

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GENIE ÉLECTRIQUE**

**N° : .....**



**DOMAINE : SCIENCE TECHNIQUE**

**FILIERE : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES**

**OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

1. AOUFI Mahfoud
2. KHODJA Lakhdar

**Intitulé**

**ETUDE ET REALISATION D'UN BANC D'ESSAI**  
**DÉDIE AUX APPLICATIONS**  
**DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND)**  
**PAR COURANTS DE FOUCAULT (CF)**

**Soutenu devant le jury composé de:**

MESSALTI Sabir	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
SAFER Omar Adib	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Co-Rapporteur
BELHOUCHETE Khaled	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

**Année universitaire :2018 /2019**



# Dédicaces 1

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents et leurs soutiens moraux.*

*A mon cher frère Hamza pour son appui et son encouragement.*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux allégués et le fruit de vos soutiens infailibles.*

**AOUFI MAHFOUD**



## Dédicaces 2

*A mes beaux-parents, je ne pourrais jamais exprimer le respect que  
j'ai pour vous, vos prières, vos encouragements  
et votre soutien m'ont toujours été d'un grand secours.*

*A mes frères, mes sœurs et à toute la famille KHODJA sans  
exception, pour leurs efforts afin de m'assurer une bonne formation.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à mon oncle MOHAMED pour  
son encouragement et ses conseils.*

*Et à tous les enseignants et enseignantes de notre département.*

*Ainsi que tous, ceux qui auront l'occasion de lire ce travail.*

**KHODJA LAKHDAR.**

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout Puissant et  
Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience  
d'accomplir ce modeste travail*

*En second lieu nous tenons à remercier le Dr : ABDELHAK ABDOU  
et Mr : OMAR ADIB SAFER pour leurs précieux conseils et son aide  
durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciement vont également aux membres de jury pour  
l'intérêt qu' ils ont portés en acceptant d'examiner nôtre travail et de  
l'enrichir par leurs critiques et propositions*

*Enfin, nous tenons également à remercier toute personne qui a  
participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail  
principalement notre ami BOMMEDIEN MATMATI*

*et FARID ZAMOURI.*

# Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	iii
Table des matières .....	iv
Table des figures.....	vii
Liste du tableau.....	viii
Notations et Symboles .....	ix
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I Généralités sur le Contrôle non destructif</b> .....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Champ d’application actuel .....	3
I.3 Classement des défauts détectés en CND .....	4
I.3.1 Défauts internes .....	5
I.3.2 Défauts de surface .....	5
I.4 Différentes techniques de contrôle non destructif .....	5
I.4.1 Examen visuel .....	6
I.4.2 Thermographie.....	7
I.4.3 Ressuage .....	7
I.4.4 Flux de fuite magnétique .....	8
I.4.5 Ultrasons.....	10
I.4.6 Radiographie.....	11
I.4.7 Courants de Foucault(CF) .....	12
I.5 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND .....	14
I.6 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault .....	15
I.6.1 Définition d’un capteur.....	15
I.6.2 Principe des capteurs inductifs .....	15
I.6.3 Principe des capteurs à courants de Foucault .....	15
I.7 Conclusion .....	15
<b>Chapitre II Généralité sur les capteurs inductifs</b> .....	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Dispositif du CND-CF .....	17

II.2.1	Source d'alimentation .....	17
II.2.2	Capteurs .....	17
II.2.3	Structure contrôlée.....	17
II.2.4	Grandeurs mesurées.....	21
II.3	Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en (CND).....	23
II.3.1	Mesure de conductivité électrique .....	24
II.3.2	Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants .....	24
II.3.3	Détection de fissures.....	24
II.3.4	Contrôle des tubes, barres et fils.....	25
II.4	Conclusion .....	25
<b>Chapitre III</b>	<b>Réalisation du banc d'essai dédié au CND-CF .....</b>	<b>26</b>
III.1	Introduction .....	26
III.2	Description globale du banc d'essai.....	26
III.2.1	Eléments de la partie commande .....	27
III.2.2	Eléments de la partie opérative.....	30
III.3	Description du micro-logiciel GRBL.....	31
III.4	Caractéristiques de la machine.....	32
III.5	Architecture matériel du banc d'essai réalisé.....	33
III.5.1	Vis sans fin-écrou .....	33
III.5.2	Accouplement.....	33
III.5.3	Rail de guidage .....	34
III.5.4	Moteur pas à pas .....	34
III.5.5	Roulements .....	35
III.6	Installation de pièces électroniques du banc d'essai .....	35
III.6.1	Pins utilisés de la carte ARDUINO(UNO) .....	36
III.6.2	Pins utilisés de la driver tb6600 .....	36
III.6.3	Installation de fin de course .....	37
III.7	Conclusion.....	37
<b>Chapitre IV</b>	<b>Résultats Pratiques .....</b>	<b>38</b>
IV.1	Introduction .....	38
IV.2	Chaine d'acquisition pour détectons de défont par CF .....	38
IV.3	Interface d'acquisition.....	38
IV.3.1	Interface de Visualisation des résultats (Z-scope).....	39

IV.4	Description des cibles.....	40
IV.5	Résultats pratiques.....	42
IV.5.1	Résultats pratique pour détection de défont par CF .....	42
IV.6	Détection de défont par méthode de flux de fuit magnétique .....	43
IV.6.1	Principe du contrôle par flux de fuite magnétique .....	43
IV.6.2	Capteur de champ magnétique .....	44
IV.6.3	Résultats pratique pour détection de défont par flux de fuit magnétique.....	45
IV.7	Conclusion.....	46
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Table des figures

Fig I. 1	Examen visuel.....	6
Fig I. 2	Détection par thermographie.....	7
Fig I. 3	Principe de la méthode de ressuage.....	8
Fig I. 4	Produits du ressuage.....	8
Fig I. 5	Contrôle par magnétoscopie.....	9
Fig I. 6	Appareil de magnétoscopie.....	9
Fig I. 7	Détecteurs à flux de fuite magnétique.....	10
Fig I. 8	Principe des ultrasons.....	11
Fig I. 9	Appareil à Ultrasons.....	11
Fig I. 10	Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.....	12
Fig I. 11	Principe du CND CF.....	13
Fig I. 12	Appareil à CF.....	13
Fig II. 1	Bobines réelles.....	18
Fig II. 2	Capteur encerclant.....	20
Fig II. 3	Capteur sonde.....	21
Fig II. 4	Schéma de principe d'un capteur inductif.....	21
Fig II. 5	Circuit équivalent d'un capteur à courants de Foucault.....	22
Fig II. 6	Variation d'impédance d'une bobine en présence de courants de Foucault.....	22
Fig II. 7	Principe de la variation de la tension en présence de courants de Foucault.....	23
Fig III. 1	Banc d'essai.....	26
Fig III. 2	Bloc de commande.....	27
Fig III. 3	Carte ARDUINO UNO.....	28
Fig III. 4	Driver moteur pas a bas.....	29
Fig III. 5	Fin de course.....	29
Fig III. 6	Alimentation.....	30
Fig III. 7	Partie opérative.....	30
Fig III. 8	Moteur pas à pas.....	31
Fig III. 9	Interface du micro-logiciel GRBL.....	32
Fig III. 10	Vis sans fin-écrou.....	33
Fig III. 11	Accouplement.....	33
Fig III. 12	Rail de guidage.....	34
Fig III. 13	Moteur pas à pas.....	34
Fig III. 14	Roulements.....	35
Fig III. 15	Installation de pièces électroniques.....	35
Fig III. 16	Pins utilisés pour l'ARDUINO(UNO).....	36
Fig III. 17	Pins utilisés pour le driver tb6600.....	36
Fig III. 18	Connecter la fin de course par ARDUINO(UNO).....	37

Fig IV. 1	Chaine d'acquisition. ....	38
Fig IV. 2	Ecran de visualisation. ....	40
Fig IV. 3	Photo de la pièce en acier (échantillon 01). ....	41
Fig IV. 4	Photo de la pièce en aluminium (échantillon 02).....	41
Fig IV. 5	Résultats obtenus d'un contrôle sur une cible en aluminium (échantillon 02). ....	42
Fig IV. 6	Résultats obtenus d'un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01). ....	43
Fig IV. 7	Principe de contrôle par flux de fuite magnétique. ....	44
Fig IV. 8	Capteur KY-024.....	44
Fig IV. 9	Montage des aimants permanents. ....	45
Fig IV. 10	Résultats obtenus sans filtrage (signal bruité) pour un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01). ....	45
Fig IV. 11	Résultats obtenus avec filtrage d'un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01).....	46

## Liste des tableaux

Tableau I. 1	Tableau comparatif des techniques utilisées en CND.....	14
Tableau III. 1	Caractéristiques du banc d'essai réalisé dédié au CND-CF. ....	32

# Notations et Symboles

$\vec{B}$ :	Induction magnétique [T].
$N$ :	Nombre de spires de la bobine.
$\Phi$ :	Flux magnétique [Wb].
$S$ :	Surface de la bobine [m <sup>2</sup> ].
$U$ :	Tension d'alimentation en [V].
$E$ :	Force électromotrice [v].
<b>CND</b> :	Contrôle Non Destructif.
<b>CF</b> :	Courants de Foucault.
<b>CND-CF</b> :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.
<b>CCF</b> :	Capteurs à courants de Foucault.

