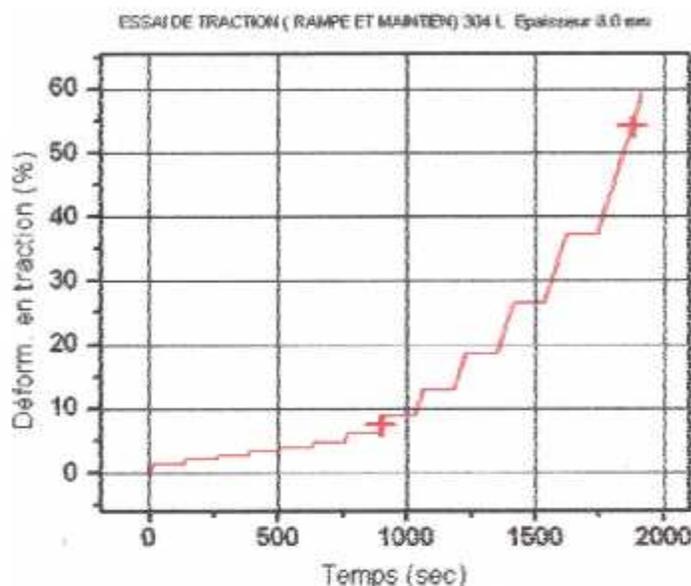


Figure (V.8) Déformation fonction du temps pour l'acier 304-L, d'épaisseur 8mm.

Les figures représentant la charge en fonction du temps présente une augmentation de la charge avec 3 KN pour les alliage d'Aluminium ; 8 KN dans la partie élastique et 3 KN dans la partie plastique pour l'Acier 304-L d'épaisseur 4mm. En ce qui concerne l'acier de 8mm la charge était de 12 KN. Le palier est de 2 minutes pour toutes les nuances qu'on a utilisées.

Les figures représentant la déformation en fonction du temps, indique une augmentation faible de la déformation correspond à un temps élevé dans la partie élastique. Pour la partie plastique la déformation et plus rapide par contre le temps correspond est faible, cela est conforme à la théorie.

CHAPITRE VI

Résultats et Interprétations

INTRODUCTION :

La comparaison entre les résultats du contrôle destructif et le contrôle non destructif devrait être étudié de la manière suivante :

La mesure de la phase et de l'impédance obtenue par l'appareil mesureur d'impédance (AGILENT) sera comparue aux résultats obtenus par des moyens destructifs à savoir :

- La limite élastique :Re.
- Le module de Young E.
- La charge Max que peut supporter l'éprouvette R_m
Et la déformation à la rupture.

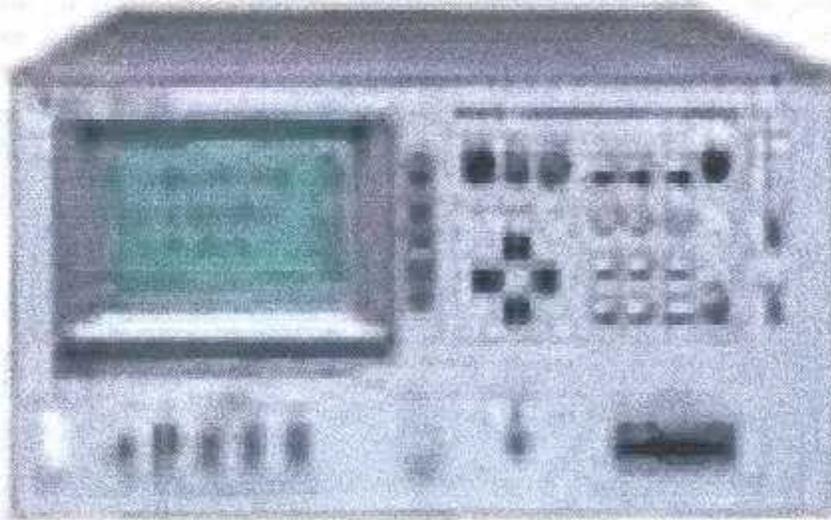
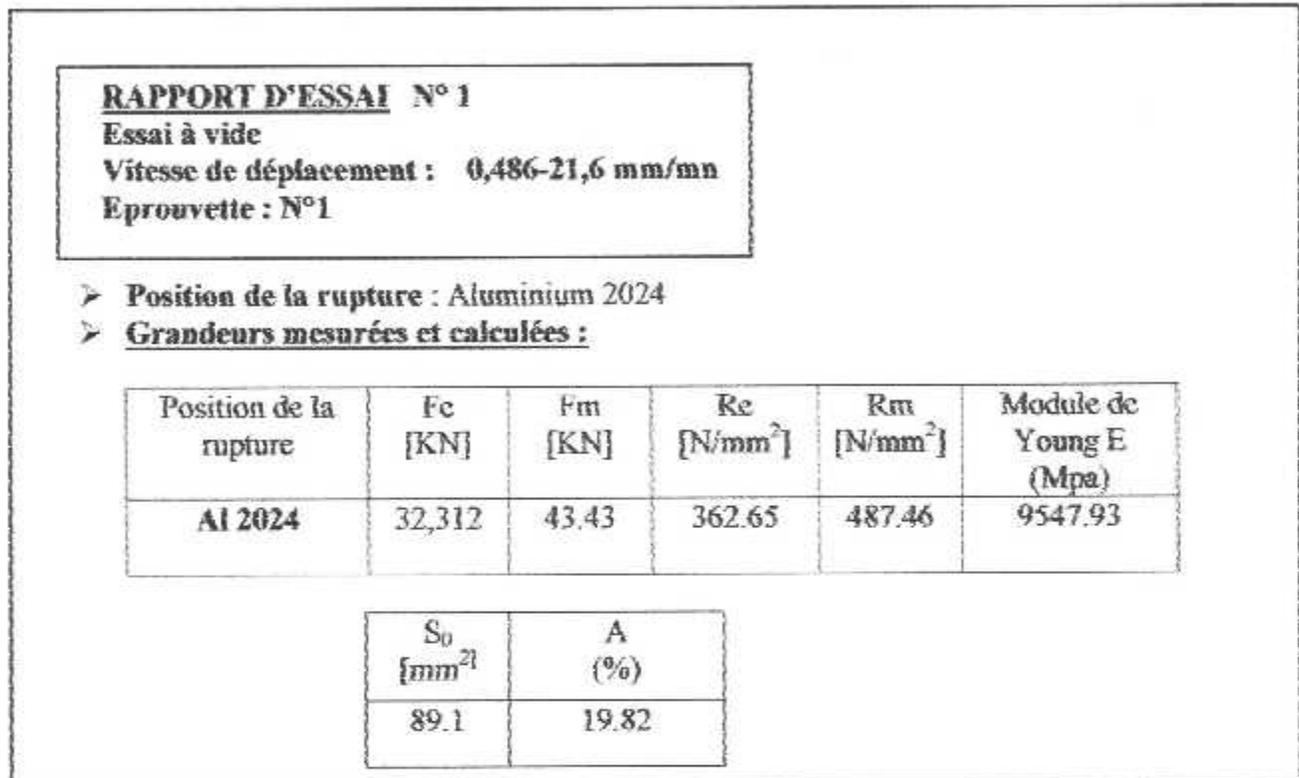


Figure (VI.1) Appareil mesureur d'impédance.

IV.1 Résultats des essais :

❖ Essai N° 1 : (essai à vide)a) L'Aluminium 2024 :

ESSAI DE TRACTION EPROUVETTE 1 D'ALUMINIUM 2024

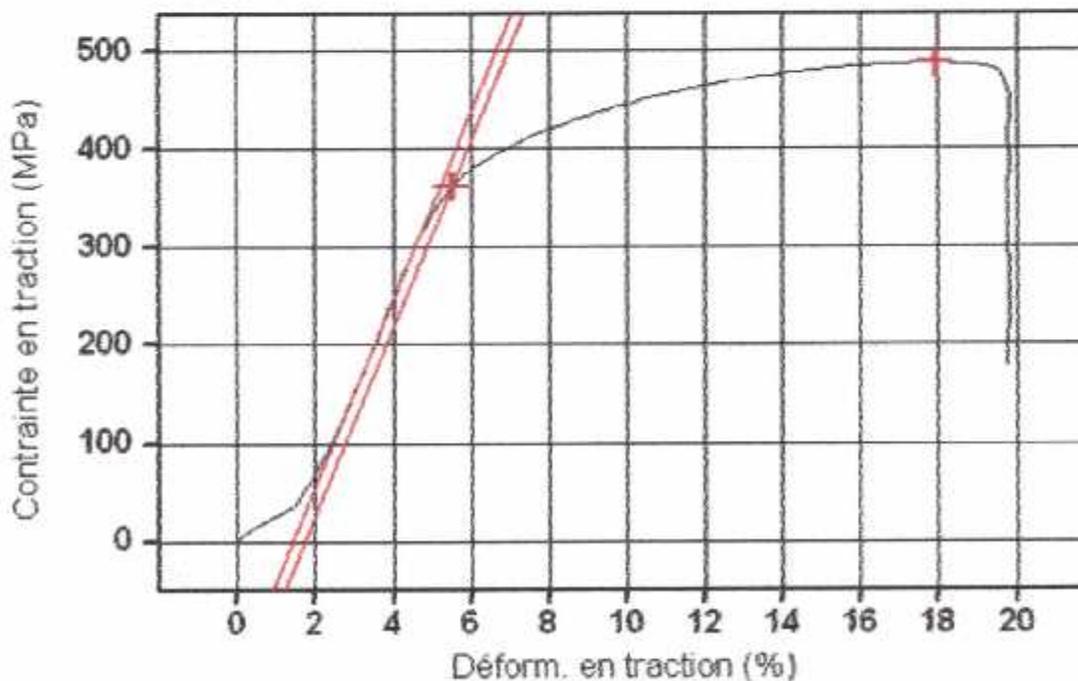


Figure (IV.2) Courbe de traction pour l'Aluminium 2024.

b) L'Aluminium 7075 :

RAPPORT D'ESSAI N° 1

Essai à vide

Vitesse de déplacement : 0,396-17,6 mm/mn

Eprouvette : N°2

➤ **Position de la rupture :** Aluminium 7075➤ **Grandeurs mesurées et calculées :**

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Module de Young E (Gpa)
Al 7075	33,186	35.15	548.09	580.55	15.71

S ₀ [mm ²]	A (%)
60.55	10.52

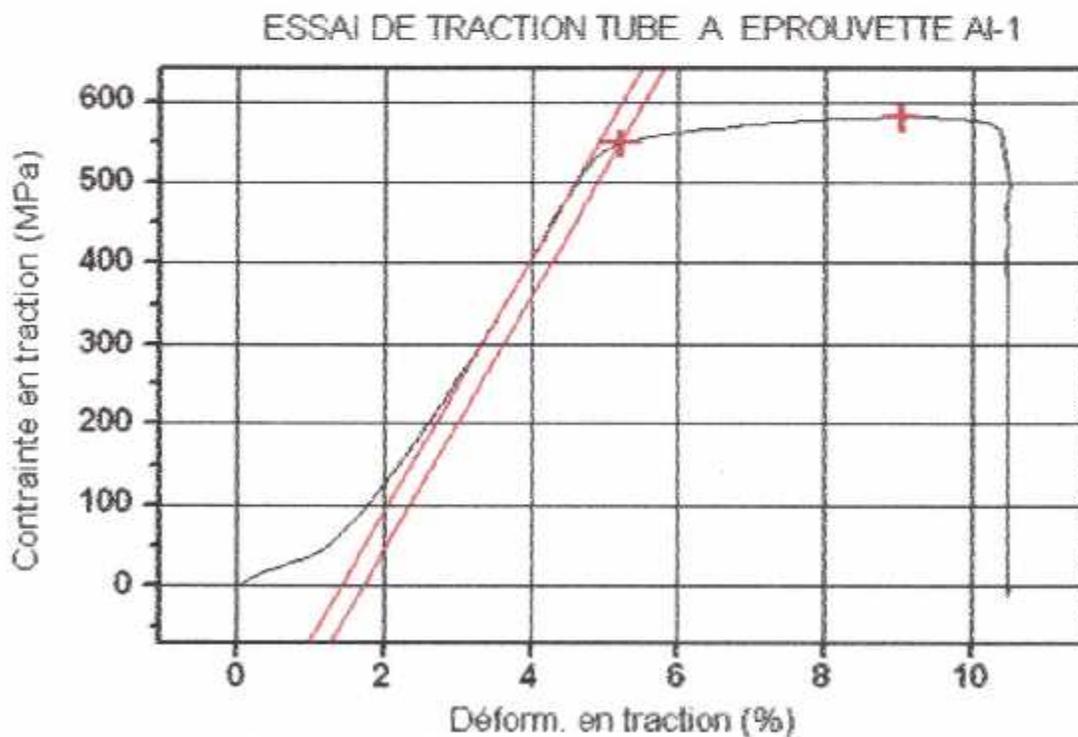


Figure (IV.3) Courbe de traction pour l'Aluminium 7075.

❖ **Essai N° 2 :** (essai à vide)

c) **L'Acier 304-L :**

RAPPORT D'ESSAI N° 2

Essai à vide

Vitesse de déplacement : 9,6 mm/min

Eprouvette : N°3

➤ **Position de la rupture :** Acier 304-L

➤ **Grandeurs mesurées et calculées :**

Position de la rupture	Fe [kN]	Fm [kN]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Module de Young E (Mpa)
304-L	39,121	76,42	321,44	510,15	7517,51

S ₀ [mm ²]	A (%)
121,706	40,52

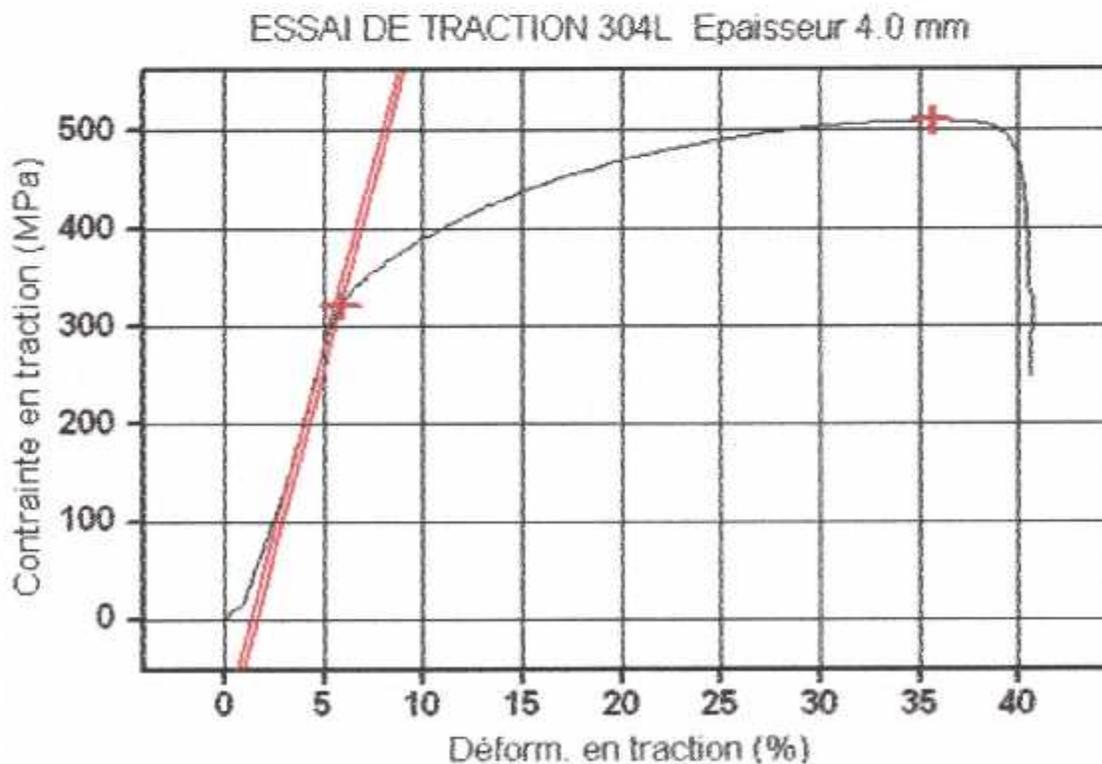


Figure (IV.4) Courbe de traction pour l'acier 304-L d'épaisseur 4mm.

d) L'Acier 304-L :

Pour cet essai à vide les résultats et la courbe de traction ne sont pas enregistrés par le micro car il y'avait un problème dans le logiciel « Merlin », et on n'a pas d'autre échantillon pour refaire l'expérience.

➤ Résultats obtenus :

Les courbes obtenues présentent toutes la même allure c'est-à-dire elles possèdent toutes trois (03) zones :

Une partie presque linéaire qui correspond au domaine élastique, suivi d'un autre domaine plastique qui a l'allure d'une parabole.

Durant la déformation élastique initiale et pour les faibles taux de déformations plastiques l'allongement de l'éprouvette s'accompagne d'une contraction homogène sur toute la longueur de l'échantillon.

À partir d'un taux de déformation critique correspondant au maximum observé dans les courbes (contrainte – déformation), la contraction de la section cesse d'être homogène .On observe que celle-ci devient plus importante de façon bien définie en un endroit précis de l'éprouvette. A cet emplacement, la section locale de l'éprouvette diminue de manière inhomogène qui est le phénomène de striction.

La résistance de l'éprouvette qui est proportionnelle à sa section diminue également.

La striction apparaît donc lorsque la contrainte nominale dépasse la valeur maximale (R_m) de la courbe de traction. Cette valeur correspond donc à la charge maximum supportée par l'éprouvette déformée de manière homogène.