## Introduction générale

*De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabriquant, mettant en œuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures. Les Contrôles Non Destructifs (CND) sont donc devenus essentiels en quelques dizaines d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique, où la défaillance des pièces pouvant entraîner des conséquences plus ou moins importantes, qui s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique : la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations, [1], [2].*

*Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre ....etc. [3].*

*Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde, et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un 'signal de défaut' aussi important que possible. Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent, [4].*

*Les tubes et plaque peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance. Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du*

défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine), plaque ou (placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur).

*L'objectif de ce travail est étude et réalisation d'un banc d'essai dédiée aux applications du contrôle non destructif par courants de Foucault pour la détection d'un défaut de forme plaque.*

*Pour ce faire, nous avons réparti notre travail en trois chapitres :*

*Ainsi le premier chapitre sera réservé a l'étude bibliographique qui a pour but d'expliquer le contrôle non destructif à partir des différentes techniques mises en œuvre, puis nous présenterons les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault.*

*Le deuxième chapitre sera consacré au capteur inductif, en premier lieu nous évoquerons le principe du contrôle par capteur à courants de Foucault, les lois qui régissent la répartition des courants de Foucault et les principaux paramètres influent sur le contrôle ainsi que leurs influences sur l'impédance du couple « capteur-cible ». On passera ensuite à la mise en œuvre du contrôle, c'est-à-dire aux différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle et nous terminerons avec, une étude détaillée du fonctionnement du capteur en regard d'une cible comportant une fissure et les différentes applications des capteurs inductifs en **CND**.*

*Au troisième chapitre, nous donnerons une description globale de la Réalisation du banc d'essai et avec une description globale des différents éléments qui le compose, ainsi qu'aux résultats qui seront obtenus et leurs interprétations. Les essais expérimentaux se feront pour des cibles amagnétiques et magnétiques, pour des fissures à profondeurs différentes afin et « capteur-cible ».*

*Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués, les problèmes rencontrés et enfin les perspectives envisagées pour la continuité de ce travail.*

# Chapitre I Généralités sur le Contrôle non destructif

## I.1 Introduction

*Le contrôle non destructif comprend l'ensemble des techniques et des procédés qui peuvent fournir des informations sur la sante d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations pour leur utilisation ultérieure. Ces essais ont pour objectif la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destinée. En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits.*

*A travers son objectif, le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, qui mettent en œuvre ou qui utilisent des matériaux, des produits et des structures de toute nature. A l'heure où la qualité et la sécurité sont devenues des impératifs difficilement contournables, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et certaines activités où la sécurité est primordiale telles que le nucléaire et l'aéronautique.*

*Le principe de la détection d'un défaut consiste à visualiser la pièce et à observer l'interaction du défaut avec le capteur. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes quelle que soit la technique de détection employée :*

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

*Différentes techniques sont employées en pratique : techniques mécaniques (ultrasons, ressuage), électromagnétiques (radiographie, courants de Foucault, fuite du flux magnétique) [5]*

## I.2 Champ d'application actuel

A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches

sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire). [6].

Le champ d'application du CND est très vaste, il englobe :

- La détection et évaluation de défauts;
- La détection de fuite;
- La mesure dimensionnelle;
- La caractérisation d'une structure ou d'une microstructure.

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

➤ **Le contrôle en cours de fabrication**

Les essais non destructifs au cours de la fabrication apparaissent de plus en plus comme un moyen d'économiser de l'argent, dans la mesure où ils permettent de rejeter les pièces défectueuses avant leur achèvement, plutôt que de contrôler les pièces une fois fabriquées. c'est un procédé souvent automatisé, impliquant alors un appareillage installé en ligne de fabrication, aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

➤ **Le contrôle en recette**

Procède de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant, d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison. A ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.

➤ **Le contrôle en service**

En maintenance prédictive, le CND permet également de réaliser des économies considérables en évitant le remplacement de pièces non défectueuses (ce qui est parfois le cas quand la durée de vie est estimée) et les interruptions imprévues d'activités pour réparation, toujours très coûteuses, lorsqu'une pièce critique casse avant la date estimée. C'est pourquoi les ventes de systèmes de contrôle non destructif augmentent rapidement dans ce domaine [7]. [8].

### I.3 Classement des défauts détectés en CND

Le terme *défait* est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes, [7], [8], [9].

### I.3.1 Défauts internes

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

### I.3.2 Défauts de surface

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

#### ➤ Défauts ponctuels

Correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques  $\mu\text{m}$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

#### ➤ Défauts d'aspect

C'est une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) qui est visible et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

## I.4 Différentes techniques de contrôle non destructif

Les techniques de CND utilisées sont diverses : (la Magnétoscopie, les ultrasons, le ressuage les courants de Foucault) Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'étude de ce manuscrit, [10].

### I.4.1 Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général. Puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect réhilitaires pour des produits plats du type tôles, tissus, verre, etc., [11].

Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures tel que :

➤ **L'éclairage** : luminosité et longueur d'onde permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité; l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts en vue d'améliorer le contraste ; type d'éclairage (l'éclairage diffus, éclairage directif, éclairage rasant...).

➤ **L'œil et ses limitations** : L'œil est un capteur optique certes remarquable à bien des points de vue mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif. La lecture d'une image associée en fait l'œil et le cerveau de l'observateur, initiant ainsi à la fois des problèmes objectifs et des problèmes subjectifs (problème d'acuité, problème de conscience et état d'esprit de l'observateur, la rémanence de l'œil rend problématique le contrôle des objets en mouvement, la fatigue oculaire dégrade les performances dans le temps, de même que la fatigue nerveuse ou la distraction de l'observation..),

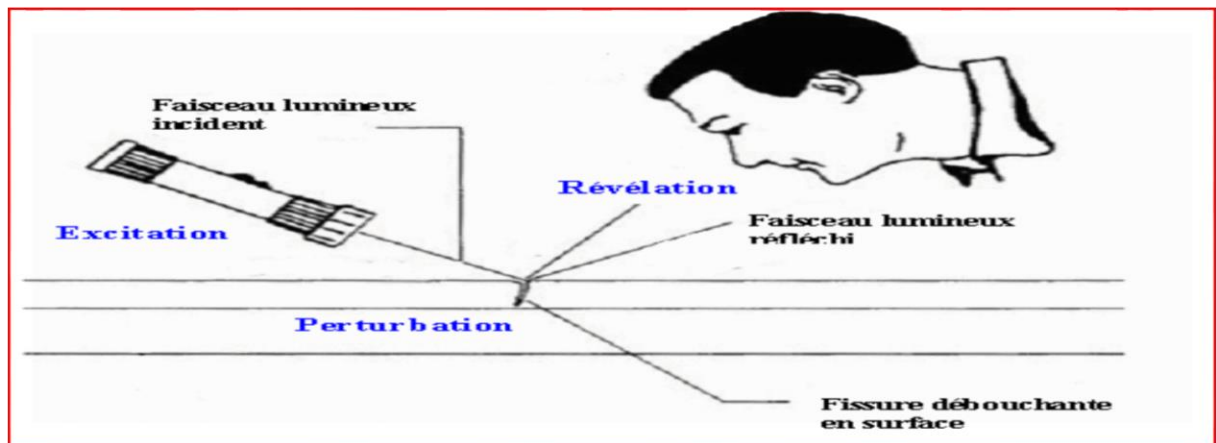


Fig I. 1 Examen visuel.

#### I.4.1.1 Champs d'applications du contrôle visuel

Les applications du contrôle optique sont en pleine croissance grâce à la mise sur le marché de nouveaux appareillages de prise de vues et de traitement d'images qui bénéficient des progrès rapides réalisés dans ces domaines depuis une décennie, en particulier sous l'impulsion des industries de l'audiovisuel.

Indépendamment du contrôle en fabrication, le contrôle optique visuel, direct, par endoscope ou relayé par un équipement de télévision est de pratique courante dans les

opérations de maintenance telles qu'on les effectue dans les domaines de l'aéronautique, du génie nucléaire ou chimique, dans le génie civil, etc.....

Le contrôle optique intervient enfin comme étape ultime des procédés de contrôle décrits par ailleurs tels que le ressuage ou la magnétoscopie dont le rôle n'est d'ailleurs autre que d'améliorer la lisibilité optique des petits défauts. Il est utile aussi de rappeler que les principales techniques de contrôle non destructif délivrent en fait des images qu'il faudra lire et éventuellement traiter : c'est évident pour la radiographie ou la thermographie, mais la cartographie des défauts devient petit à petit un élément important des contrôles ultrasonores ou par courants de Foucault, [7].