❖ **Essai N° 3** : (essai avec paliers) :

e) **L'Aluminium 2024** :

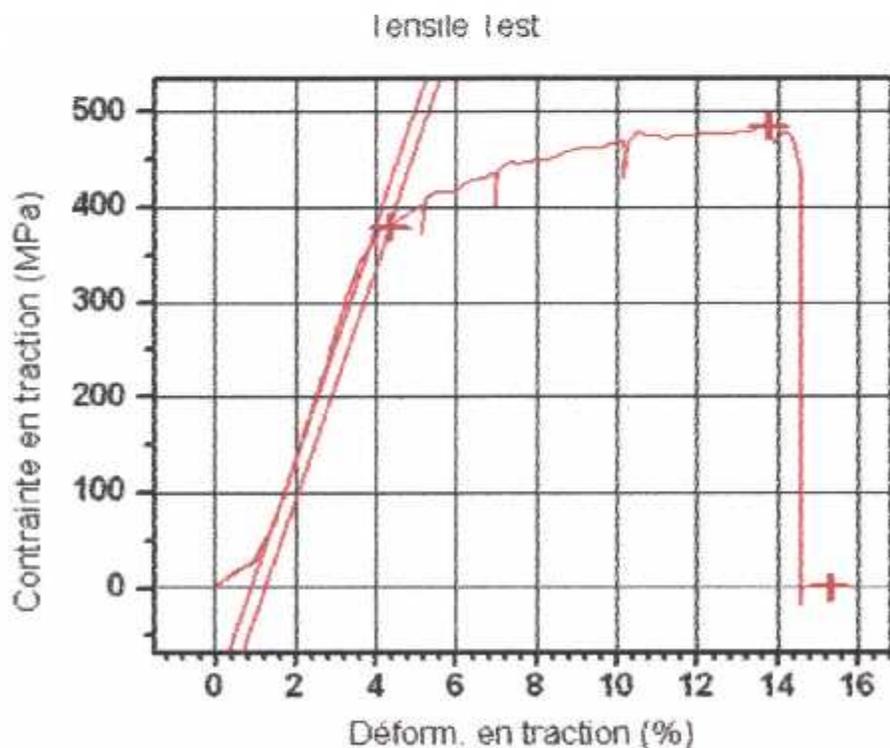
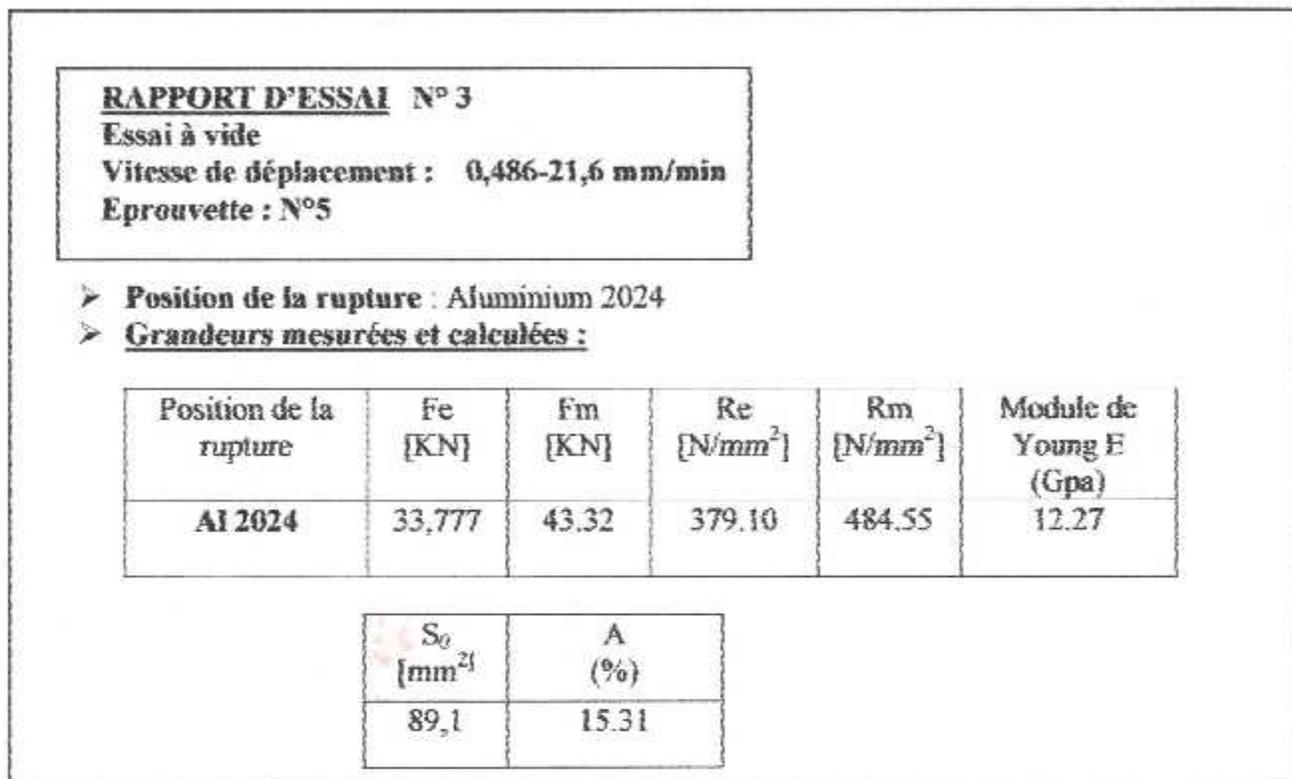


Figure (VL5) Courbe de traction pour l'Al 2024 avec paliers.

➤ **Analyse de l'évolution de l'impédance en fonction des propriétés mécaniques :**

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $Z=f(p)$ pour chaque point (on a 5 points), alors 5 courbes, on a choisit seulement 2 courbes car toutes les courbes ont la même allure.

On a pris deux fréquences 1Kh et 5 Kh, mais comme les courbes obtenues en utilisant la fréquence 5Kh ne permettent pas un diagnostic dû au phénomène de peau alors on travaille seulement avec la fréquence 1Kh pour les échantillons d'Aluminium.

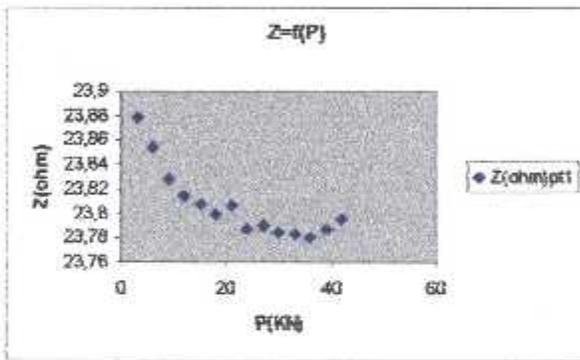


Figure (VL6) $Z=f(P)$ pour point 1

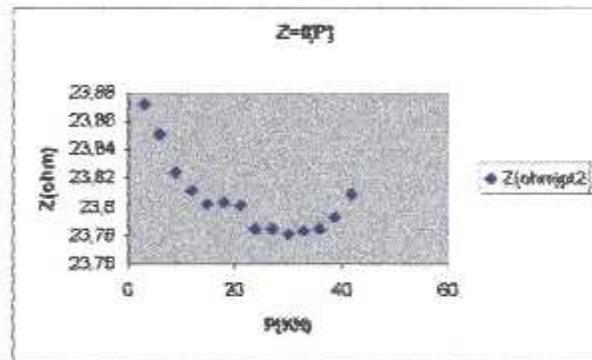


Figure (VL7) $Z=f(P)$ pour point 2

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\Delta\ell)$:

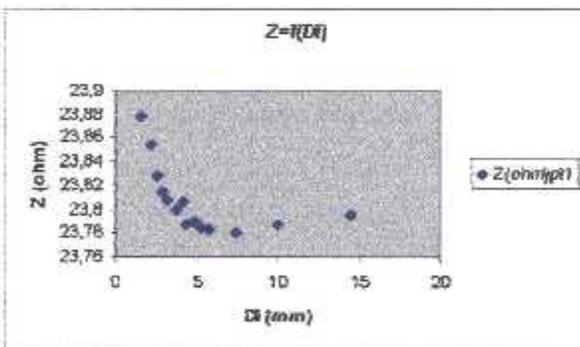


Figure (IV.8) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 1

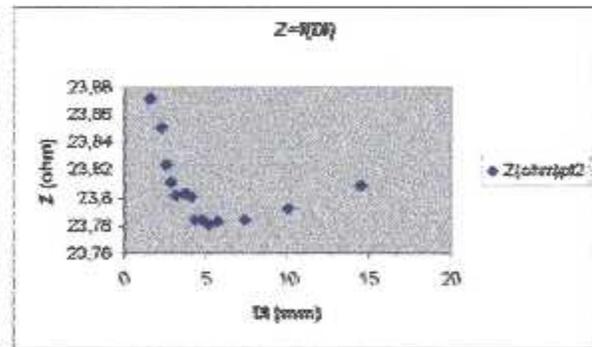


Figure (IV.9) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 2

Sur la contrainte:

On doit tracer la courbe : $Z=f(\Delta\sigma)$:

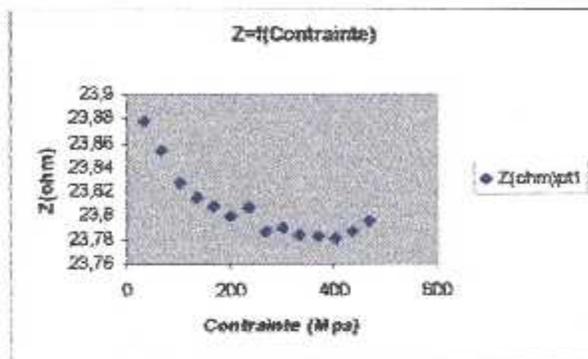


Figure (VI.10) $Z=f(\Delta\sigma)$ pour point 1

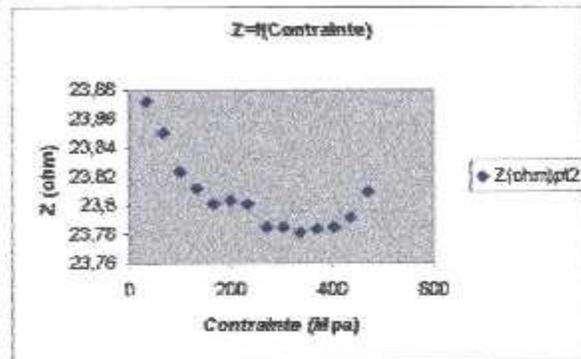


Figure (VI.11) $Z=f(\Delta\sigma)$ pour point 2

Sur la déformation:

On doit tracer la courbe : $Z=f(A)$:

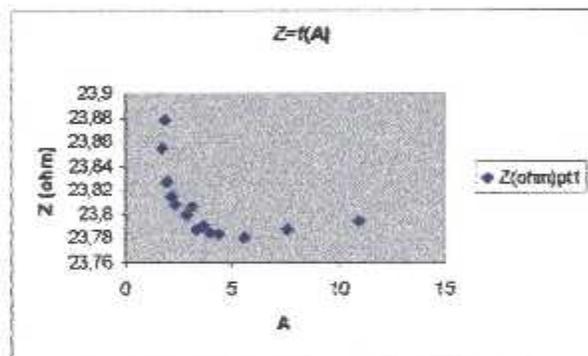


Figure (VI.12) $Z=f(A)$ pour point 1

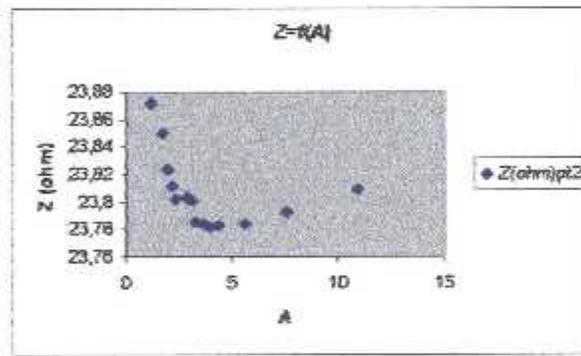


Figure (VI.13) $Z=f(A)$ pour point 2

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $Z=f(E)$:

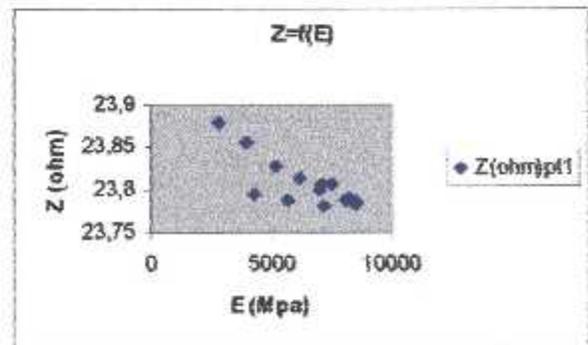


Figure (VI.14) $Z=f(E)$ pour point 1

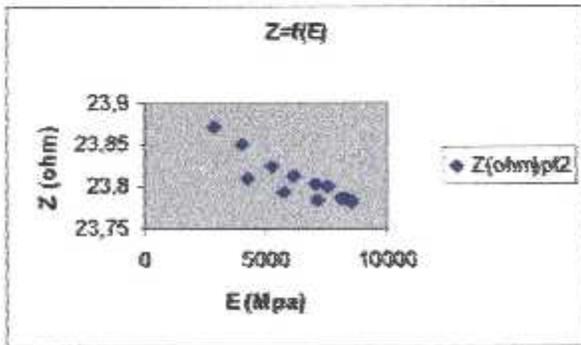


Figure (VI.15) $Z=f(E)$ pour point 2

Sur la section :

On doit tracer la courbe : $Z=f(S)$:

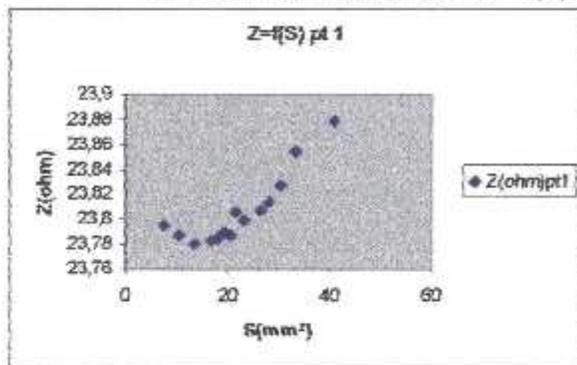


Figure (VL16) $Z=f(S)$ pour point 1

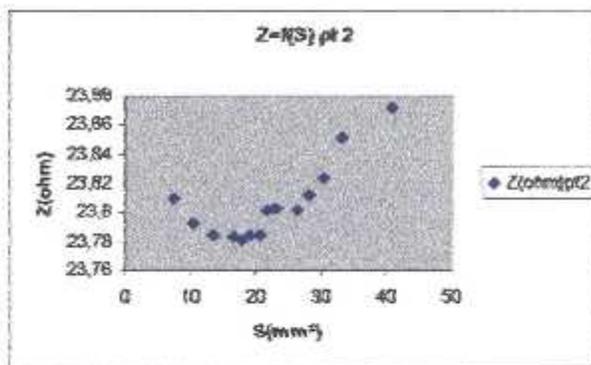


Figure (VL17) $Z=f(S)$ pour point 2

➤ Analyse de l'évolution de la phase en fonction des propriétés mécaniques :

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(P)$:

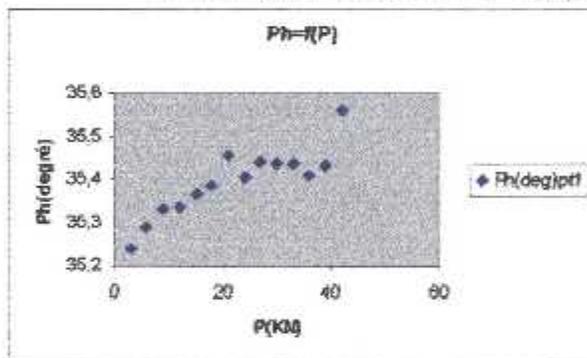


Figure (VL18) $\theta=f(P)$ pour point 1

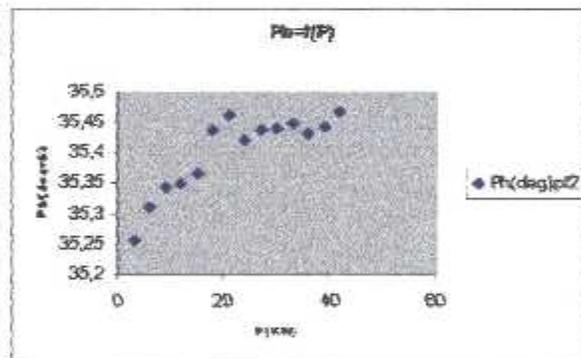


Figure (VL19) $\theta=f(P)$ pour point 2

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(\Delta l)$:

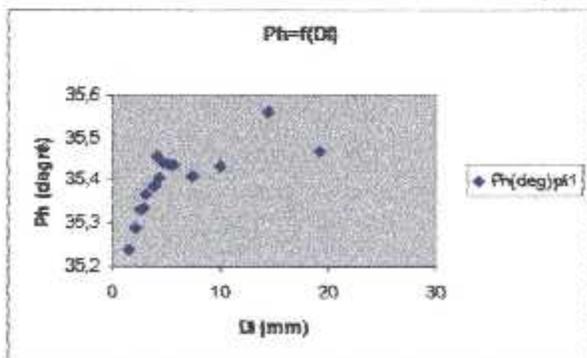


Figure (IV.20) $\theta=f(\Delta l)$ pour point 1

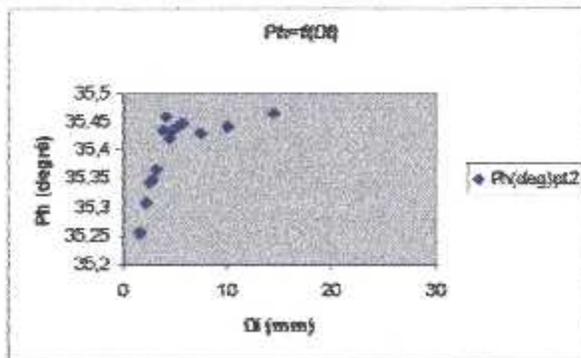


Figure (VL21) $\theta=f(\Delta l)$ pour point 2

Sur la contrainte :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(\sigma)$