#### I.4.2 Thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermo grammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple), la figure ci-dessous donne un aperçu du principe figure (I.2), [11]

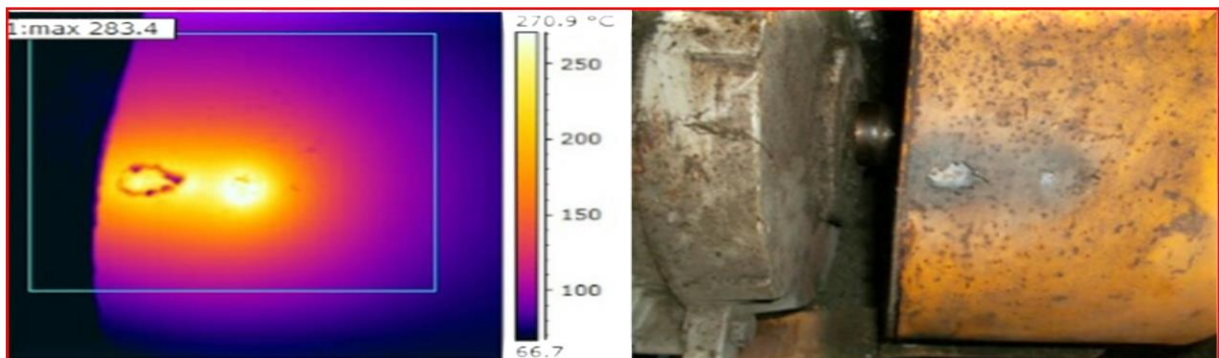


Fig I. 2 Détection par thermographie.

#### I.4.3 Ressuage

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchâtes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, le principe de cette méthode présente dans la figure(I.3) [2].

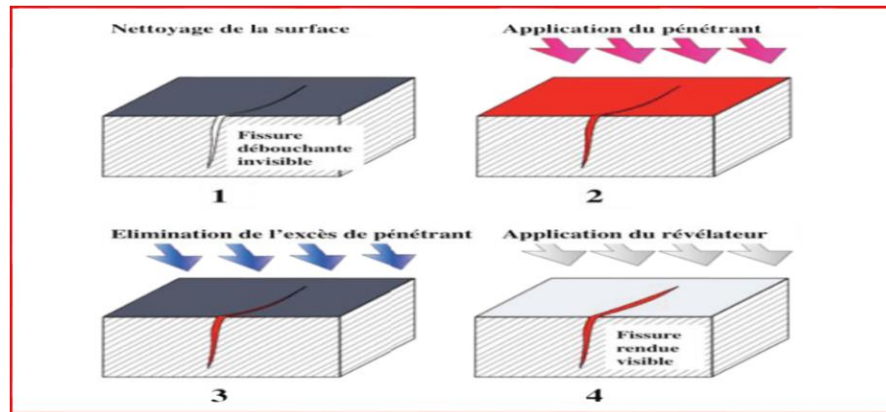


Fig I. 3 Principe de la méthode de ressuage.

### ➤ Produits utilisés

La figure (I.4) représente les Produits utilisés pour la technique du Ressuage.



Fig I. 4 Produits du ressuage.

#### I.4.2.1 Champ d'application de ressuage

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité (matériaux métalliques, plastiques, composites...).

Le ressuage est une méthode que l'on peut utiliser à la fois pour le contrôle de pièces de sécurité en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou au cours des opérations de maintenance, [8].

#### I.4.4 Flux de fuite magnétique

Dans un matériau ferromagnétique, les lignes de champ magnétique s'épanouissent latéralement à la rencontre d'un obstacle (perpendiculaire aux lignes). Cet obstacle peut être

constitué d'un défaut débouchant ou sous cutané ce qui correspond à un entrefer (accroissement local de la réluctance du circuit). Le même phénomène de dispersion est observé lorsqu'on est en présence d'une hétérogénéité non ferromagnétique dans un matériau ferromagnétique.

#### 1.4.4.1 Magnétoscopie

Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant. Les défauts superficiels provoquent, par l'importante variation de réluctance qu'ils représentent, une déviation des lignes de champ. Des flux de fuite magnétique sont engendrés localement. Ils sont ensuite généralement visualisés soit à l'aide d'un produit indicateur porteur de limaille de fer (magnétoscopie), soit à l'aide d'un film magnétisable (Magnétographie), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique, le principe de cette méthode présente dans la figure(I.5), [12].

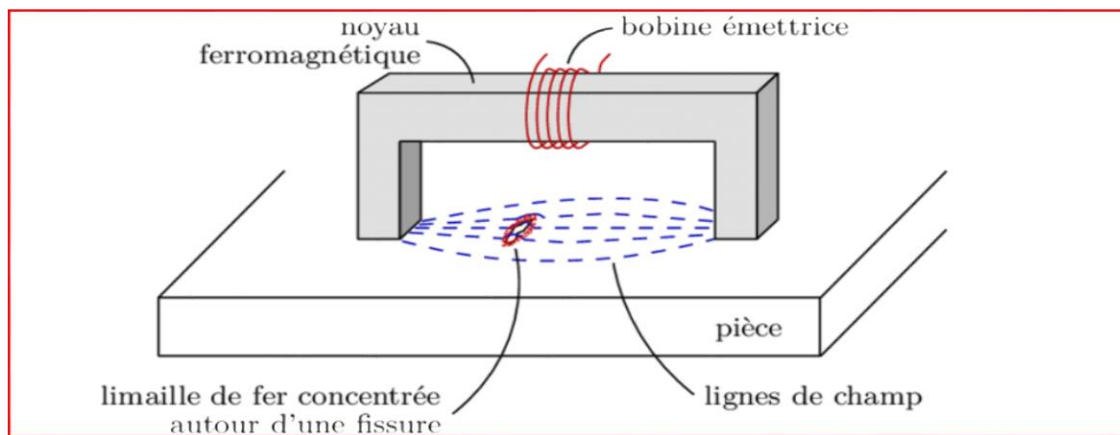


Fig I. 5 Contrôle par magnétoscopie.

#### ➤ Appareil de Magnétoscopie

La figure (I.6) représente l'Appareil utilisé pour la technique Magnétoscopie.



Fig I. 6 Appareil de magnétoscopie.

#### 1.4.4.2 Magnétographie

On recueille la trace magnétique du flux de fuite sur un film, une bande ou une pâte d’empreinte magnétisable.

#### 1.4.4.3 Détecteurs à flux de fuite

Il s’agit généralement d’appareils de contrôle automatique de barres et de tubes d’acier mettant en œuvre des détecteurs ponctuels de flux électromagnétiques, [5].

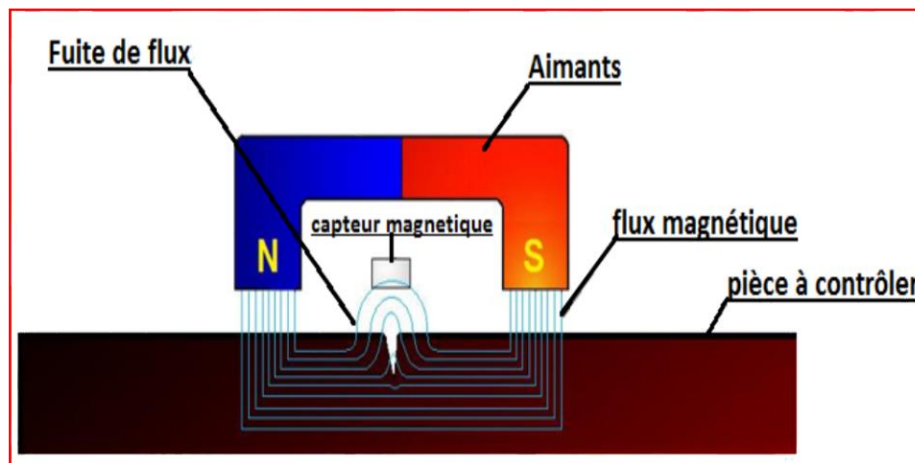


Fig I. 7 Détecteurs à flux de fuite magnétique.

#### ➤ Champ d’application de magnétoscope

L’examen de flux de fuite magnétique (magnétoscopie et mesure directe de flux) se révèle d’une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface très fins sur les pièces en acier au carbone et autres alliages ferromagnétiques. Le procédé, grâce à ses nombreux moyens de mise en œuvre et de réglage, s’adapte bien au contrôle de nombreux types de pièces manufacturées, [8], [13], [14].

#### 1.4.5 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d’un écho, sur les obstacles qu’elle rencontre (défauts, limites de la pièce), [15].

Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises, (figure I.7).

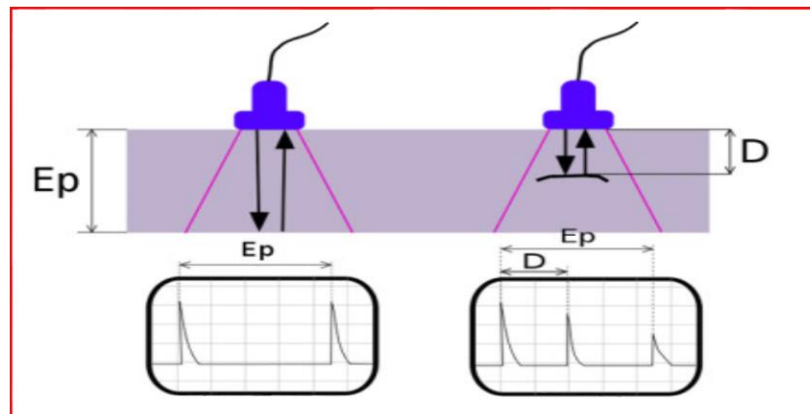


Fig I. 8 Principe des ultrasons.