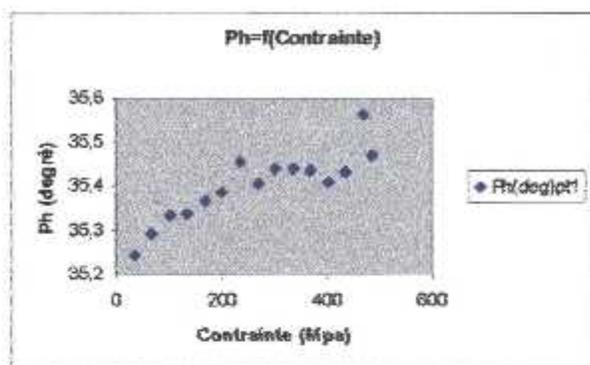


Figure (VI.22) $\theta = f(\sigma)$ pour point 1

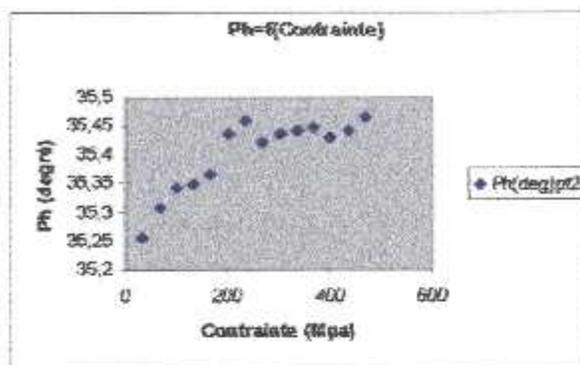


Figure (VI.23) $\theta = f(\sigma)$ pour point 2

Sur la déformation :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(A)$

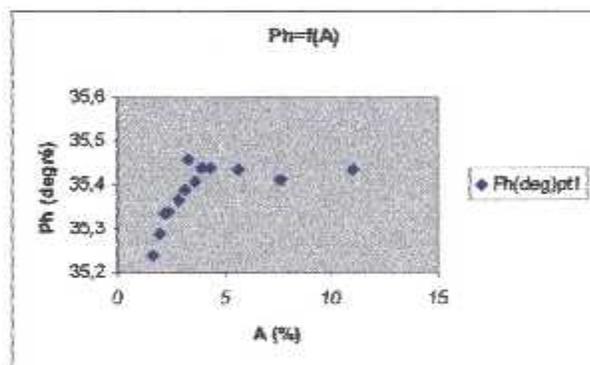


Figure (VI.24) $\theta = f(A)$ pour point 1

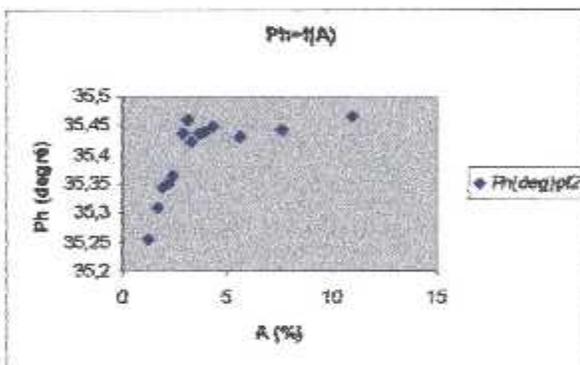


Figure (VI.25) $\theta = f(A)$ pour point 2

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(E)$

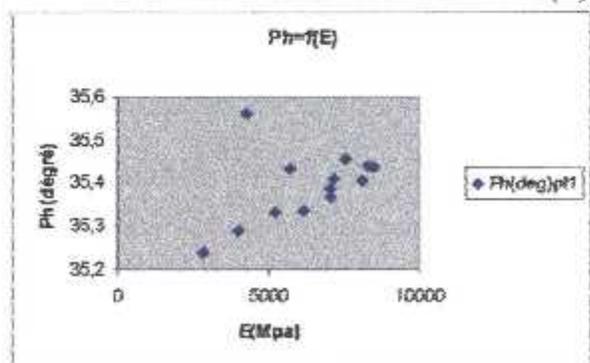


Figure (VI.26) $\theta = f(E)$ pour point 1

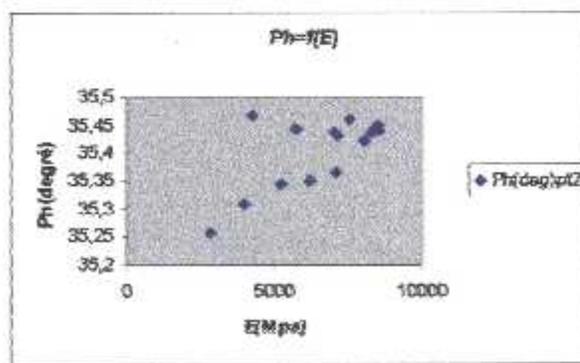


Figure (VI.27) $\theta = f(E)$ pour point 2

Sur la section :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(S)$:

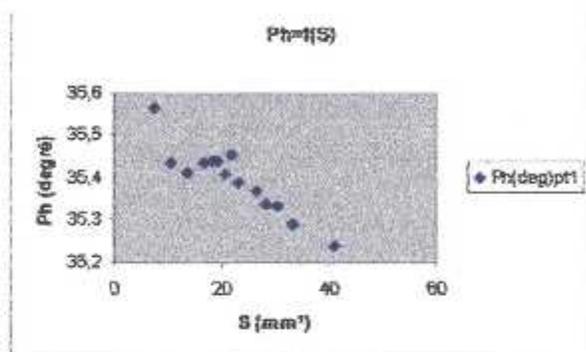


Figure (VL28) $\theta = f(S)$ pour point 1

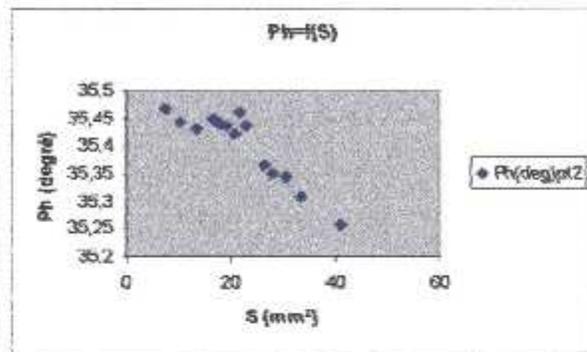


Figure (VL29) $\theta = f(S)$ pour point 2

➤ Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques :

- La charge en fonction de la déformation :

On doit tracer la courbe $P = f(A)$:

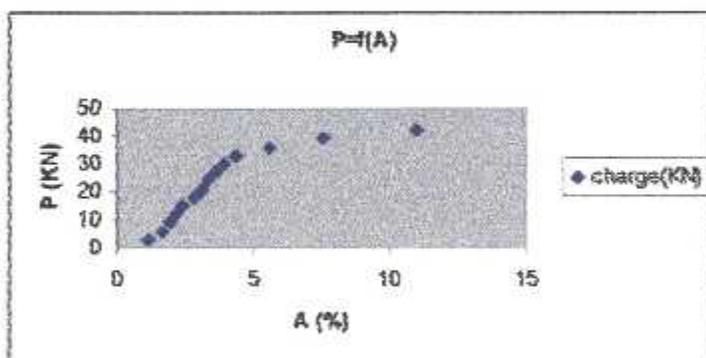


Figure (VL30) $P = f(A)$

- La charge en fonction de l'allongement :

On doit tracer la courbe $P=f(\Delta\ell)$:

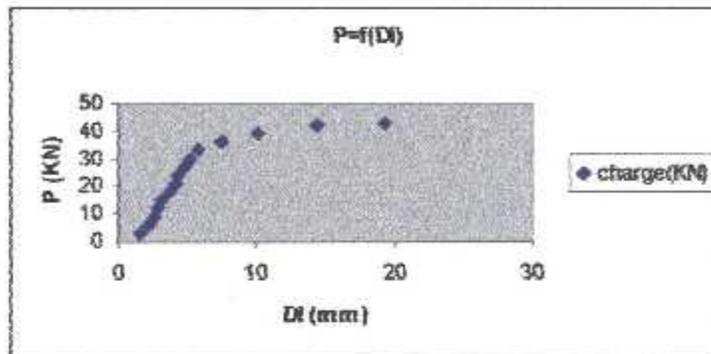


Figure (VL31) $P=f(\Delta\ell)$

- La contrainte en fonction de l'allongement :

On doit tracer la courbe $\sigma =f(\Delta\ell)$:

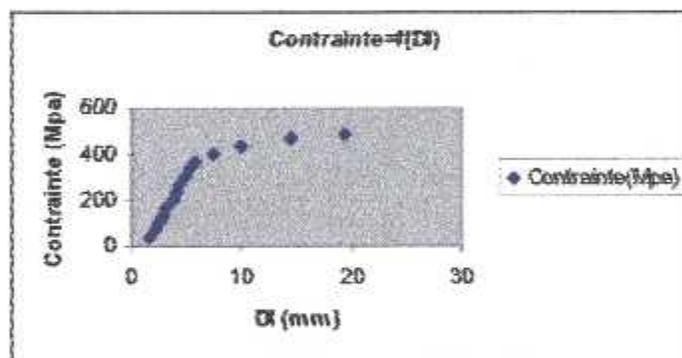


Figure (VL32) $\sigma =f(\Delta\ell)$

f) L'Aluminium 7075 :

RAPPORT D'ESSAI N° 3

Essai à vide

Vitesse de déplacement : 0,396-17,6 mm/min

Eprouvette : N°6

➤ **Position de la rupture :** Aluminium 7075

➤ **Grandeurs mesurées et calculées :**

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Module de Young E (Gpa)
Al 7075	33,658	35,23	553,00	581,69	15,10

S ₀ [mm ²]	A (%)
60,865	12,58

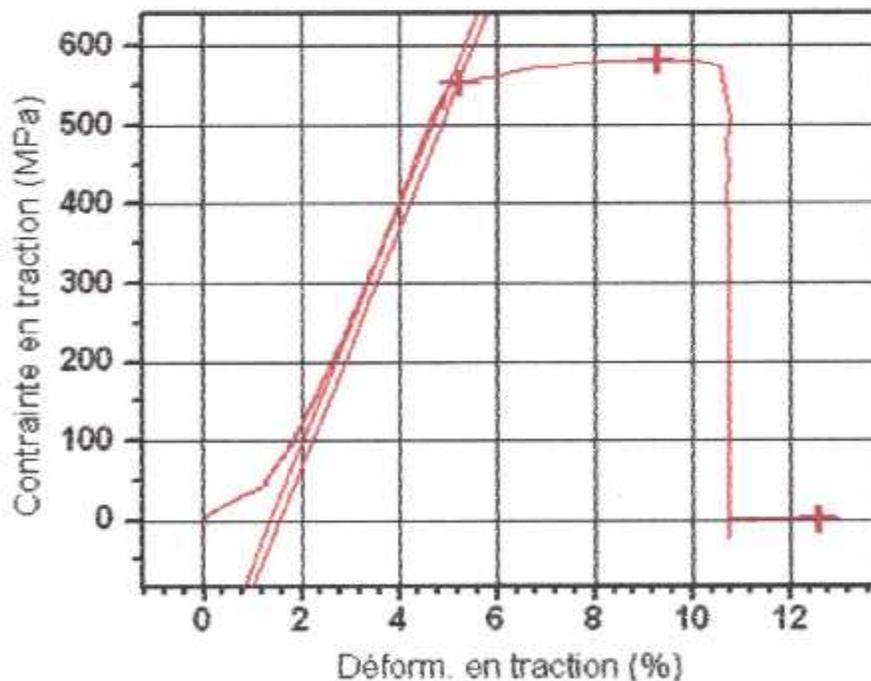


Figure (VI.33) Courbe de traction pour l'Al 7075 avec paliers.

➤ Analyse de l'évolution de l'impédance en fonction des propriétés mécaniques :

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $Z=f(P)$.

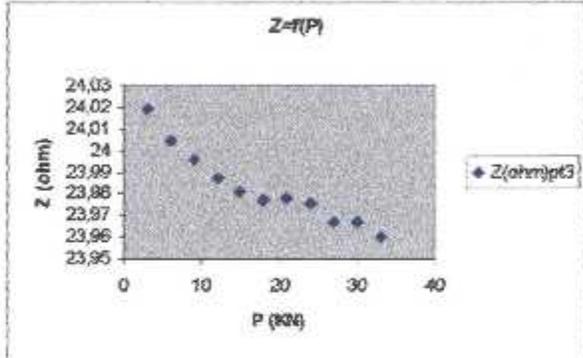


Figure (VL34) $Z=f(P)$ pour point 3

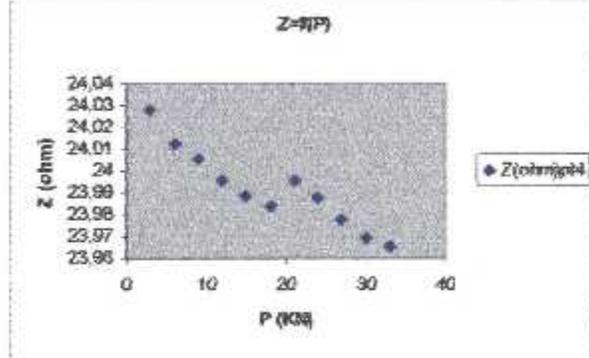


Figure (VL35) $Z=f(P)$ pour point 4

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\Delta\ell)$.

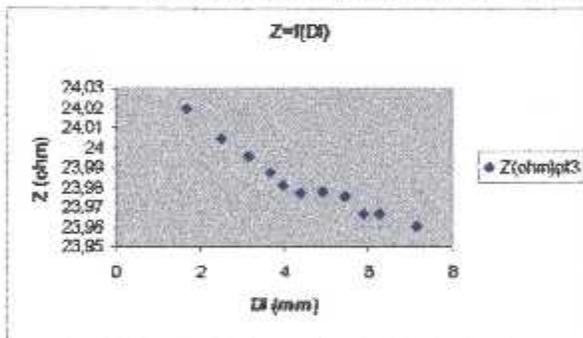


Figure (VL36) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 3

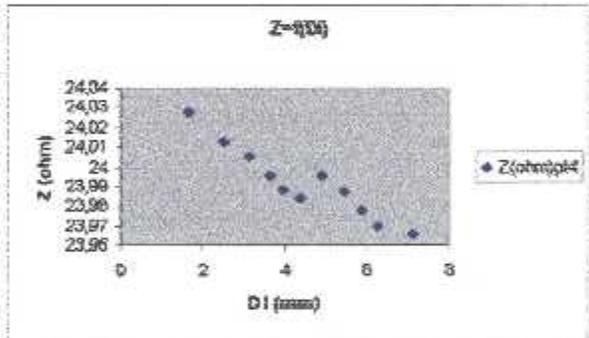


Figure (VL37) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 4

Sur la contrainte:

On doit tracer la courbe : $Z=f(\sigma)$

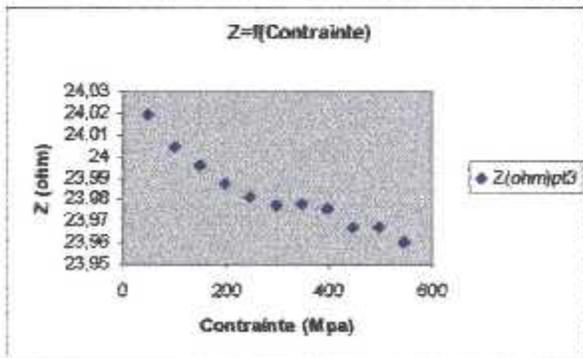


Figure (VL38) $Z=f(\sigma)$ pour point 3

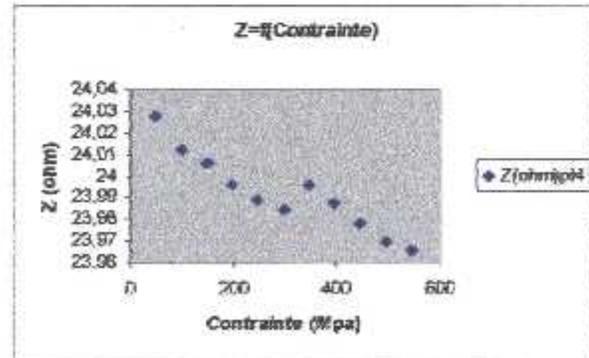


Figure (VL39) $Z=f(\sigma)$ pour point 4

Sur la déformation:

On doit tracer la courbe : $Z=f(A)$.

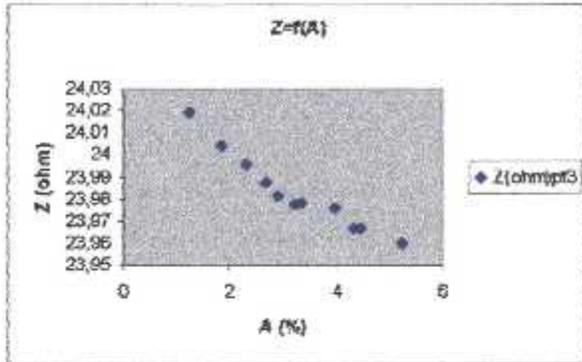


Figure (VI.40) $Z=f(A)$ pour point 3

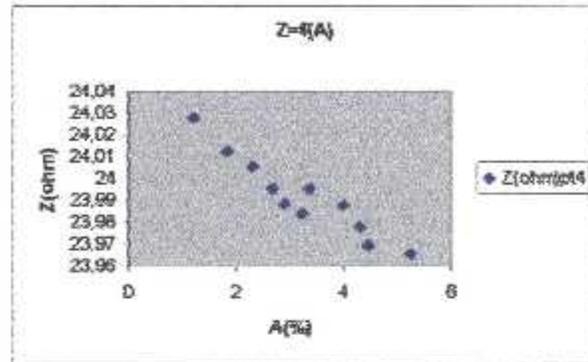


Figure (VI.41) $Z=f(A)$ pour point 4

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $Z=f(E)$

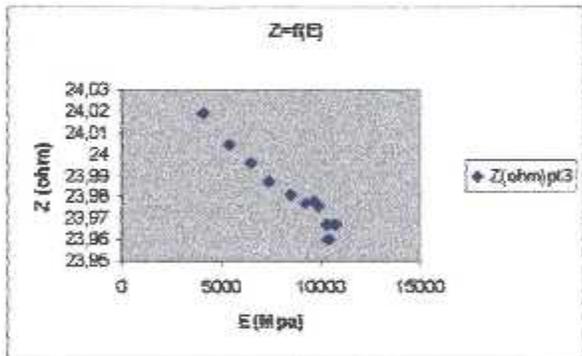


Figure (VI.42) $Z=f(E)$ pour point 3

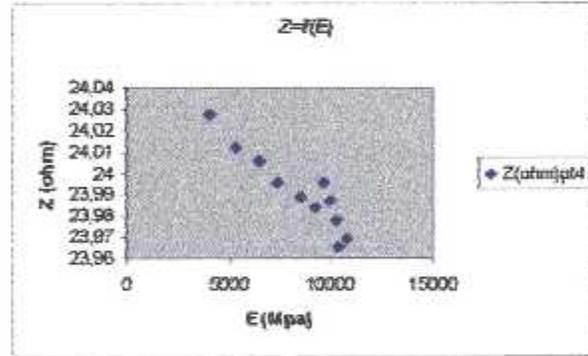


Figure (VI.43) $Z=f(E)$ pour pt 4

Sur la section

On doit tracer la courbe : $Z=f(S)$

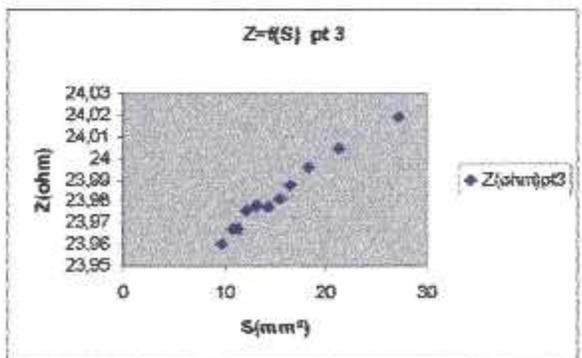


Figure (VI.44) $Z=f(S)$ pour point 3

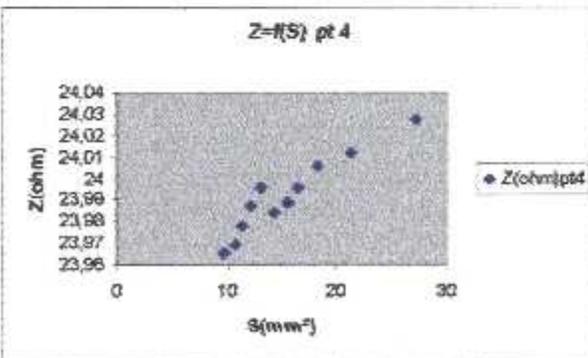


Figure (VI.45) $Z=f(S)$ pour point 4

➤ Analyse de l'évolution de la phase en fonction des propriétés mécaniques :