### ➤ Appareil à Ultrasons

La figure (I.9) montre l'appareil à ultrasons.



Fig I. 9 Appareil à Ultrasons.

#### 1.4.5.1 Champ d'application

Les ultrasons sont aussi très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques, [8].

### I.4.6 Radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons  $\gamma$ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à

l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique la figure (I.10) montre le principe de la radiographie, [16].

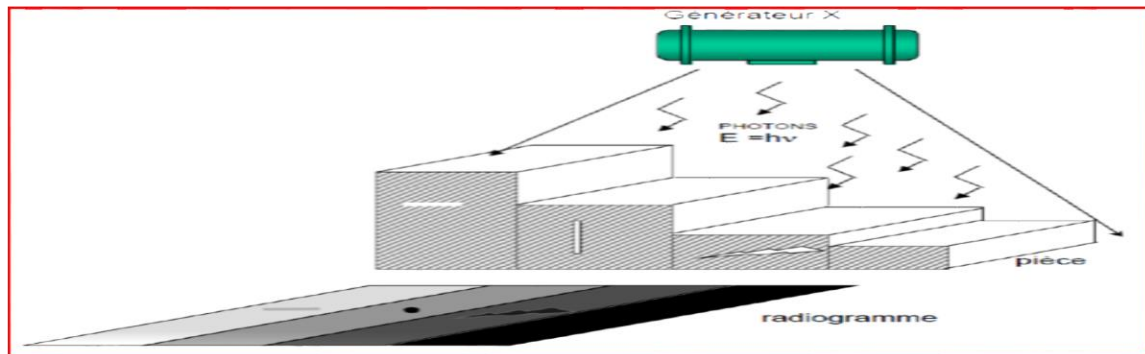


Fig I. 10 Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.

#### ➤ Champ d'application

Le champ d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance, [17].

#### I.4.7 Courants de Foucault(CF)

Ce type de contrôle s'effectue en excitant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés.

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,...).

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

Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) et le champ résultant sera fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible.

Une mesure directe de ce champ ou d'une de ces grandeurs dérivées (tension, impédance...etc.) permettra de caractériser la cible. La figure ci-dessous donne un aperçu du principe, (Figure I.11).

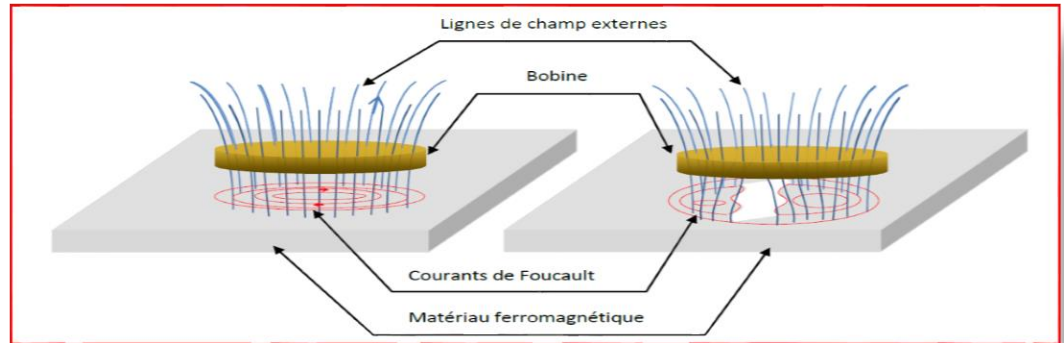


Fig I. 11 Principe du CND CF.

Les courants de Foucault se développent principalement sur la surface de la pièce à contrôler. Leur densité décroît rapidement à l'intérieur de la cible, [17].

#### ➤ Appareil à courants de Foucault (CF)

L'appareil utilisé pour détecter les défauts de la pièce par courant de Foucault est repris par la figure (I.12).



Fig I. 12 Appareil à CF.

#### ➤ Champ d'application

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs et ferromagnétiques, elle est utilisée pour détecter des défauts superficiels ou sous-cutanés (les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). elle est utilisée en milieu industriel notamment dans le contrôle des tubes, barres, fils, surfaces planes et même pour le tri de nuances de matériaux conducteurs et mesure dimensionnelle (cette approche sera développée avec plus de détails au chapitre 2), [18], [19], [13].

## I.5 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND

Le tableau I.1 donne un récapitulatif des différents procédés les plus utilisés en CND, il englobe le principe physique, les défauts détectés, les domaines d'applications et enfin les principaux avantages et inconvénients.

Tableau I. 1 Tableau comparatif des techniques utilisées en CND

Procédé	Principe physique	Défauts détectés	Domaines d'application	Principale avantages	Principale inconvénient
<b>Visuel</b>	Vision direct ou assistée des défauts	Détection des défauts superficiels et aspect	Contrôle industriel en ligne, bandes de tôle, verre, plastique ou produit en grande série	Simple et il peut être assisté par un réseau de caméra, point commun avec d'autre procédé	Limitation de la vision humaine, l'assistance des caméras pour les productions en grande série est obligatoire
<b>Ressuage</b>	Imprégnation, nettoyage de surface, application d'un révélateur	Détection de défauts superficiels	Applicable à tous les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité	Simple à mettre en œuvre, application globale aux pièce, complète la détection visuelle	Examen lent, d'où coût élevé, précaution d'hygiène à l'emploi des produits émulsifs
<b>Magnétoscopie</b>	Accumulation de poudre	Défauts débouchant fins	Matériaux ferromagnétiques (aciers)	Très sensible	Applicable uniquement aux matériaux ferromagnétiques
<b>Ultrasons</b>	Perturbation d'une onde Échographie	Défauts internes Défauts débouchant	Tous les matériaux, même en domaine médical	Inspection en profondeur, résultats immédiats	Coûteuse, difficile pour les très petites pièces
<b>Courants de Foucault</b>	Perturbation des courants induits	Défauts débouchant ou sous cutanés	Applicable aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques	Sensible, sans contact, automatisation aisée même à température élevée	Valable aux matériaux conducteurs, difficile à automatiser
<b>Radiographie</b>	Atténuation d'un flux de rayons X ou $\gamma$	Défauts internes	Tous les matériaux	Fiabilité, profondeur importante d'examen, résultats archivables	Protection du personnel, coût élevé, interprétation difficile

## I.6 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault

### I.6.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Il est un élément de base des systèmes d'acquisition de données. Nous pouvons aussi affirmer qu'il est plus qu'un instrument de mesure, car il se comporte comme une interface entre un processus physique et une information manipulable (donnée accessible à l'utilisateur), [20].

### I.6.2 Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, génère des courants induits dans les objets métalliques apportés à proximité de ce capteur. Ces courants créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur modifient ainsi l'impédance du capteur. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour le contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques des objets considérés, et bien entendu des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants induits, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation, [2].

### I.6.3 Principe des capteurs à courants de Foucault

En contrôle par capteurs à courants de Foucault (CCF), c'est l'analyse de la variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage), [17].

## I.7 Conclusion

*Dans ce chapitre nous avons décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie et enfin le procédé des courants de Foucault.*

*Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts, le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs, nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler, type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, but du « CND » recherche de défaut ou caractérisation des pièces à contrôlées, mesure d'épaisseur.*

*Le capteur inductif est l'élément de base du CND par courants de Foucault pour la détection des défauts sur des matériaux conducteurs, nous consacrerons le chapitre(II) aux capteurs utilisés dans cette technique.*

*Dans le prochain chapitre, nous allons présenter le principe du contrôle par capteur à courants de Foucault, les lois qui régissent la répartition des courants de Foucault et les principaux paramètres influents sur le contrôle ainsi que leurs influences sur l'impédance du couple.*

*une étude détaillée du fonctionnement du capteur en regard d'une cible comportant une fissure et les différentes applications des capteurs inductifs en CND.*

## Chapitre II Généralité sur les capteurs inductifs

### II.1 Introduction

*Le monde des capteurs inductifs est en mutation continue afin de répondre aux exigences incessantes de l'industrie. Des travaux de recherche sont toujours en cours pour concevoir une nouvelle génération de capteurs qui offrent des performances inégalées en termes de sensibilité et de rapport signal/bruit, miniaturisation (micro capteurs inférieurs au millimètre), diminution de l'effet de la température et des perturbations électromagnétique, contrôle à distance variable, contrôle omnidirectionnel (capteurs à champs), [17].*

### II.2 Dispositif du CND-CF

Le système du CND-CF est constitué essentiellement d'une source d'excitation alimentant le capteur, de la cible à évaluer et d'un système d'observation ou d'instrumentation qui représente une grandeur dérivée des courants de Foucault.

#### II.2.1 Source d'alimentation

Dans les dispositifs de CND-CF, au moins une bobine doit être alimentée pour produire un champ magnétique qui va exciter la pièce à évaluer. La sensibilité du contrôle dépend de la fréquence du courant ou de la tension d'excitation car c'est l'un des paramètres influant sur la profondeur de pénétration des courants induits dans les matériaux à inspecter.

#### II.2.2 Capteurs

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Il est un élément de base des systèmes d'acquisition de données. Nous pouvons aussi affirmer qu'il est plus qu'un instrument de mesure, car il se comporte comme une interface entre un processus physique et une information manipulable (donnée accessible à l'utilisateur), [20].