Sur la charge:

On doit tracer la courbe : $\theta = f(P)$

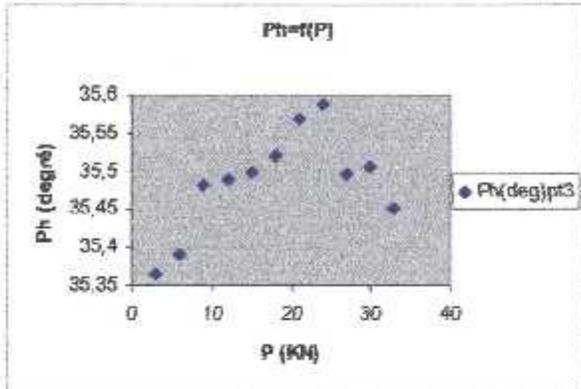


Figure (VL.46) $\theta = f(P)$ pour point 3

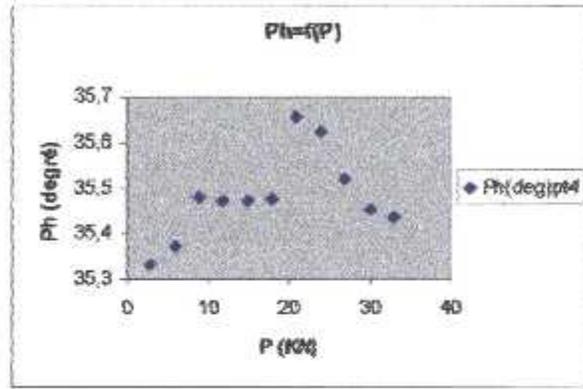


Figure (VL.47) $\theta = f(P)$ pour point 4

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(\Delta \ell)$

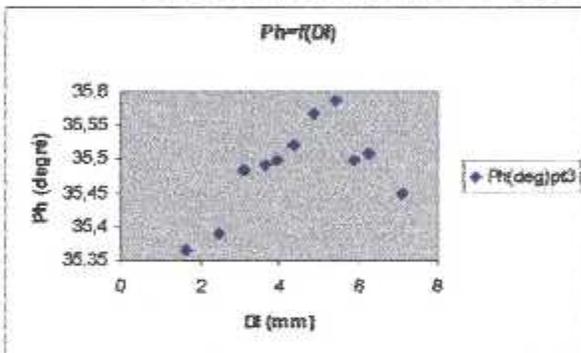


Figure (VL.48) $\theta = f(\Delta \ell)$ pour point 3

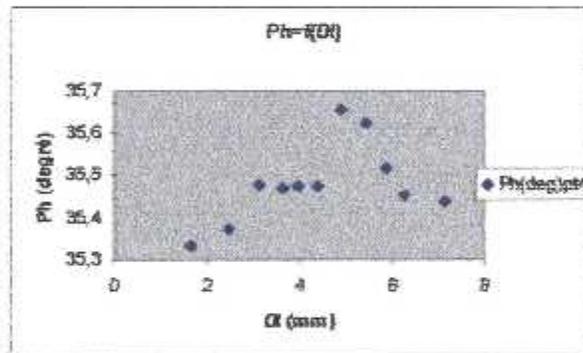


Figure (VL.49) $\theta = f(\Delta \ell)$ pour point 4

Sur la contrainte :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(\sigma)$

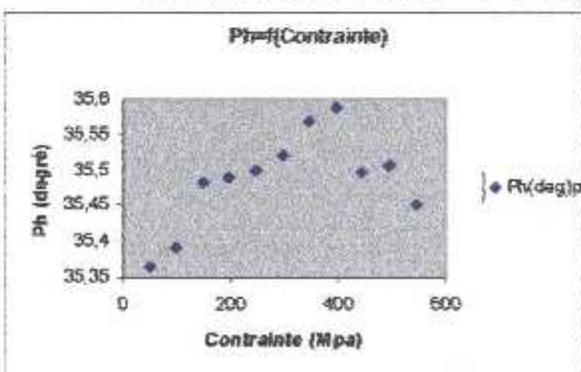


Figure (VL.50) $\theta = f(\sigma)$ pour point 3

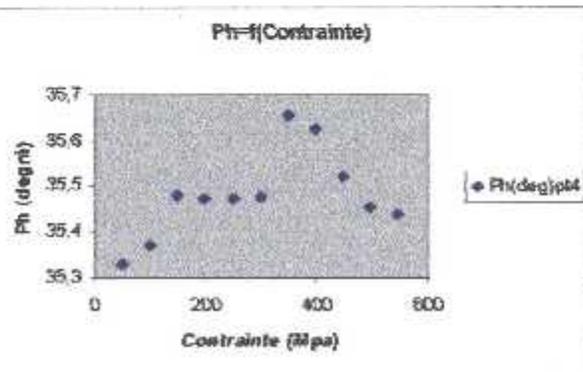


Figure (VL.51) $\theta = f(\sigma)$ pour point 4

Sur la déformation :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(A)$

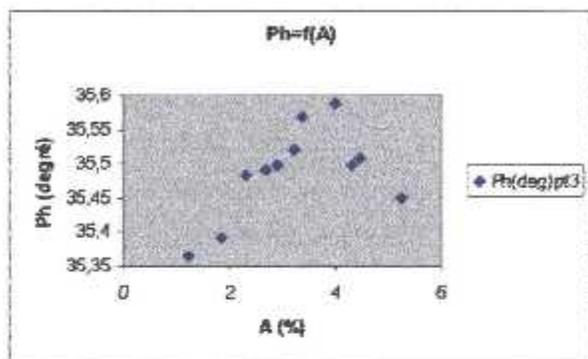


Figure (VL52) $\theta = f(A)$ pour point 3

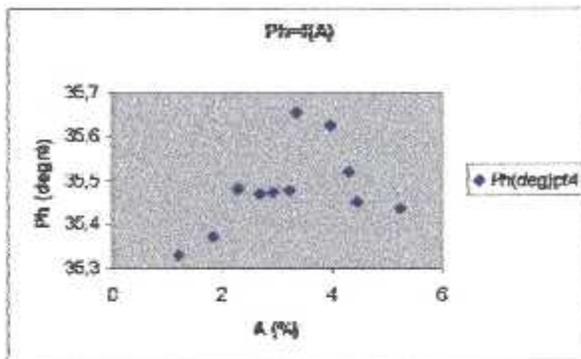


Figure (VL53) $\theta = f(A)$ pour point 4

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(E)$

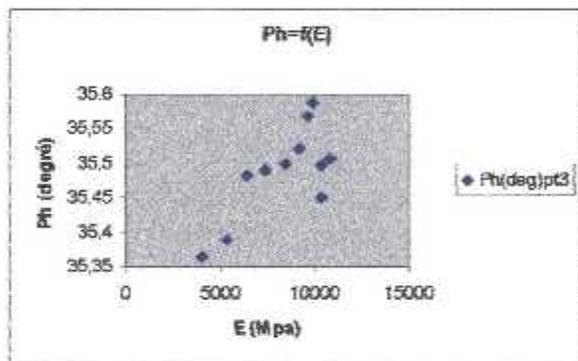


Figure (VL54) $\theta = f(E)$ pour point 3

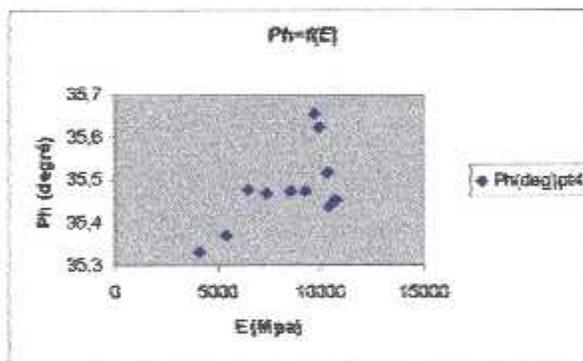


Figure (VL55) $\theta = f(E)$ pour point 4

Sur la surface :

On doit tracer la courbe : $\theta = f(S)$

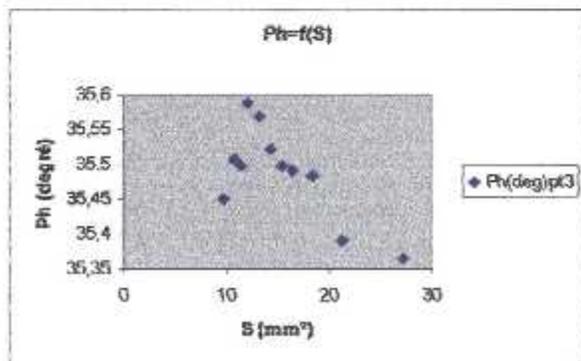


Figure (VL56) $\theta = f(S)$ pour point 3

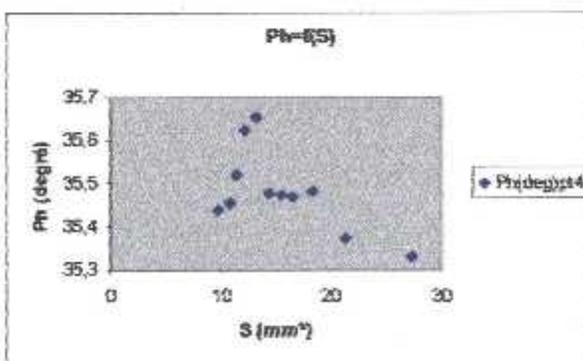


Figure (VL57) $\theta = f(S)$ pour point 4

➤ **Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques :**

• **La charge en fonction de la déformation :**

On doit tracer la courbe $P=f(A)$:

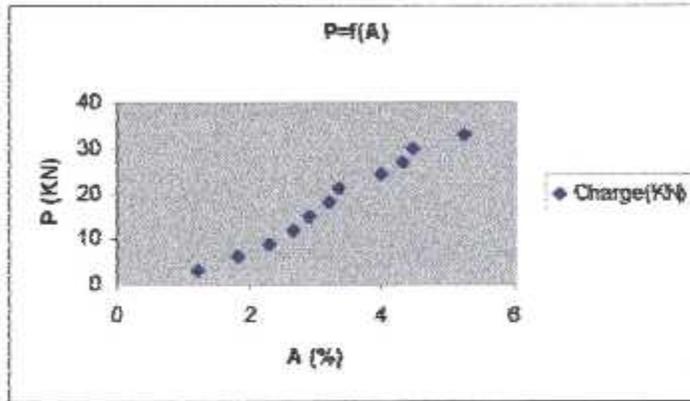


Figure (VL58) $P=f(A)$

• **La charge en fonction de l'allongement :**

On doit tracer la courbe $P=f(\Delta l)$:

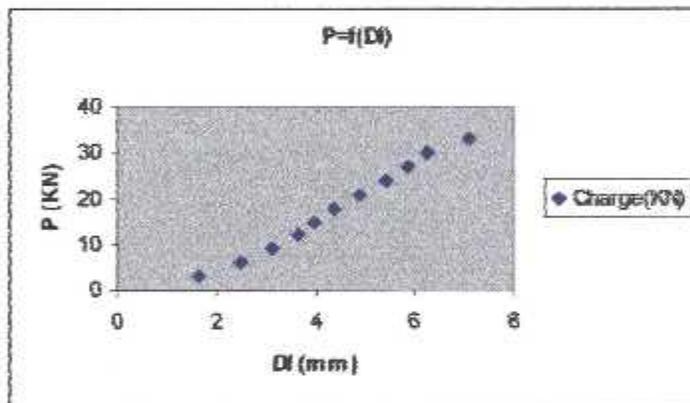


Figure (VL59) $P=f(\Delta l)$

• **La contrainte en fonction de l'allongement :**

On doit tracer la courbe $\sigma = f(\Delta l)$:

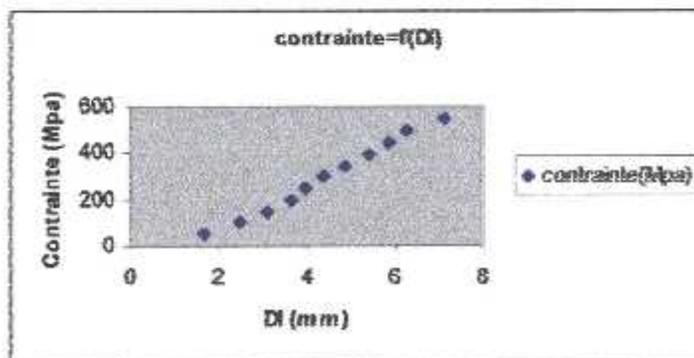


Figure (VL60) $\sigma = f(\Delta l)$

❖ **Essai N° 4** : (essai avec paliers) :

g) **L'Acier 304-L**:

RAPPORT D'ESSAI N° 4

Essai à vide

Vitesse de déplacement : 9,6 mm/min

Eprouvette : N°7

➤ **Position de la rupture** : Acier 304-L

➤ **Grandeurs mesurées et calculées** :

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Module de Young E (Mpa)
Acier 304-L	52,215	78,87	429,03	648,05	14000

S ₀ [mm ²]	A (%)
121,706	40,918

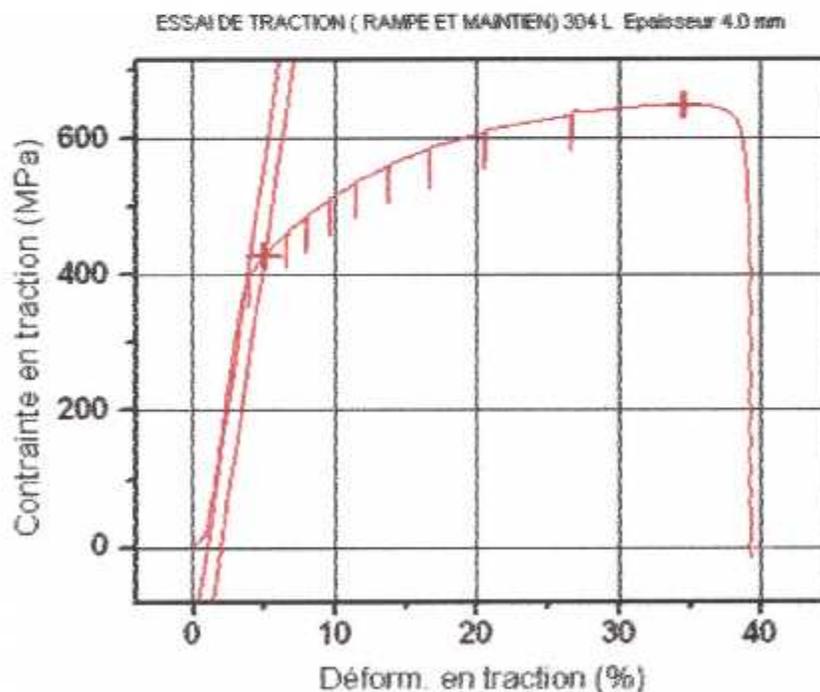


Figure (VL61) Courbe de traction pour l'Acier 304-L d'épaisseur 4mm avec paliers.

➤ **Analyse de l'évolution de l'impédance en fonction des propriétés mécaniques :**

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $Z=f(P)$ pour chaque point (on a 4 points), alors 4 courbes, on a choisis deux points seulement puisque toutes les courbes prennent le même allure.

On a pris deux fréquences 700h et 5 Kh, mais comme les courbes obtenues en utilisant la fréquence 5Kh ne donnent pas de bonne informations alors on travaille seulement avec la fréquence 700 h pour les échantillons d'Acier.