Dans les dispositifs du CND-CF, la topologie des courants de Foucault créés au sein d'une pièce est riche d'informations. Cependant, ces courants ne sont pas directement accessibles à la mesure. C'est par l'intermédiaire d'un capteur inductif constitué d'un inducteur ou un ensemble de bobines, que les informations nécessaires au contrôle sont obtenues. En effet, la variation d'impédance ou la différence de potentiel aux bornes d'une bobine représente la quantité de flux magnétique créé et la puissance dissipées due à la présence des courants de Foucault dans la pièce à contrôler. La forme du capteur, sa position relative au matériau (lift-off), sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation, [2].

#### II.2.3 Structure contrôlée

La nature physique du matériau constituant les pièces à contrôler, leurs dimensions, les éventuelles anomalies existantes ainsi que la position du capteur par rapport à la surface du matériau sont les paramètres essentiels qui modifient la répartition des courants de Foucault.

### II.2.3.1 Montage des sondes

Les sondes comporte des bobines avec ou sans noyau magnétique, est utilisé pour limiter les zones d'interaction de la bobine, on couple généralement celle-ci avec un circuit magnétique de grande perméabilité. Celui-ci peut être réalisé en tôle feuilletée à basse fréquence ou en ferrite pour les fréquences élevées. Son rôle est de canaliser les lignes de champ magnétique, [17].

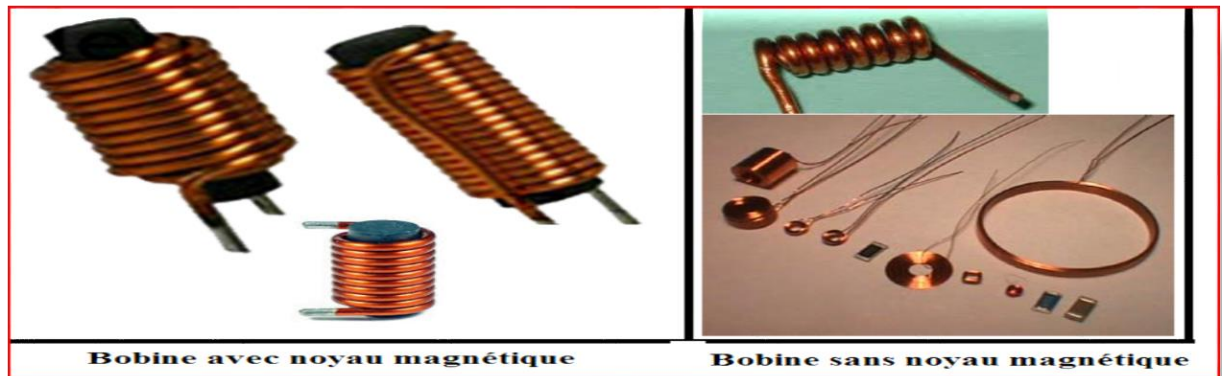


Fig II. 1 Bobines réelles.

### II.2.3.2 Branchements électriques

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

- Capteur à double fonction ;
- Capteur à fonctions séparées.

#### II.2.3.2.a Capteur à double fonction

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage simple, est dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par le ou les mêmes enroulements. C'est le montage le plus simple, il est constitué d'une seule bobine émettrice réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa tension complexe.

#### II.2.3.2.b Capteur à fonctions séparées

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage double, dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des enroulements distincts. A l'inverse du premier, il est constitué de 2 bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau, c'est-à-dire qu'elle servira uniquement pour la mesure ; on parle alors de mesure par trans-impédance,

### II.2.3.3 Mode de contrôle

Le mode de contrôle peut se faire en mode absolu ou différentiel.

#### II.2.3.3.a Mode absolu

Un capteur en mode absolu permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique  $\mu$  et la conductivité électrique  $\sigma$  du matériau à tester),

#### II.2.3.3.b Mode différentiel

Un capteur en mode différentiel est un capteur destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines, [15]. La bobine de réception comporte deux enroulements montés en opposition. Dans de nombreux cas de contrôle, il est très difficile de neutraliser les effets perturbateurs qui brouillent les signaux de défauts, tels que les variations locales du *lift-off* ou de la perméabilité magnétique par exemple. Une solution élégante pour contourner cette difficulté inhérente à l'emploi d'une bobine unique est d'utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques placées côte à côte et montées en différentiel électrique, de telle façon que les variations locales de propriétés électromagnétiques aient tendance à affecter les deux sondes et ne créent pas de déséquilibre, alors qu'un défaut unitaire affectera une bobine à la fois et pourra être détecté grâce au double signal de déséquilibre ainsi engendré (détection de défauts par asymétrie trié).

Caractéristiques des sondes en mode différentiel :

- constituée par deux bobines côte à côte ou concentriques,
- moindre sensibilité au lift off,
- détection de défauts par asymétrie,
- application : recherche de défauts courts.

### II.2.3.4 Disposition des bobines

Les sondes à courants de Foucault sont extrêmement variées et il est impossible de les décrire toutes brièvement. Leurs dimensions varient du millimètre pour les plus petites sondes pick-up utilisant un noyau de ferrite, jusqu'à 120 ou 140 mm de diamètre pour les sondes les plus encombrantes.

On rencontre en pratique essentiellement trois types de capteurs à courants de Foucault :

#### II.2.3.4.a Capteurs en cerclant

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; afin d'obtenir un coefficient de remplissage le plus voisin possible de l'unité ; cette condition est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop fort apportant une dégradation du rapport signal/bruit ; les bobines sont

immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit. Les capteurs encerclant sont destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques,

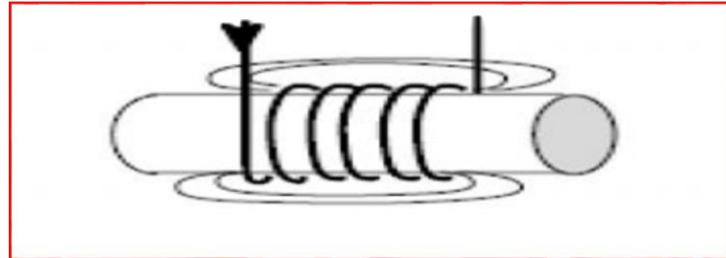


Fig II. 2 Capteur encerclant.

#### II.2.3.4.b Capteurs internes

Ils sont destinés à l'examen d'un produit par l'intérieur pour le contrôle des produits par l'intérieur, les bobines sont moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit ; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques, condensateurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire.

#### II.2.3.4.c Capteurs sondes

Ils sont connus aussi sous le nom de palpeurs ou bobines ponctuelles. Ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages et peuvent être placées sur, ou à proximité de la surface de la pièce à contrôler, ils sont généralement moulés sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins. Ils analysent une zone quasiment égale à l'aire de leurs sections transversales. Ils permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles. La géométrie des sondes est fonction des cibles à contrôler et du dimensionnement des fissures recherchées, ainsi on peut trouver des sondes plus ou moins à tête large (embase plate) pour le contrôle de surface importante et pour défauts relativement grands, D'autre part on trouve des sondes à tête très fine (tête de crayon) pour permettre.

L'inspection dans les espaces restreints et pour détecter de petites discontinuités. Elles sont disponibles avec un support droit ou coudé, qui facilite la manipulation, Ces capteurs sont adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique, [17].



Fig II. 3 Capteur sonde.

#### II.2.4 Grandeurs mesurées

La cible ressemble au circuit secondaire d'un transformateur dont le primaire est la bobine d'excitation (à double fonction). Il y a beaucoup de similitude entre un transformateur et un système capteur à courants de Foucault et cible. Cependant, il reste une différence importante : le circuit secondaire ici n'est pas de forme constante. La cible étant massive, la distribution des courants de Foucault dépend de plusieurs facteurs, [24].

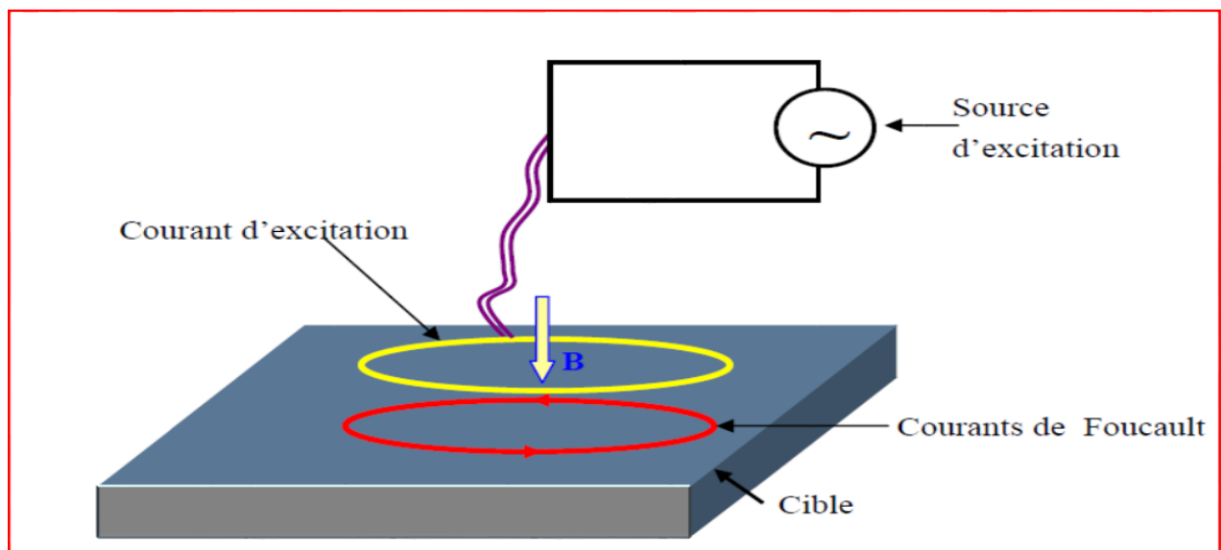


Fig II. 4 Schéma de principe d'un capteur inductif.