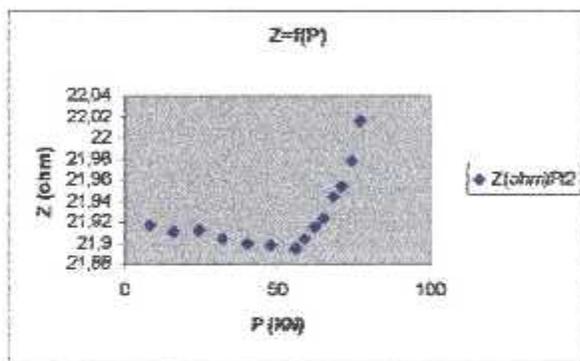


Figure (VL62) $Z=f(P)$ pour point 2

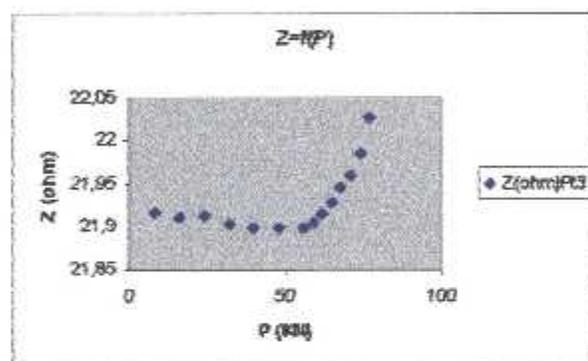


Figure (VL63) $Z=f(P)$ pour point 3

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\Delta\ell)$

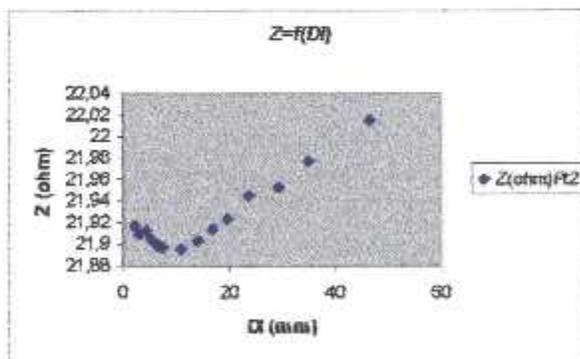


Figure (VL64) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 2

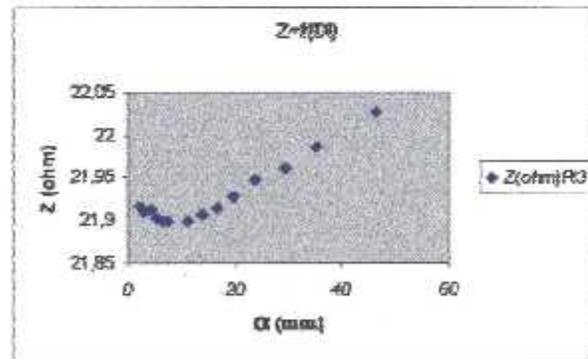


Figure (VL65) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 3

Sur la contrainte :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\sigma)$

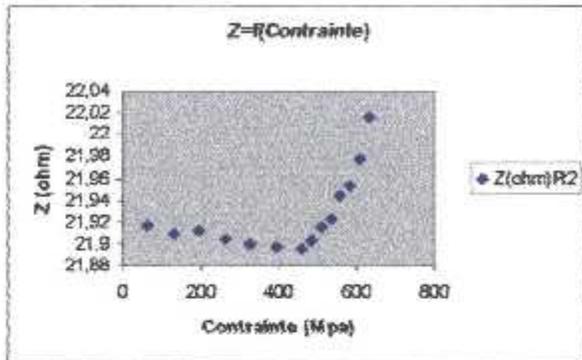


Figure (VL66) $Z=f(\sigma)$ pour point 2

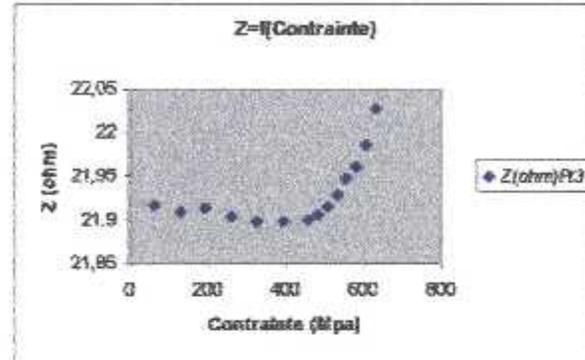


Figure (VL67) $Z=f(\sigma)$ pour point 3

Sur la déformation :

On doit tracer la courbe : $Z=f(A)$

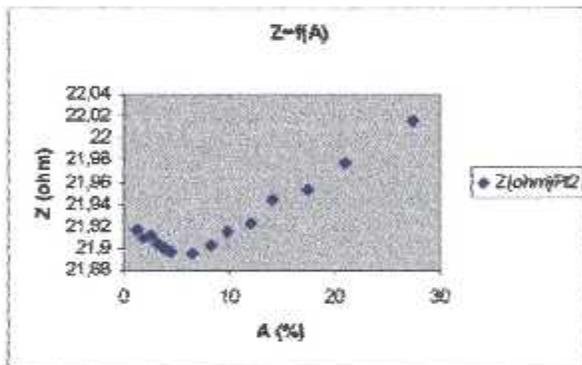


Figure (VL68) $Z=f(A)$ pour point 2

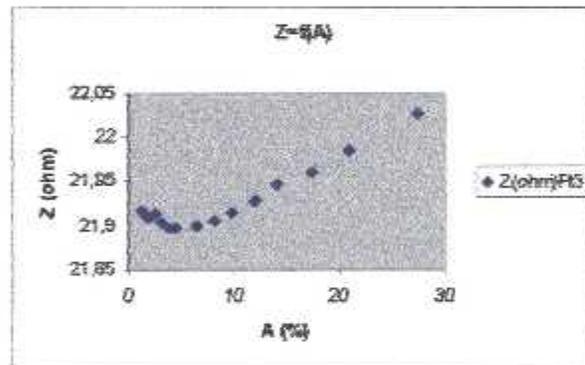


Figure (VL69) $Z=f(A)$ pour point 3

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $Z=f(E)$

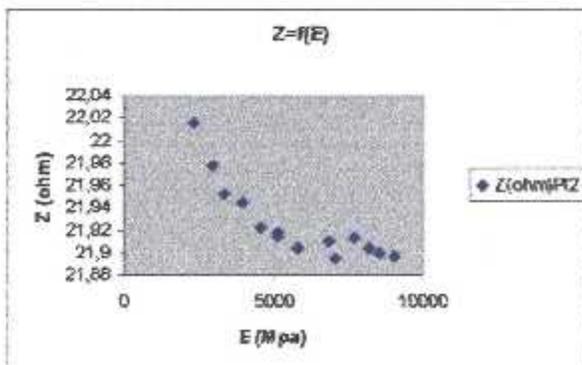


Figure (VL70) $Z=f(E)$ pour point 2

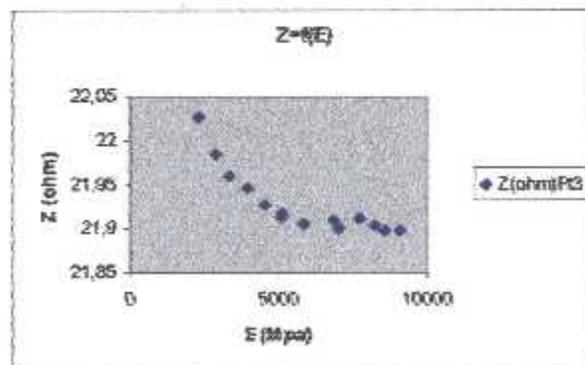


Figure (VL71) $Z=f(E)$ pour point 3

Sur la section

On doit tracer la courbe : $Z=f(S)$

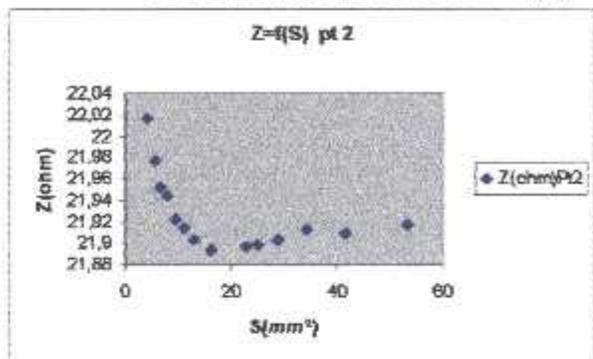


Figure (VI.72) $Z=f(S)$ pour point 2

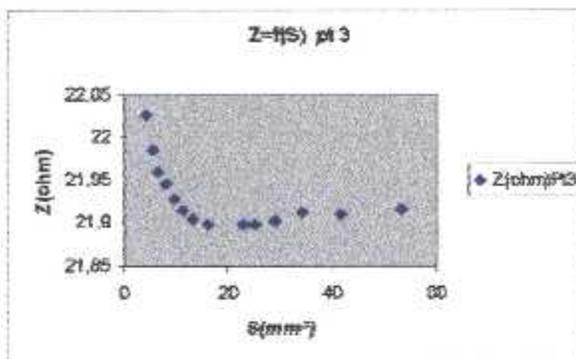


Figure (VI.73) $Z=f(S)$ pour point 3

➤ Analyse de l'évolution de la phase en fonction des propriétés mécaniques :

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(P)$.

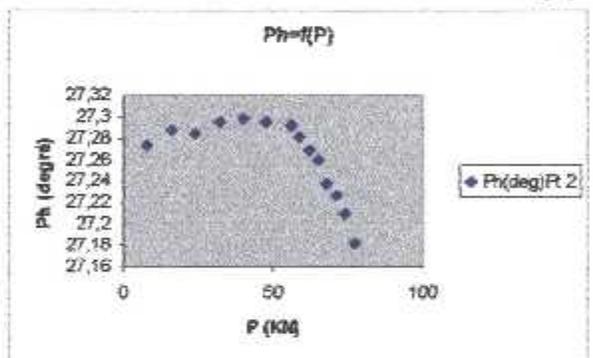


Figure (VI.74) $\theta=f(P)$ pour point 2

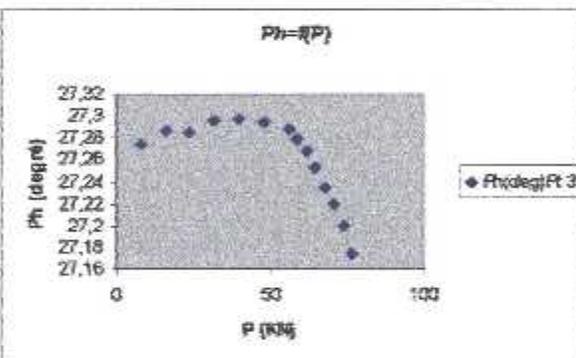


Figure (VI.75) $\theta=f(P)$ pour point 3

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(\Delta\ell)$.

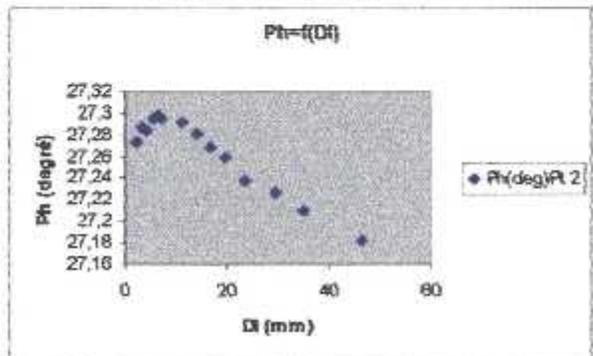


Figure (VI.76) $\theta=f(\Delta\ell)$ pour point 2

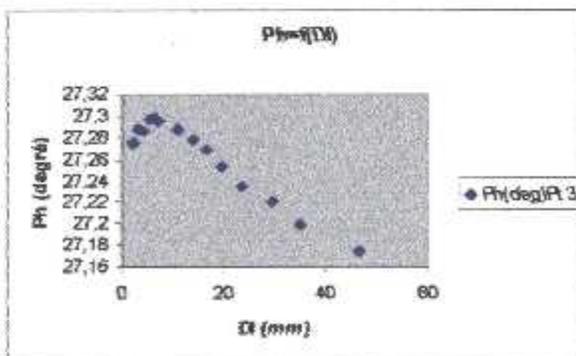


Figure (VI.77) $\theta=f(\Delta\ell)$ pour point 3

Sur la contrainte :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(\sigma)$.

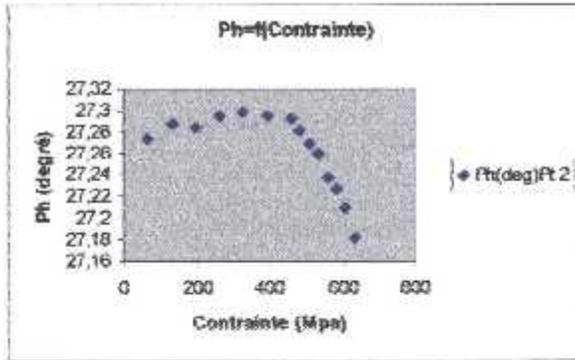


Figure (VI.78) $\theta=f(\sigma)$ pour point 2

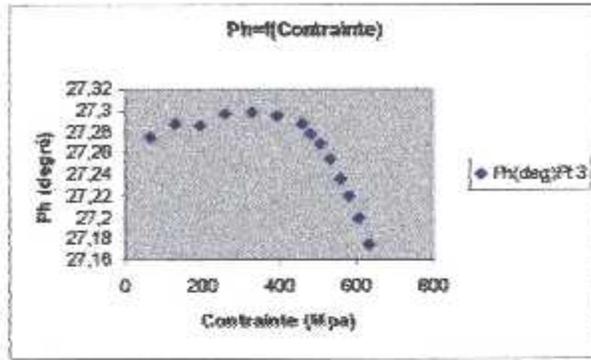


Figure (VI.79) $\theta=f(\sigma)$ pour point 3

Sur la déformation :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(A)$

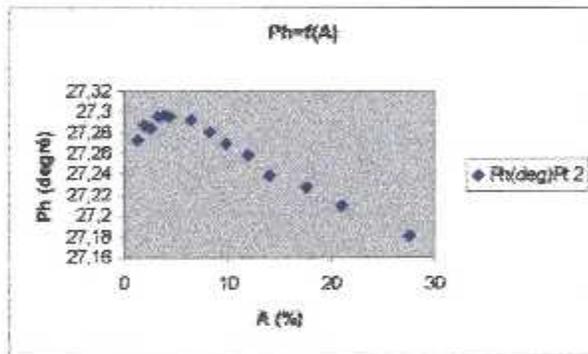


Figure (VI.80) $\theta=f(A)$ pour point 2

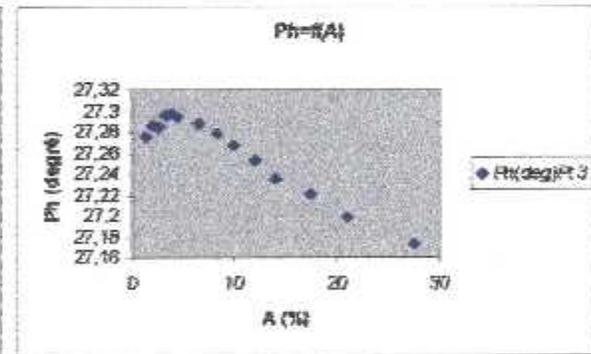


Figure (VI.81) $\theta=f(A)$ pour point 3

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(E)$

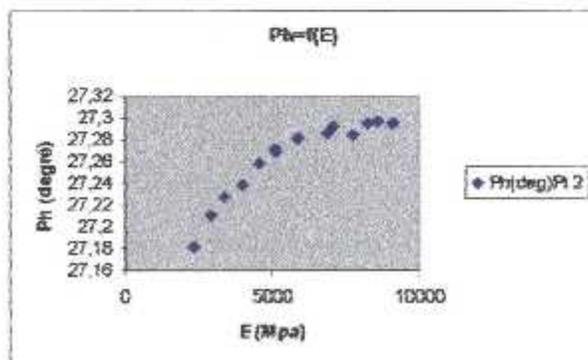


Figure (VI.82) $\theta=f(E)$ pour point 2

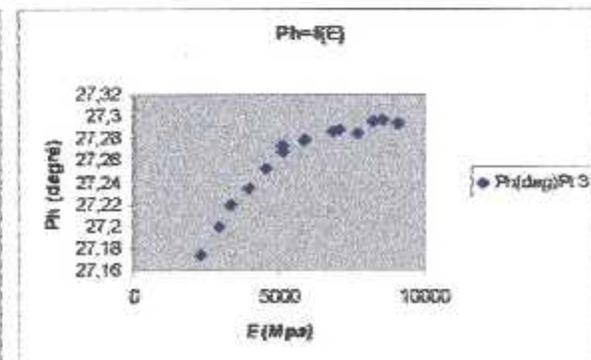


Figure (VI.83) $\theta=f(E)$ pour point 3

Sur la surface :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(S)$

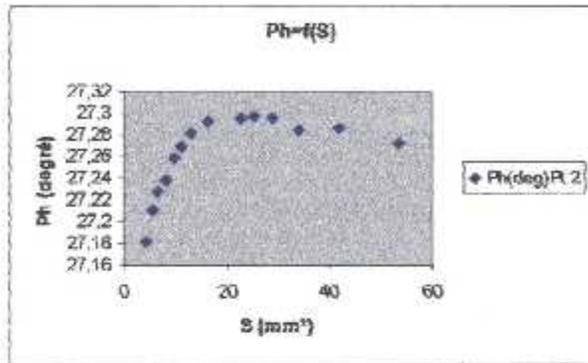


Figure (VL84) $\theta=f(S)$ pour point 2

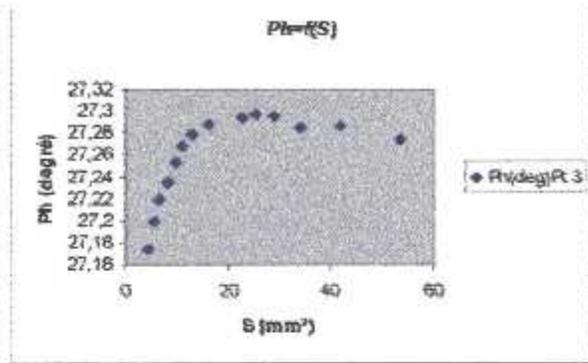


Figure (VL85) $\theta=f(S)$ pour point 3

➤ Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques :

- La charge en fonction de la déformation :

On doit tracer la courbe $P=f(A)$:

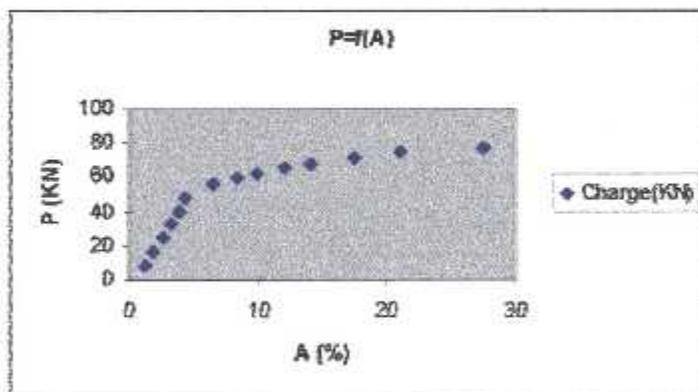


Figure (V.86) $P=f(A)$

- La charge en fonction de l'allongement :

On doit tracer la courbe $P=f(\Delta\ell)$:

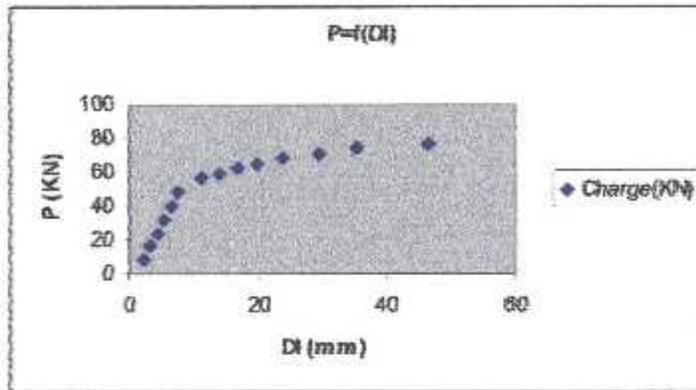


Figure (VL87) $P=f(\Delta\ell)$

- La contrainte en fonction de l'allongement :

On doit tracer la courbe $\sigma=f(\Delta\ell)$:

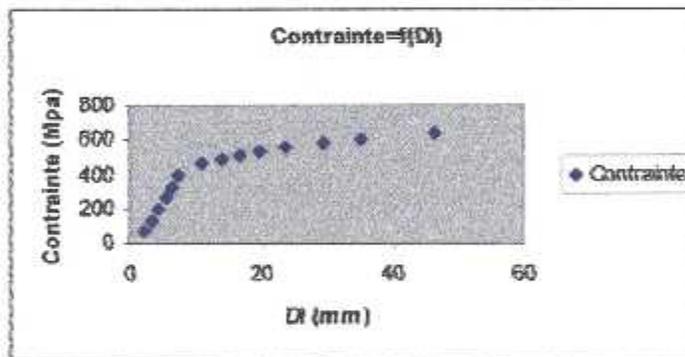


Figure (VL88) $\sigma=f(\Delta\ell)$

h) Acier 304-L:

RAPPORT D'ESSAI N° 4

Essai à vide

Vitesse de déplacement : 13,5 mm/min

Eprouvette : N°8

- Position de la rupture : Acier 304-L
- Grandeurs mesurées et calculées :

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Module de Young E (Mpa)
Acier 304-L	90,064	155,05	366,83	631,52	7494,41

S ₀ [mm ²]	A (%)
245,52	59,54

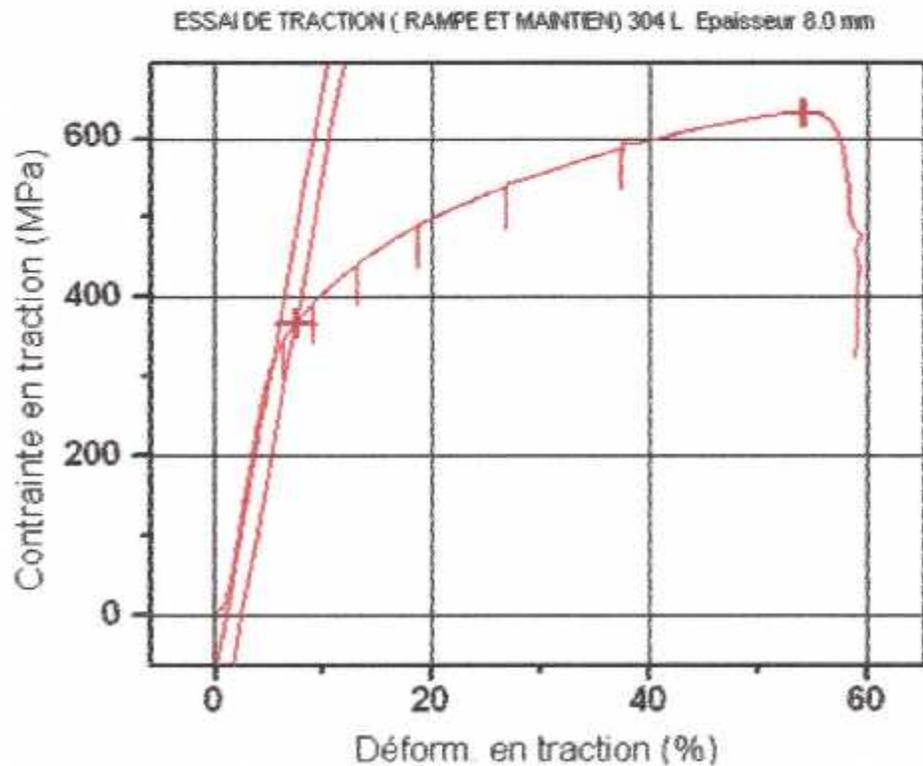


Figure (VL89) Courbe de traction pour l'Acier 304-L d'épaisseur 8mm avec paliers.

➤ **Analyse de l'évolution de l'impédance en fonction des propriétés mécaniques :**

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $Z=f(P)$

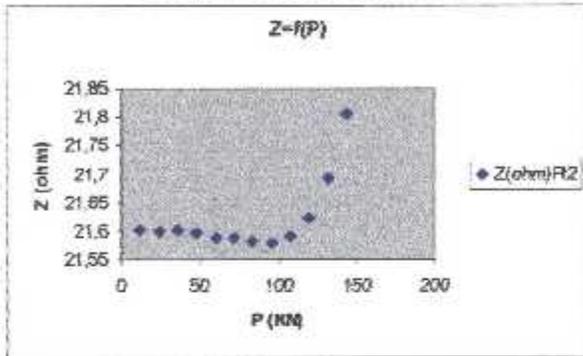


Figure (VI.90) $Z=f(P)$ pour point 2

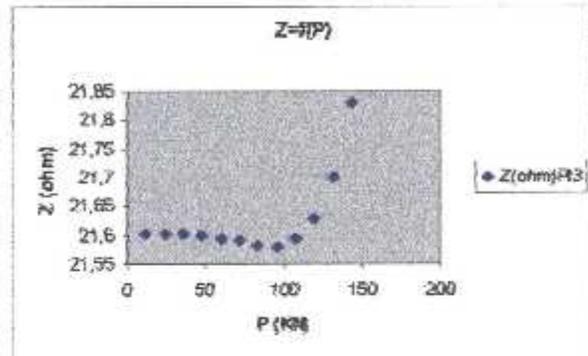


Figure (VI.91) $Z=f(P)$ pour point 3

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\Delta\ell)$

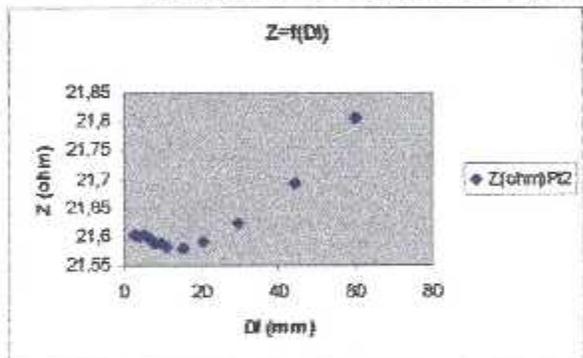


Figure (VI.92) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 2

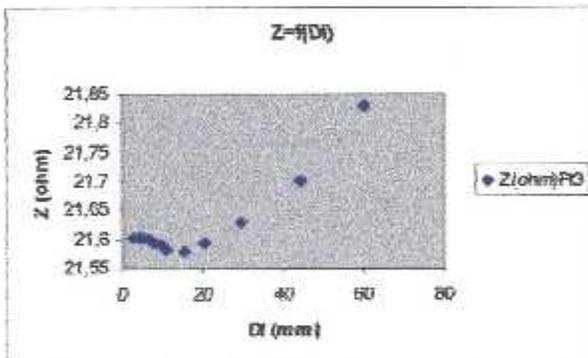


Figure (VI.93) $Z=f(\Delta\ell)$ pour point 3

Sur la contrainte :

On doit tracer la courbe : $Z=f(\sigma)$

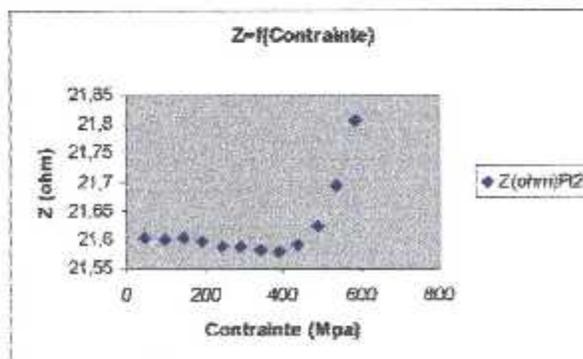


Figure (VI.94) $Z=f(\sigma)$ pour point 2

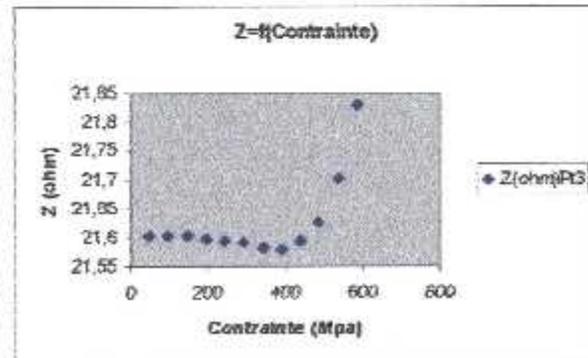


Figure (VI.95) $Z=f(\sigma)$ pour point 3

Sur la déformation :

On doit tracer la courbe : $Z=f(A)$

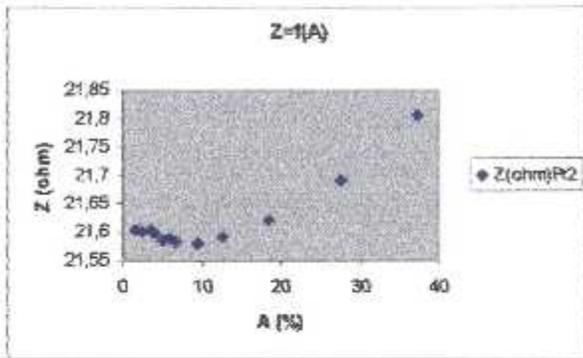


Figure (VI.96) $Z=f(A)$ pour point 2

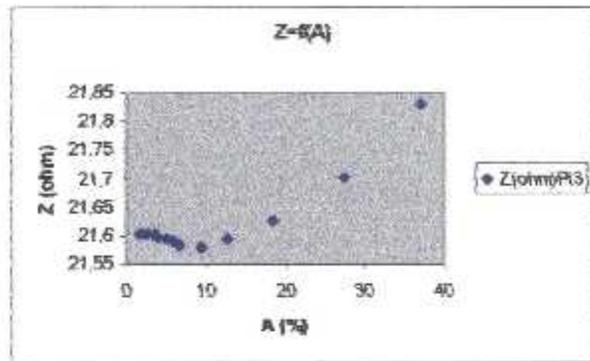


Figure (VI.97) $Z=f(A)$ pour point 3

Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $Z=f(E)$

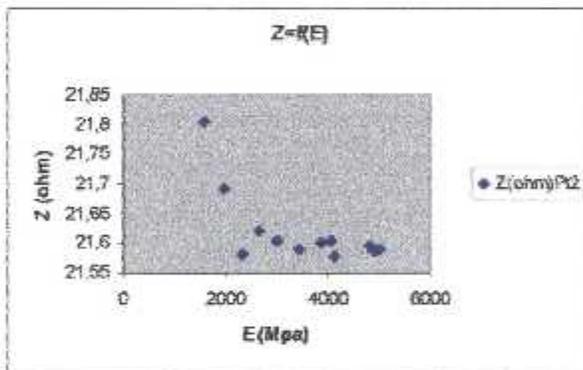


Figure (VI.98) $Z=f(E)$ pour point 2

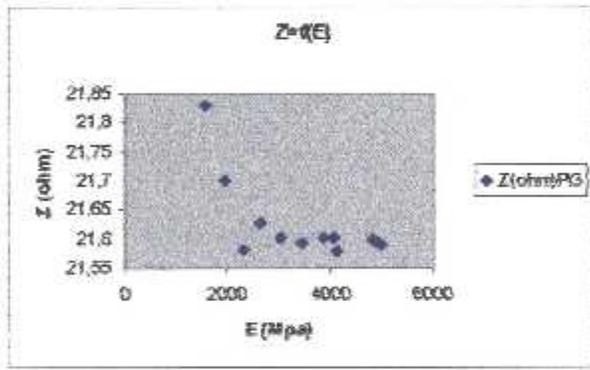


Figure (VI.99) $Z=f(E)$ pour point 3

Sur la section

On doit tracer la courbe : $Z=f(S)$

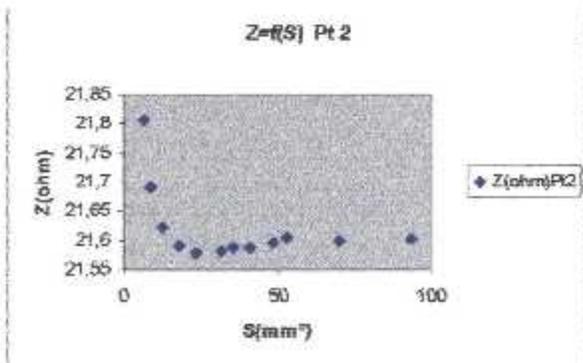


Figure (VI.100) $Z=f(S)$ pour point 2

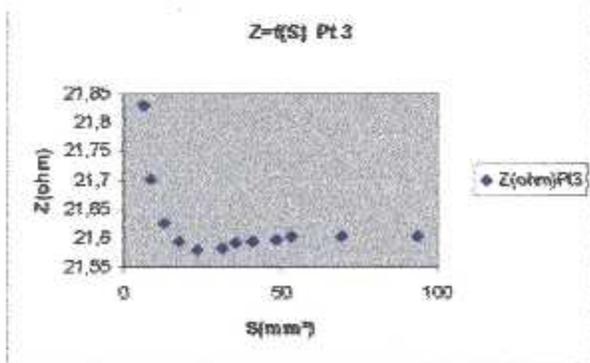


Figure (VI.101) $Z=f(S)$ pour point 3

➤ Analyse de l'évolution de la phase en fonction des propriétés mécaniques :

Sur la charge :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(P)$

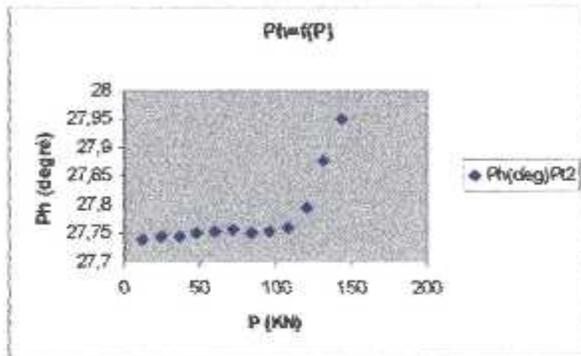


Figure (VL102) $\theta=f(P)$ pour point 2

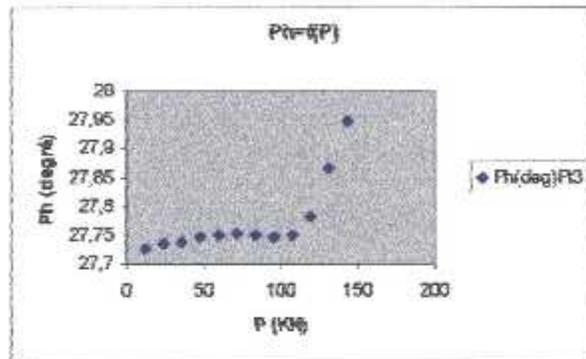


Figure (VL103) $\theta=f(P)$ pour point 3

Sur l'allongement :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(\Delta l)$

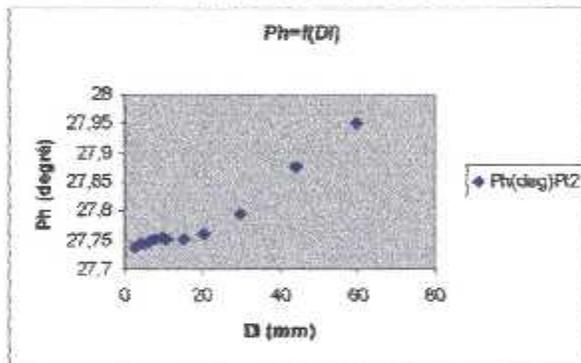


Figure (VL104) $\theta=f(\Delta l)$ pour point 2

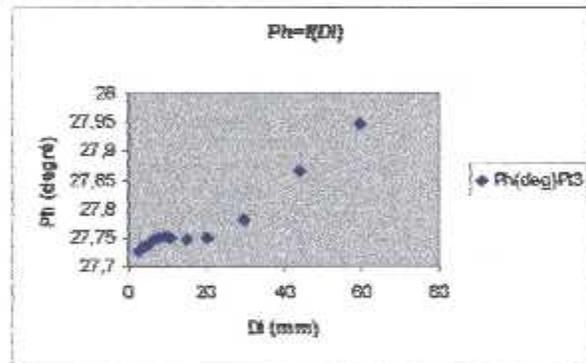


Figure (VL105) $\theta=f(\Delta l)$ pour point 3

Sur la contrainte:

On doit tracer la courbe : $\theta=f(\sigma)$

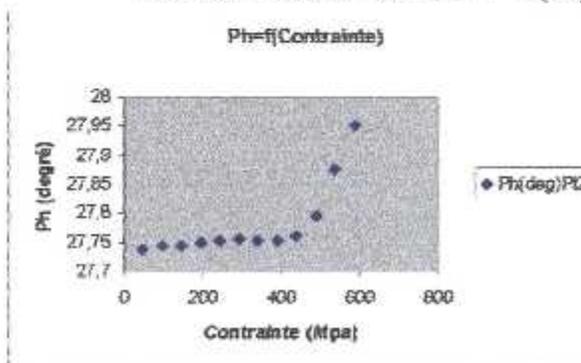


Figure (VL106) $\theta=f(\sigma)$ pour point 2

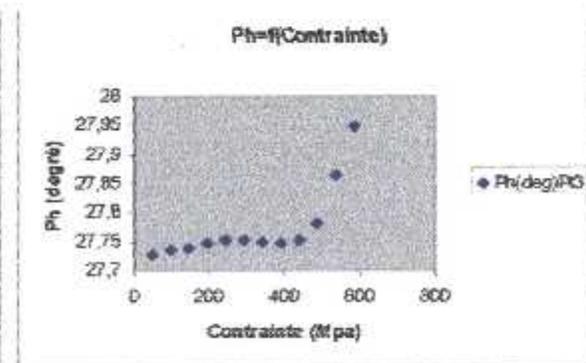
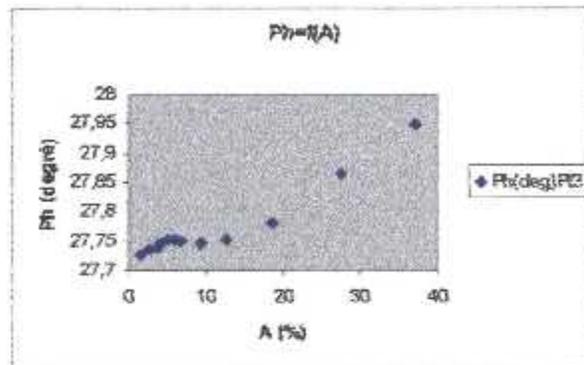
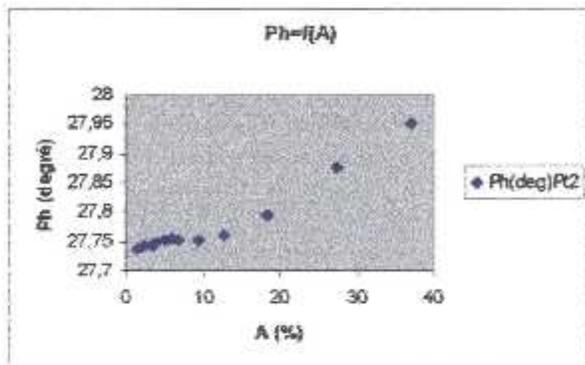


Figure (VL107) $\theta=f(\sigma)$ pour point 3

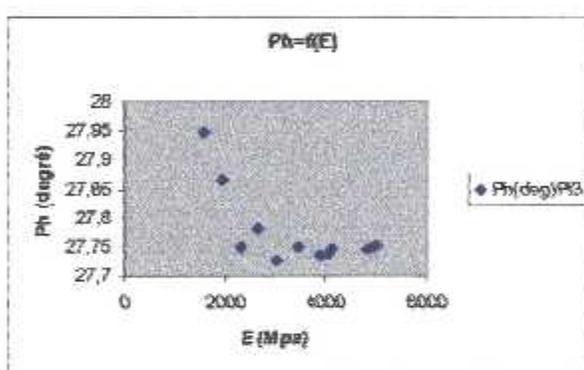
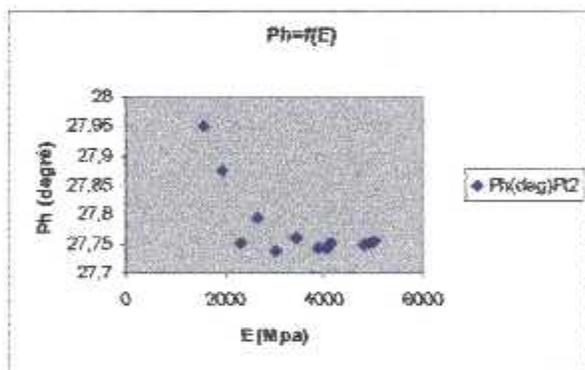
Sur la déformation:

On doit tracer la courbe : $\theta=f(A)$



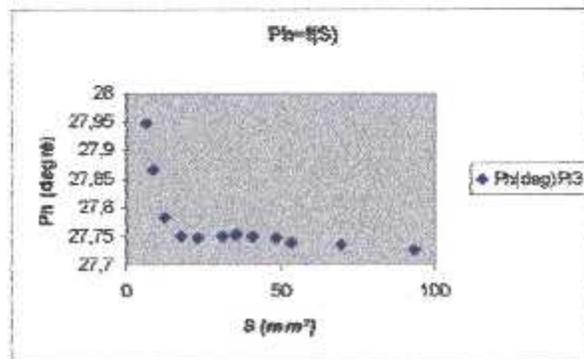
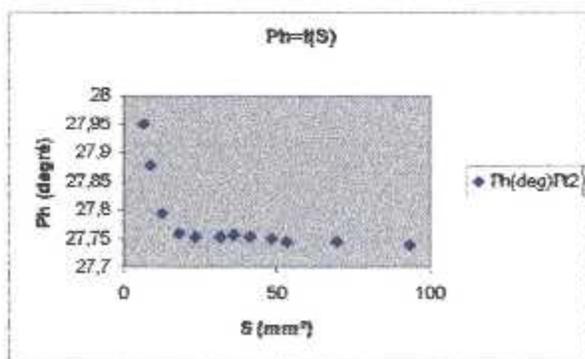
Sur le module de Young :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(E)$



Sur la surface :

On doit tracer la courbe : $\theta=f(S)$



➤ **Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques :**

- **La charge en fonction de la déformation :**

On doit tracer la courbe $P=f(A)$:

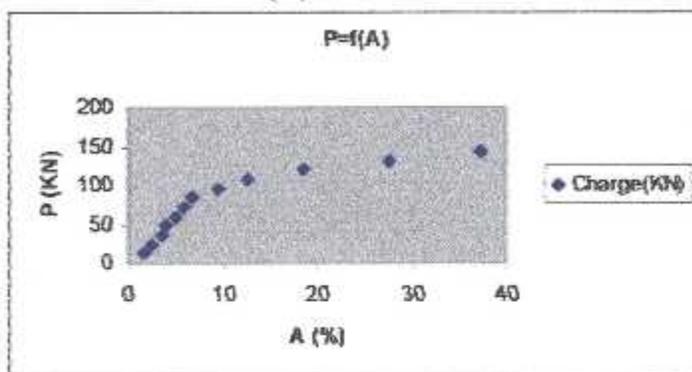


Figure (VL114) $P=f(A)$

- **La charge en fonction de l'allongement :**

On doit tracer la courbe $P=f(\Delta\ell)$:

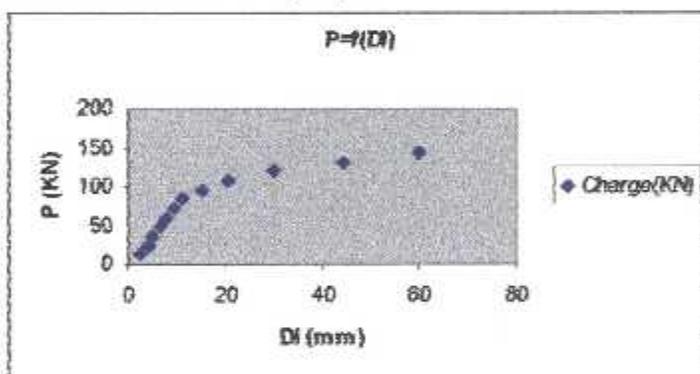


Figure (VL115) $P=f(\Delta\ell)$

- **La contrainte en fonction de l'allongement :**

On doit tracer la courbe $\sigma =f(\Delta\ell)$:

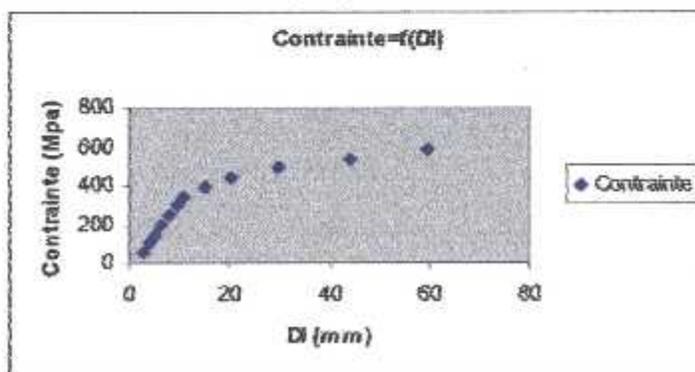


Figure (VL116) $\sigma =f(\Delta\ell)$

VI.2 Commentaires et interprétations des courbes :

Pour des considérations industrielles, dans le contrôle non destructif par courants de Foucault, il est toujours intéressant d'étudier des matériaux non ferromagnétiques, dans notre cas nous avons étudié l'Aluminium 2024 et 7075 très utilisés en aéronautique et qui présentent un seul paramètre électrique (la conductivité), et les matériaux ferromagnétiques où la composante perméabilité possède une influence sur le contrôle par courants de Foucault. Nous avons choisi dans notre cas un matériau utilisé en aéronautique c'est l'acier inoxydable austénitique 304-L.

1 - Pour l'alliage d'Aluminium 2024 :

On remarque que toutes les courbes obtenues suivent des trajectoires bien déterminées.

Pour tous les graphes qui représentent l'impédance, on observe que cette dernière diminue en fonction des caractéristiques mécaniques jusqu'à atteindre la valeur de la limite élastique, au delà de cette valeur, elle augmente.

Nous remarquons que :

Les courbes (figure VI.6, pt 1 et VI.7, pt 2) représentant $Z=f(P)$ présentent un palier situ entre 20-40 KN, la même observation est observée pour tous les points choisis au niveau de l'échantillon, cela indique que la structure a priori présente la même modification électrique et magnétique.

Pour les courbes (figure VI.8, pt 1 et VI.9, pt 2) représentant $Z=f(\Delta l)$, le palier est observé pour un allongement entre 5 et 7 mm (cela correspond à deux zones différentes, c'est-à-dire la zone de transition), les mêmes remarques sont à faire pour les 5 points étudiés dans l'échantillon.

Pour les courbes (figure VI.10, pt 1 et VI.11, pt 2) représentant $Z=f(\sigma)$, les mêmes conclusions sont à faire, le palier est observé entre 250-400 Mpa.

Pour les courbes (figure VI.12, pt 1 et VI.13, pt 2) représentant $Z=f(A)$, la transition est observée en 4 % de la déformation.

Si on trace les courbes (figure VI.14, pt 1 et VI.15, pt 2) représentant $Z=f(E)$, les points obtenus présentent une corrélation intéressante à savoir une droite.

Pour les courbes (figure VI.16, pt 1 et VI.17, pt 2) représentant $Z=f(S)$, l'impédance diminue quand la surface du matériau diminue, et lorsque cette dernière varie entre 18-20 mm², l'impédance augmente.

Ce résultat est important dans le sens où il est possible dans le futur de ne plus recourir au contrôle destructif pour déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau, il suffit simplement de mesurer l'impédance régir par la création des courants de Foucault.

Généralement l'impédance donne un aperçu sur l'aspect amplitude, et la phase recueillie permet un diagnostic de l'état structural, pour cela nous allons étudier la phase en fonction des caractéristiques mécaniques.

L'allure des courbes (figure VI.18, pt 1 et VI.19, pt 2) représentant $\theta = f(P)$ présentent une allure semblable au diagramme classique représentant $P = f(\Delta\ell)$; la limite d'élasticité est bien représentée dans ces courbes, elle est située entre 20-30 KN.

Pour les courbes (figure VI.20, pt1 et VI.21, pt 2) représentant $\theta = f(\Delta\ell)$, la même remarque est observée, la zone de transition représentée par la limite d'élasticité se situe à 5 mm.

Il en est de même pour les courbes (figure VI.24, pt 1 et VI.25, pt 2) représentant $\theta = f(A)$, cette limite se situe autour de 5 et 7 % de la déformation.

Les mêmes remarques sont observées pour les courbes (figure VI.22, pt1 et VI.23, pt 2) représentant $\theta = f(\sigma)$, la limite d'élasticité se situe entre 380 et 420 Mpa.

Pour les courbes (figure VI.28, pt 1 et VI.29, pt 2) représentant $\theta = f(S)$, on remarque que la phase augmente lorsque la surface diminue jusqu'à cette dernière atteindre la valeur de 18-20mm², la phase diminue. Quand on dépasse la limite d'élasticité, la surface devient plus faible (zone de striction), dans ce cas la phase augmente.

Ces résultats sont très importants dans le sens où nous pourrions déterminer les allongements sans procéder au contrôle destructif.

2 – L'alliage d'Aluminium 7075 :

Les mêmes remarques sont attribuées sur les courbes obtenues en ce qui concerne l'Aluminium 7075, l'impédance en fonction des caractéristiques mécaniques représentée par les courbes (figure VI.34 à figure VI.45) et la phase en fonction des caractéristiques mécaniques représentée par les courbes (figure VI.46 à figure VI.57) Nous remarquons des dispersions des résultats, c'est parce qu'on a dépassé la limite d'élasticité et nous avons eu la rupture sans pouvoir mesurer l'évolution de la zone plastique, cela est dû à la machine de traction, puisque celle-ci atteint des charges plus grande. La zone plastique de l'Al 7075 est très faible, et on a pris un palier de 3 KN (le plus petit palier que la machine peut le supporter), pour cela on n'a pas pris en considération la zone plastique, puisque on l'a dépassé sans le savoir. Néanmoins l'évolution des courbes obtenues présente la même similitude.

3 – L'Acier 304-L, à 4mm d'épaisseur :

Les résultats obtenues montrent que la variation de $Z=f(P)$ représentée par les courbes (figure VI.62, pt 2 et VI.63, pt 3) présentent une transition entre 50-60 KN.

La même remarque est observée pour $Z=f(\Delta\ell)$ représentée par les courbes (figure VI.64, pt 2 et VI.65, pt 3) ; cette transition est de 8 à 12 mm.

Les courbes (figure VI.66, pt 2 et VI.67, pt 3) représentant $Z=f(\sigma)$, présentent la même évolution. la zone de transition se trouve entre 450 et 550 Mpa.

Il en est de même pour les courbes (figure VI.68, pt 2 et VI.69, pt 3) représentant $Z=f(A)$, la zone de transition située entre 5 et 7% de la déformation.

Pour les courbes (figure VI.70, pt 2 et VI.71, pt 3) représentant $Z=f(I)$, présentent une forme presque logarithmique, la zone de transition se trouve entre 5000 et 7000 Mpa.

Les courbes (figure VI.72, pt 2 et VI.73, pt 3) représentant $Z=f(S)$, présentent une forme exponentielle, cette zone prend une valeur variée entre 15 et 25 mm².

L'allure des courbes (figure VI.74, pt 2 et VI.75, pt 3) représentant $\theta = f(P)$ présentent une augmentation de la phase en fonction de la charge, lorsque la charge atteint la limite d'élasticité, la phase diminue; le point de transition se situe entre 50-60 KN.

Pour les courbes (figure VI.76, pt 2 et VI.77, pt 3) représentant $\theta = f(\Delta l)$, la même remarque est observée, la zone de transition représentée par la limite d'élasticité se situe entre 8 et 12 mm.

Il en est de même pour les courbes (figure VI.80, pt 2 et VI.81, pt 3) représentant $\theta = f(A)$, cette limite se situe autour de 5 % de la déformation.

Les mêmes remarques sont observées pour les courbes (figure VI.78, pt 2 et VI.79, pt 3) représentant $\theta = f(\sigma)$, la limite d'élasticité se situe entre 400 et 500 Mpa.

Pour les courbes (figure VI.84, pt 2 et VI.85, pt 3) représentant $\theta = f(S)$, la zone de transition est de 15 à 25 mm².

Pour les courbes (figure VI.82, pt 2 et VI.83, pt 3) représentant $\theta = f(E)$, la zone de transition n'est pas observée, la phase pour ce cas augmente en fonction du module de Young.

4 - L'Acier 304-L à 8mm d'épaisseur :

Pour cet acier nous remarquons les mêmes observations que pour l'acier à 4 mm d'épaisseur, la seule différence se trouve dans les courbes qui représentent la phase :

(Figure VI.102, pt 2 et VI.103, pt 3) représentant $\theta = f(P)$; (figure VI.103, pt 2 et VI.104, pt 3) représentant $\theta = f(\Delta l)$; (figure VI.106, pt 2 et VI.107, pt 3) représentant $\theta = f(A)$; (figure VI.106, pt 2 et VI.107, pt 3) représentant $\theta = f(\sigma)$; (figure VI.112, pt 2 et VI.113, pt 3) représentant $\theta = f(S)$; (figure VI.110, pt 2 et VI.111, pt 3) représentant $\theta = f(E)$, telle que l'allure de ces courbes est différente, cela est dû à la pénétration des courants de Foucault et au phénomène de peau. En effet pour les matériaux ferromagnétiques la pénétration de courants de Foucault est faible, il serait intéressant de choisir des fréquences plus basses.

VI.3 Caractéristiques classiques :

Une augmentation brusque de la charge en fonction de la déformation (figure VI.30 ; VI.58 et VI.86 et VI.114) et de la charge en fonction de l'allongement représentée par (figure VI.31 ; VI.59, VI.87 et VI.115) dans la partie élastique, et pour la partie plastique une augmentation rapide de la déformation et de l'allongement telle que la charge augmente longtemps. Pour les courbes représentant (figure VI.32; VI.60; VI.88 ; et VI.116) la contrainte en fonction de la déformation, on observe les mêmes remarques. Ces remarques sont logiques, puisque dans la partie élastique, quelque soit la force exercée, le matériau revient à la position initiale quand on relâche cette force, et les déformations atteintes sont faibles et peuvent être considérées négligeables. La contrainte donne la même allure que la charge puisque on a $\sigma = \frac{F}{S_0}$, et S_0 toujours constante. Et la déformation donne la même allure que l'allongement tel que $A = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$, $\Delta \ell$ c'est l'allongement et ℓ_0 c'est la longueur initiale reste toujours constante.

Ces résultats sont importants car nous remarquons à travers les courbes classiques destructives présentées ci dessus $P=f(A)$... etc ; que les points correspondants à la zone de transition sont les mêmes, et donc on pourrait à l'avenir retrouver ces paramètres sans recourir au contrôle destructif.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE:

La recherche de l'investigation dans le domaine du contrôle et l'évaluation non destructif des matériaux étant très compétitive, la technique du contrôle par courant de Foucault tient par sa sensibilité une place importante qui la sollicite pour résoudre des problèmes complexes, dans le nucléaire, l'aérospatiale, etc.....

L'étude relative entreprise dans la réalisation des sondes a permis d'optimiser certains de ces paramètres, et mieux comprendre l'influence du champ électromagnétique sur les structures dans le contrôle par courants de Foucault.

Cette étude a permis de conclure :

- Pour des sondes larges, le champ magnétique est plus uniforme mais l'induction magnétique est moins importante.
- L'effet de bord est un paramètre très important qu'il faut l'éviter.
- Pour augmenter l'induction magnétique à basse fréquence, la réalisation de des enroulements à multicouches est indispensable pour minimiser la longueur de la sonde.

Pour un matériau ferromagnétique où la pénétration est faible (effet de peau), il est nécessaire de choisir des fréquences plus basses.

Pour la méthode destructive, nos moyens technologiques limités ne nous ont pas permis de choisir d'autres méthodes, c'est pour cela nous avons utilisé uniquement la traction.

Les résultats obtenus pour la caractérisation des matériaux montre une relation entre les essais non destructifs et destructifs.

En effet, la variation de l'impédance ou de la phase en fonction des différents paramètres de charge ou de sollicitation montre une similitude avec les différentes caractéristiques mécaniques en fonction des sollicitations.

Pour l'impédance, nous remarquons avec exactitude les points importants dans un matériau soumis à une charge, à savoir le point de transition de l'élasticité – plasticité, cet état est vérifié pour les matériaux de type aluminium ou acier inoxydable austénitique.

La même conclusion est obtenue pour la phase. Les résultats sont plus sensibles pour ce paramètre, car la phase donne plus de renseignement sur la microstructure du matériau.

Les résultats obtenus sont importants dans le sens où il est possible dans le futur de ne plus recourir au contrôle destructif pour déterminer les caractéristiques du matériau, il suffit simplement de mesurer l'impédance ou la phase régité par la création des courants de Foucault.

Cette conclusion est extrêmement importante, car elle permet l'application de ces résultats dans le contrôle non destructif en service (Inspection in Service) qui est un domaine dans le contrôle non destructif. Le gain économique est important dans le sens qu'il permettrait le contrôle des équipements sans procéder à l'arrêt.