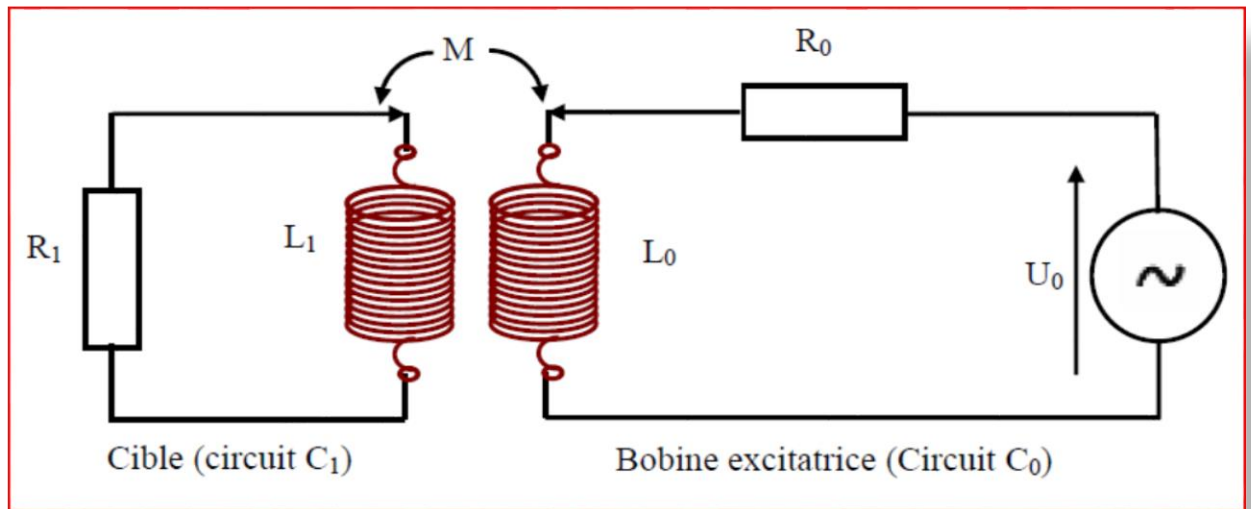


Fig II. 5 Circuit équivalent d'un capteur à courants de Foucault.

#### II.2.4.1 L'impédance

L'impédance électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdale. Elle peut être représentée comme la somme d'une partie réelle (partie résistive, la résistance) plus une partie imaginaire (partie réactive, la réactance).

Dans notre dispositif, l'impédance de la source qui est une bobine, est modifiée par la variation du champ magnétique traversant ses spires. C'est la création des courants de Foucault au sein de l'objet métallique qui induit cette variation. L'organigramme de la figure (II.6) schématise la variation d'impédance à partir de ces phénomènes, [24].

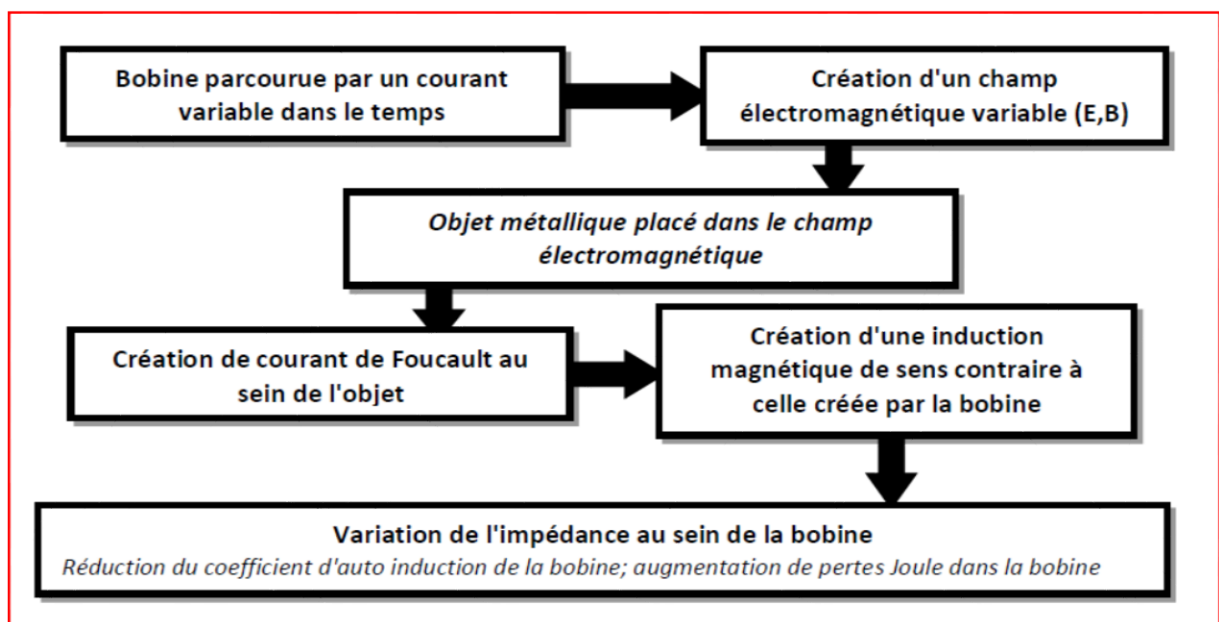


Fig II. 6 Variation d'impédance d'une bobine en présence de courants de Foucault.

### II.2.4.2 La tension induite

La source étant une bobine alimentée soit par un courant ou bien une tension sinusoïdale crée un champ magnétique variable. Lorsqu'une autre bobine est mise au voisinage de la source, elle est sujette à un changement de champ magnétique. La loi de Faraday pour l'induction établit que :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Le circuit de cette bobine étant ouvert, la tension induite à ses bornes est donnée par :

$$u = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Avec :  $e$  : la force électromotrice [v] ;

$N$ : le nombre de spires de la bobine ;

$\Phi$ : le flux magnétique [Wb] ;

$u$ : la tension induite en [V].

L'organigramme de la figure (II.7) schématise la variation de la tension induite à partir de ces phénomènes, [24].

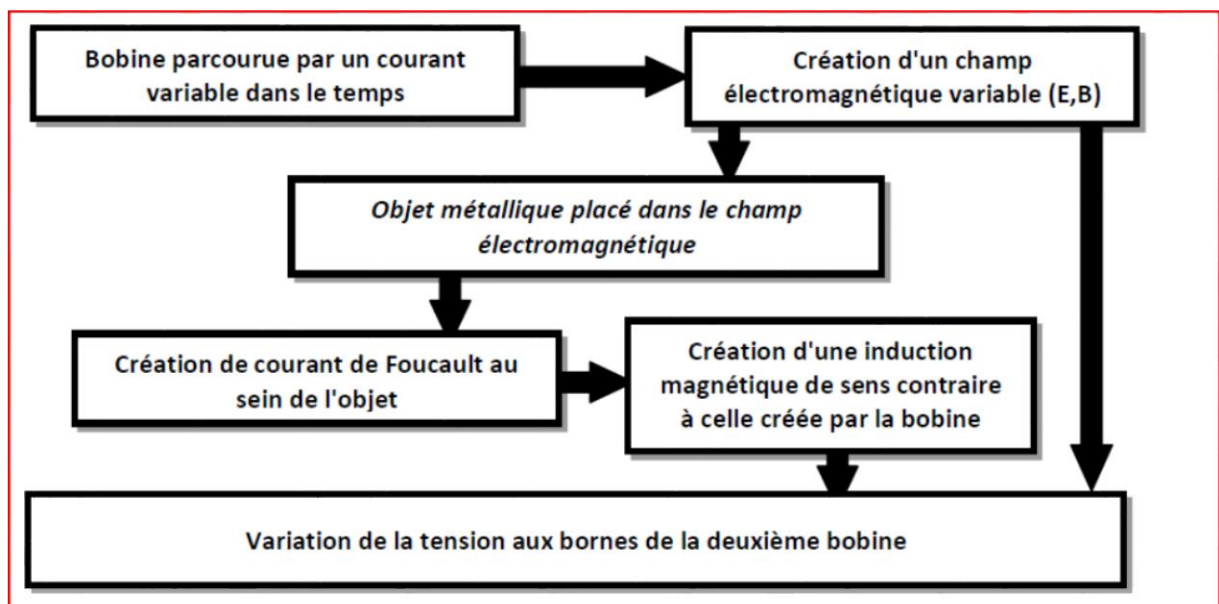


Fig II. 7 Principe de la variation de la tension en présence de courants de Foucault.