Bibliographie

Bibliographies:

- [1] Advanced manuel for eddy current test method, norme canadienne
- [2] Approche physique dans la détermination de caractéristiques des matériaux en contrôle non destructif par courants de Foucault, Hammouda Amirouche : thèse de magistère, promotion 2003.
- [3] *Comportement mécanique des matériaux*, par Dminique François, André Pineau, André Zaoui.
- [4] Contrôle non destructif : Magnétoscopie, Ressuage, Courants de Foucault ingénieur, CAST.
- [5] Contrôle non destructif niveau II et niveau III ingénieurs, Ed. C.A.S.T.
- [6] Courant de Foucault, niveau II. Centre de formation, SGS Qualitest
- [7] Des matériaux par : Jean- Marie Dorlot, Jean- Paul Bailon, Jacques Masounave. Edditions de l'école polytechnique de Montréal.
- [8] Détermination des caractéristique mécaniques en soudage. Thèse d'ingénieur faite par Abba Samir, l'école polytechnique d'Alger, promotion 2003.
- [9] Etude et réalisation d'un logiciel de caractérisation et de reconstitution d'image pour le contrôle non destructif par courants de Foucault. Thèse d'ingénieur faite par Mebrek smain, promotion 1998.
- [10] International Materials Reviews; October 2003; Volume 48, Number 5
- [11] *Introduction à la science des matériaux, traité des matériaux par : Wilfried Kurz Jean P et Mercier Gérald Zambelli.*
- [12] *Matériau de construction par une réunion d'ingénieurs, 3^{ème} édition mise à jour, éditions Eyrolles 1979; collection des cours de l'école chez soi.*
- [13] *Matériaux et éléments de construction par A.Komar, Quatrième édition, technique soviétique.*
- [14] *Matériaux métalliques; Tome 1, par Noureddine Bouaouadja.*
- [15] *Métaux non ferromagnétiques. Tome 2, afnor ; recueil norme française 1986.*
- [17] *Modélisation des structures, calcul par Elément finis par J-C. Craveur ; Séric Masson.*
- [18] *Non destructif testing Electromagnetic testing, Hand book, second edition ASNT, volume 4*

[19] Précis de Métallurgie appliquée par André Roos et Bernard Milet ; technique et documentation Lavoisier.

[20] Relation Microstructure/Ténacité dans les alliages aéronautiques de la série 700. Thèse du Doctorat par David Dumont , 2001.

[21] R.S sharpe, Research techniques in non destructive testing, Volume 5.

Annexes

I.1 Equation fondamentale de propagation du champ magnétique :

Les équations différentielles générales qui gouvernent la variation du champ électromagnétique à basse fréquence dans une région qui inclut un matériau conducteur sont décrites par les équations de Maxwell :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \dots\dots\dots 2$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{avec} \quad \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad \dots\dots\dots 3$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \dots\dots\dots 4$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

I.2 Propriétés magnétiques des matériaux :

I.2.1 Champ et Induction magnétique :

Dans le vide, les grandeurs vectorielles champ d'induction magnétique et champ d'excitation magnétique sont liées par la perméabilité magnétique du vide μ_0 , dans une relation linéaire.

Dans un matériau isotrope, l'aimantation, se superpose au champ d'excitation pour traduire l'influence du milieu.

L'aimantation est aussi liée à l'induction par la susceptibilité magnétique du matériau dans une relation linéaire.

On observe une relation vectorielle linéaire entre l'induction et l'excitation : le coefficient de perméabilité absolue remplace la perméabilité du vide.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad \dots\dots\dots 5$$

La perméabilité magnétique relative μ_r : $\mu_r = 1 + \chi$ $\dots\dots\dots 6$

La perméabilité magnétique absolue μ : $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ $\dots\dots\dots 7$

La susceptibilité magnétique du matériau χ .

Du point de vue magnétique, les matériaux se classent en trois grandes catégories :

Paramagnétique : les vecteurs champ et aimantation sont de même sens et l'aimantation disparaît avec l'excitation.

Diamagnétique : l'influence est similaire au paramagnétique, mais le champ et l'aimantation sont de sens contraires.

Ferromagnétique : le coefficient de proportionnalité entre l'induction et l'excitation est important, mais non constant, ce qui procure à ces matériaux des comportements non linéaires.

A la différence des paramagnétiques et des diamagnétiques qui présentent une proportionnalité entre le champ magnétique H et l'induction B , ce dernier croît de manière non proportionnelle vers une limite appelée Induction de saturation (B_s).

L'observation microscopique des matériaux ferromagnétiques permet de les décrire par la théorie des domaines.

Par ce biais, on peut justifier que l'induction résultante d'une excitation magnétique évolue de manière non linéaire. Ceci conduit à représenter le cycle d'hystérésis d'un matériau qui lie l'induction à l'excitation. Les caractéristiques de ces cycles (valeurs typiques, forme, surface) permettent une classification des matériaux ferromagnétiques doux ou durs.

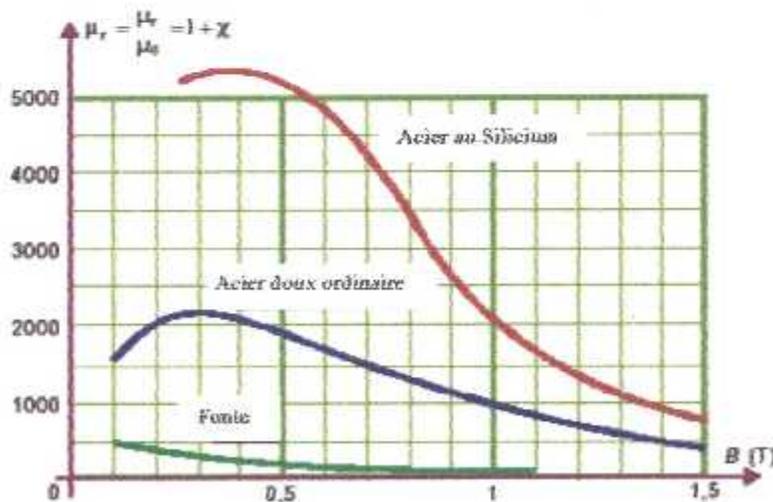


Figure A.1.1: Variation de la perméabilité en fonction de l'induction

I.2.2 Courbe de première aimantation :

Le matériau est initialement démagnétisé. On fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé le matériau. La courbe de la Figure (I-2) représente l'induction B . On distingue trois zones :

- la première : droite linéaire,
- la seconde : coude de saturation,
- la dernière : zone de saturation.

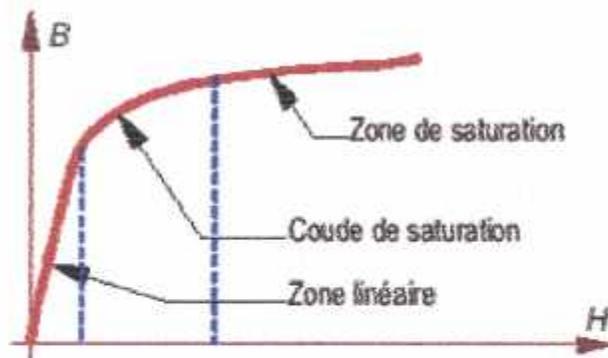


Figure A.1.2 : Courbe de première Aimantation

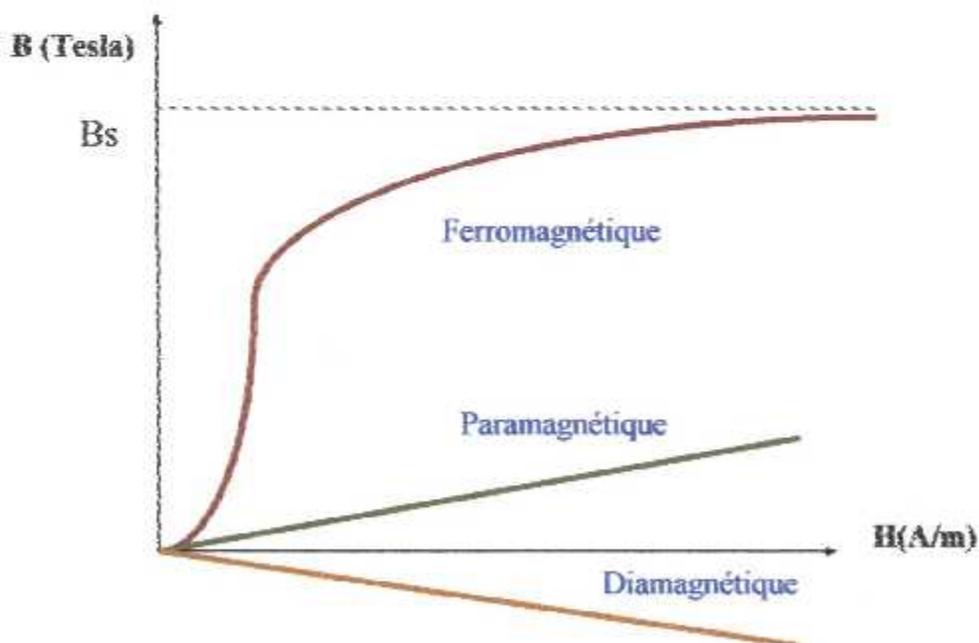
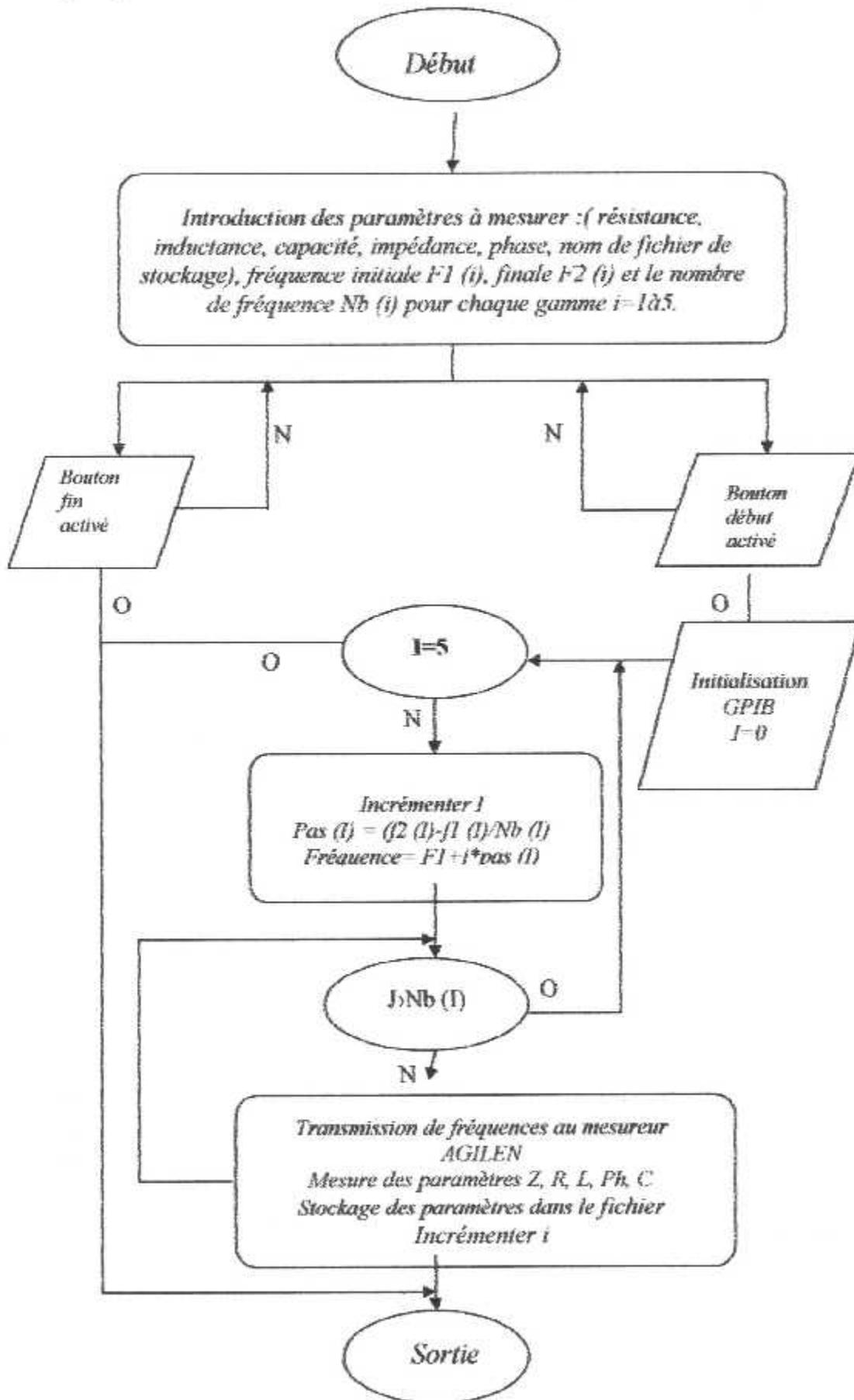


Figure A.1.3 : Courbe d'aimantation.

II. Organigramme de mesureur d'impédance :



Organigramme III-1 : système de mesureur d'impédance de la sonde.

III.1 Contraintes et déformations :

III.1.1 Vecteur des contraintes :

Soit (OX, OY, OZ) un système d'axes de référence formant un repère orthonormé direct et un solide en équilibre, sollicité par divers efforts.

L'intensité moyenne de la force, projetée sur les trois axes du système de référence est :

$$\frac{\Delta F_x}{\Delta S_x}, \frac{\Delta F_y}{\Delta S_x}, \frac{\Delta F_z}{\Delta S_x} \quad (3.1.1)$$

ΔS_x : Est la surface contenant le point M.

$\frac{\Delta F_x}{\Delta S_x}$: Est la contrainte normale, noté par σ_{xx} .

$\frac{\Delta F_y}{\Delta S_x}$: Est la contrainte tangentielle ou contrainte de cisaillement, notée par σ_{xy}

ou τ_{xy} .

$\frac{\Delta F_z}{\Delta S_x}$: Est la contrainte tangentielle ou contrainte de cisaillement notée par

σ_{xz} ou τ_{xz} .

III.1.2 Tenseur des contraintes :

On a neufs composantes qui forment la matrice des contraintes au point M :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

Les σ_{ij} sont les composantes du tenseur des contraintes.

III.1.3 Tenseur des déformations :

On définit les déformations ε_{ij} par la formule classique de la mécanique linéaire, où n'apparaît aucun terme du second ordre, u_k étant le déplacement dans la direction k :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.1.3)$$

Les déplacements sont symétriques du fait de la commutativité de l'addition des nombres réels :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \quad (3.1.4)$$

III.1.4 Relation entre contraintes et déformations :

On considère un matériau homogène tel que on se limitera au domaine élastique linéaire, les déformations doivent être petites pour rester dans la partie linéaire de la loi constitutive.

La relation qui relie le tenseur des contraintes et des déformations est la loi de Hooke dite aussi la loi constitutive :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.1.5)$$

Pour un matériau isotrope cette loi s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

La relation inverse s'appelle relation de compliancance :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1.7)$$

Tel que :

- Le module de Young (module d'élasticité) E : est une constante de proportionnalité de la loi de Hooke, ce module est une mesure de la rigidité du matériau, c à d de la propriété qu'a le matériau de se déformer de façon élastique réversible sous l'action d'une contrainte.

- Le module d'élasticité en cisaillement ou le module de glissement G : C'est le coefficient qui relie les contraintes tangentielles aux déformations angulaires, il est donnée par la relation :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.1.8)$$

Le module de Young et le module de glissement sont homogènes à des contraintes et s'exprime en N/m^2 .

- Module de Poisson : Quand on exerce une traction sur une éprouvette, sa section diminue ; cet effet est l'effet de Poisson, le coefficient de Poisson ν_{ij} mesure la déformation obtenue dans la direction j quand on impose une déformation dans la direction i :

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (3.1.9)$$

Un matériau isotrope est caractérisé par un coefficient de Poisson qui est tel que ν_{ij} est égal à ν_{ji} .

Puisque les modules E , G , K caractérisent tous la rigidité, il existe des relations entre eux , la première relie E et G (eq .3.1.8) ; et la second reliant E et K s'écrit :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.1.10)$$

III.1.5 : Etat plan de la contrainte :

Ce type de comportement est applicable dans le cas d'une éprouvette de traction, dans ce cas :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0 \quad (3.1.11)$$

La loi de Hooke dans ce cas s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1.12)$$

III.1.6 : Etat plan de déformation :

En reportant l'équation (3.1.11) dans les relations constitutives pour un matériau isotrope, on obtient :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0 \quad (3.1.13)$$

Et :

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \neq 0 \quad (3.1.14)$$

ε_z Correspond à la variation relative d'épaisseur de la plaque sous la charge appliquée.

La loi de Hooke en état plan de déformation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1.15)$$

III.1.7 Contraintes et déformations en traction :

A. Contraintes en traction :

L'état de contraintes lors de la traction axiales se caractérise par le fait que les six composantes internes seule la force longitudinal F n'est pas nul. On considère une plaque sollicité par des forces axiales, pour une section quelconque la force prend la formule suivante :

$$F = \int \sigma dS \quad (3.1.16)$$

Donc dans le cas d'une traction simple on a :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.1.17)$$

B. Déformations en traction :

Après la mise en traction de plaque, cet élément est déformé dans les trois directions (fig.1.1.1)

La déformation ε est le rapport des allongements à la longueur initiale :

$$\varepsilon_x = \frac{u}{dx}; \varepsilon_y = \frac{v}{dy}; \varepsilon_z = \frac{w}{dz} \quad (3.1.18)$$

En traction simple même si σ_x et σ_y sont nulles, les déformations ε_x et ε_y ne le sont pas ; dans ce cas :

$$\varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_x}{\nu} = -\frac{\varepsilon_y}{\nu} \quad (3.1.19)$$

Et :

$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad (3.1.20)$$

En combinant les relations (3.1.19) et (3.1.20), on obtient :

$$\varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_x}{\nu} = -\frac{\varepsilon_y}{\nu} = \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.1.21)$$

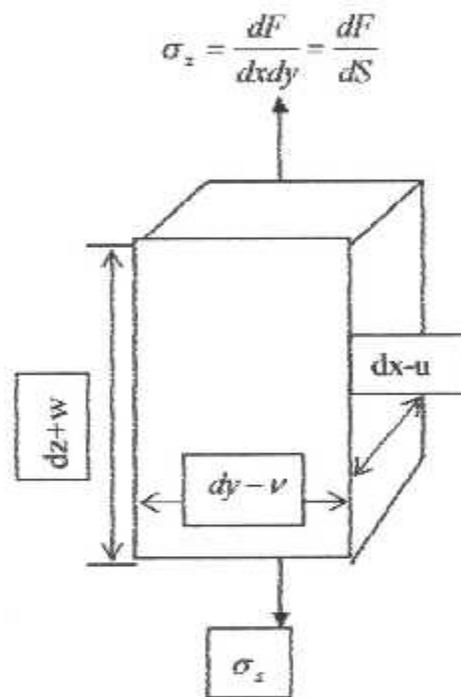


Figure (III).