## II.3 Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en (CND)

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, les plus faibles variations du signal étant exactement reproduites lors d'un second contrôle dans

les mêmes conditions,. Cette caractéristique est particulièrement intéressante en maintenance des matériels, notamment pour suivre leur évolution lors des contrôles périodiques.

L'automatisation des systèmes de contrôle ainsi que l'archivage électronique de "signatures" de défauts et le traitement du signal constituent des voies de développements actuels permettant de simplifier l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'applications, on distingue, [17]:

### II.3.1 Mesure de conductivité électrique

L'appareillage de ce type est directement étalonné pour effectuer des mesures absolues de  $\sigma$ . Pour éviter les erreurs, il faut s'assurer que :

- le paramètre  $\mu$  est constant : seuls les matériaux amagnétiques sont donc concernés,
- les paramètres géométriques (forme de la pièce, état de surface et épaisseur) ne peuvent pas perturber la mesure,
- l'entrefer est constant.

### II.3.2 Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants

L'appareillage est directement étalonné pour effectuer des mesures de l'entrefer. On élimine ainsi l'influence de  $\sigma$ ,  $\mu$  et des paramètres géométriques.

**Exemple** : mesures de couches d'email, de peinture, de revêtement plastique.

### II.3.3 Détection de fissures

La concentration des courants de Foucault à la surface les rend aptes à la détection des fissures débouchâtes. Les sondes utilisées sont du type ponctuel.

Les phénomènes perturbateurs sont :

- Variation d'entrefer : un réglage permet en général de diminuer son influence ;
- État de surface (rugosité, aspérités, dépôt d'oxyde) : une préparation de la surface est parfois nécessaire pour éviter les signaux parasites,
- Variations géométriques (présence d'épaulements...) : réglage du zéro pour en tenir compte,
- Variations de structure : présence d'un cordon de soudure. L'examen des produits soudés est difficilement réalisable en raison des difficultés d'interprétations.

Les appareils portatifs existants pour réaliser ce type de contrôle indiquent l'amplitude du signal (sur galvanomètre). Un étalonnage est nécessaire pour obtenir la correspondance entre l'amplitude et l'importance du défaut ou pour vérifier l'échelle affichée sur l'appareil lorsque celle-ci est graduée directement en profondeur.

**Exemples**: contrôle d'assemblages rivetés, détection de fissures de corrosion sous tension...

Ce contrôle est très important sur les pièces de l'industrie aéronautique. L'examen des zones à forte concentration de contrainte, telles que les bords d'attaques des aubes de turbines (recherche des criques de fatigue).

### II.3.4 Contrôle des tubes, barres et fils

Lors des contrôles sur chaîne de fabrication, le produit à contrôler défile (parfois plusieurs m/s) dans le bobinage fixe. L'appareillage est étalonné en sensibilité sur un produit identique (en nuance et dimensions) comportant des défauts connus. Un seuil d'alarme est déterminé pour classer les pièces bonnes ou mauvaises.

La détection peut-être :

- du type absolu : un seul bobinage réalise le contrôle. Ceci permet de détecter des défauts allongés, des variations lentes, des changements de nuance,
- du type différentiel : deux bobinages montés côte à côte en opposition assure une bonne sensibilité de détection des défauts ponctuels ou transversaux. Cette méthode permet, par rapport au mode absolu, de diminuer fortement l'influence de l'entrefer et des écarts de température.

De tels contrôles peuvent être réalisés à chaud car il n'y a aucun contact entre la sonde et la pièce.

## II.4 Conclusion

*Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur la technique du contrôle non destructif par courant de Foucault.*

*Une bobine parcourue par un courant variable, alternatif, génère des courants induits dans un spécimen (pièce conductrice), créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur de la bobine, modifiant son impédance. C'est l'étude de cette variation d'impédance ou bien de la variation de tension induite aux bornes d'un bobinage avoisinant qui fournira les éléments nécessaires d'un contrôle.*

*Nous avons aussi défini les éléments essentiels du dispositif de contrôle à savoir la bobine excitatrice (la forme de la sonde et la tension d'alimentation) et les paramètres électromagnétiques du matériau à contrôler pouvant influencer les mesures.*

*Dans le prochain chapitre, nous allons présenter comment réalisation d'un banc d'essai aux applications du contrôle non destructif par courants de Foucault et flux de fuit magnétique Avec les résultats obtenus pour chaque méthode.*

## Chapitre III      Réalisation du banc d'essai dédié au CND-CF

### III.1      Introduction

*La mesure de la variation d'impédance se fait par mesure de la tension et du courant sur une trajectoire monodirectionnelle, la mesure point par point est très difficile à exécuter car elle se fait sur des déplacements très réduits et peuvent fausser les résultats.*

*C'est dans cet état d'esprit que s'inscrit le troisième chapitre(III) à savoir réaliser un banc d'essai expérimentale dédié au contrôle non destructif par courants de Foucault et flux de fuit magnétique.*

*Dans ce chapitre, nous décrirons le banc d'essai expérimental d'une façon globale, puis nous présenterons avec plus de détails les différents éléments qui composent le banc réalisé.*

### III.2      Description globale du banc d'essai

Le banc d'essai est formé par un ensemble de composants électroniques et mécaniques de deux (2) parties complémentaires :

- Partie commande ;
- Partie opérative.

La figure (III.1).illustre le banc d'essai réalisé :

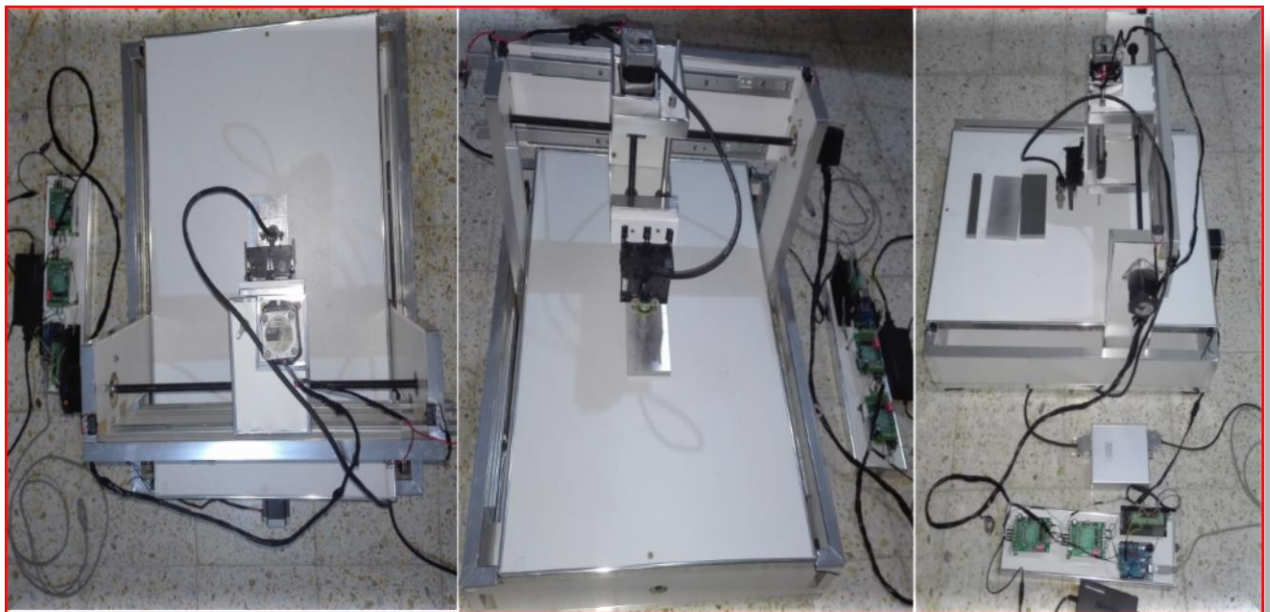


Fig III. 1 Banc d'essai.

### III.2.1 Eléments de la partie commande

Une représentation globale du bloc de commande utilisé est donnée par la figure (III.2).

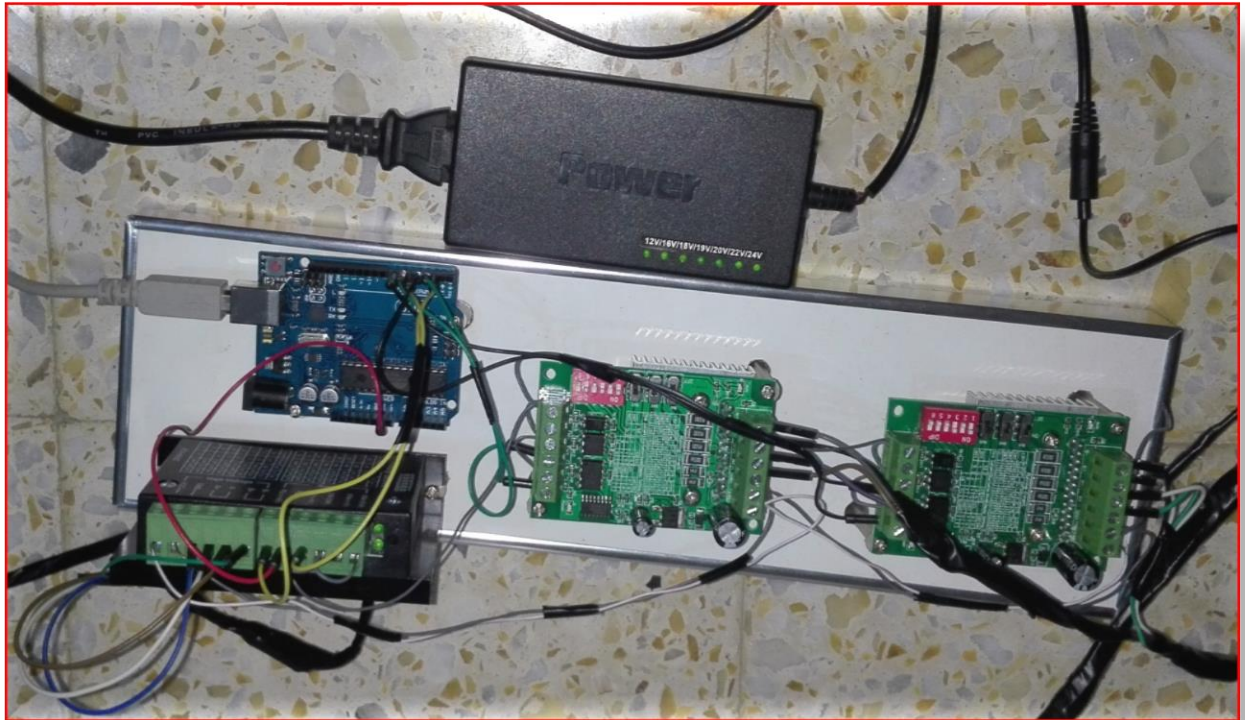


Fig III. 2 Bloc de commande.

#### III.2.1.1 Carte ARDUINO(UNO)

La carte ARDUINO est une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur et de composants minimum pour réaliser des fonctions plus ou moins évoluées à bas coût. Elle possède une interface USB pour la programmer.

ARDUINO peut être utilisé pour développer des applications matérielles industrielles légères ou des objets interactifs, et il peut recevoir en entrées une très grande variété de capteurs.

Les projets ARDUINO peuvent être autonomes, ou communiquer avec des logiciels sur un ordinateur. Il existe différent type et modèle d'ARDUINO, allant du Nano au Méga, avec différent caractéristique, comme le nombre de pins et les fonctionnalités prédéfini.

La figure (figure III.3) ci-dessous montre un aperçu détaillé de la carte ARDUINO UNO et ses différents pins, [25].

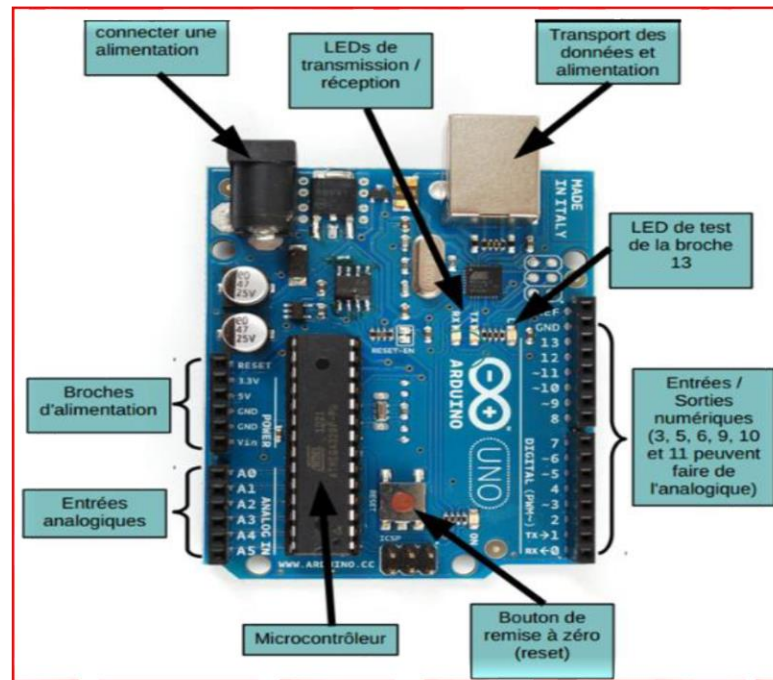


Fig III. 3 Carte ARDUINO UNO.

### III.2.1.2 Driver TB6600

Le moyen rapide de contrôler un moteur pas à pas est juste en utilisant un pilote de moteur pas à pas (contrôleur). Et TB6600 est exactement ce dont vous avez besoin.

TB6600 est un driver de moteur pas à pas professionnel facile à utiliser, qui pourrait contrôler un moteur pas à pas à deux phases. Il est compatible avec Arduino et d'autres microcontrôleurs qui peuvent émettre un signal d'impulsion numérique 5V. Le conducteur de moteur pas à pas de TB6600 a une entrée de puissance de gamme large, alimentation de 9 ~ 42VDC. Et il est capable de produire un courant de crête 4A, ce qui est suffisant pour la plupart des moteurs pas à pas,

Le pilote pas à pas prend en charge la vitesse et le contrôle de direction. nous pouvons régler son micro pas et le courant de sortie avec 6 commutateur DIP. Il existe 7 types de micro étapes (1, 2 / A, 2 / B, 4, 8, 16, 32) et 8 types de contrôle de courant (0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 2.8A, 3.0 A, 3,5 A) en tout. Et toutes les bornes de signal adoptent l'isolation opto-coupleur à haute vitesse, augmentant sa capacité d'interférence anti-haute fréquence

On a utilisé aussi un autre driver, type TB6560, dont caractéristiques sont les mêmes que le précédent sauf pour la valeur du courant qui de l'ordre de (2A).

La figure (III.4) montre les deux types de drivers utilisés TB6600 et TB6560.

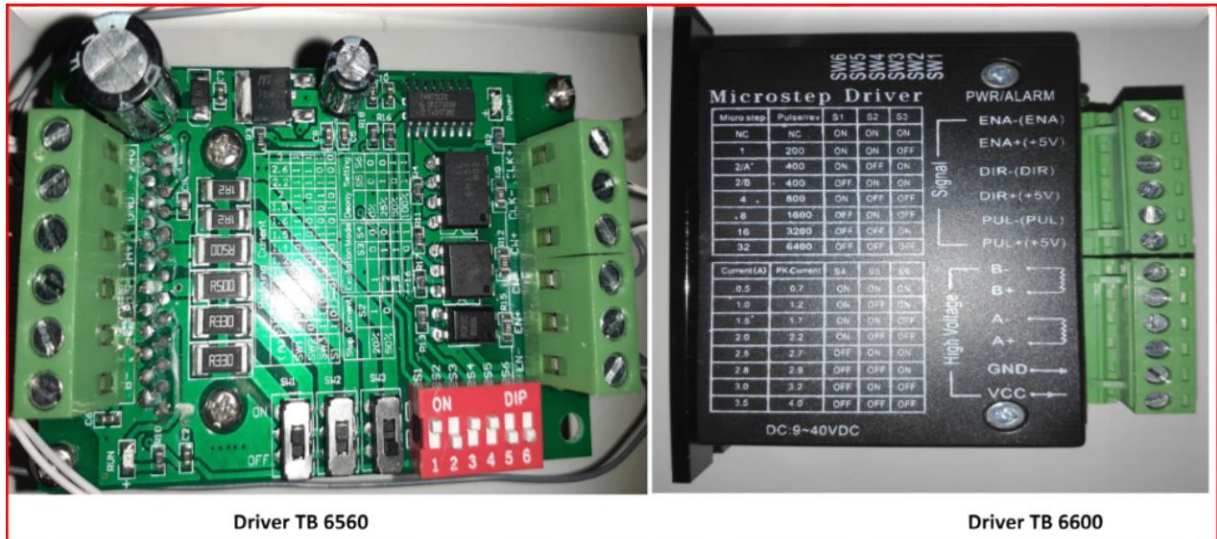


Fig III. 4 Driver moteur pas a bas.

III.2.1.3 Fin de course

Les interrupteurs de positions mécaniques (figure III.5) peuvent aussi être appelés « Détecteur de position » et « Interrupteur de fin de course ». Ils coupent ou établissent un circuit lorsqu'ils sont actionnés par un mobile.

La détection s'effectue par contact d'un objet extérieur sur le levier ou un galet. Ce capteur peut prendre alors deux états :

- Enfoncé (en logique positive l'interrupteur est fermé) ;
- Relâché pour la logique de tous.

Les interrupteurs de position sont constitués de trois éléments de base :

- Une tête de commande avec son dispositif d'attaque ;
- Un contact électrique.



Fig III. 5 Fin de course.

### III.2.1.4 Alimentation

La figure (III.6) représente l'alimentation de la partie commande.



Fig III. 6 Alimentation.

#### ➤ Caractéristique d'Alimentation

Les caractéristiques de l'alimentation sont :

- Commutateur d'alimentation, convertir AC 110V/240VAC à DC 12V ;
- Puissance : 96W ;
- Tension de sortie : 12V ;
- Courant de sortie : 4A.

### III.2.2 Eléments de la partie opérative

La figure (III.7) montre les composants qui constituent la partie opérative.

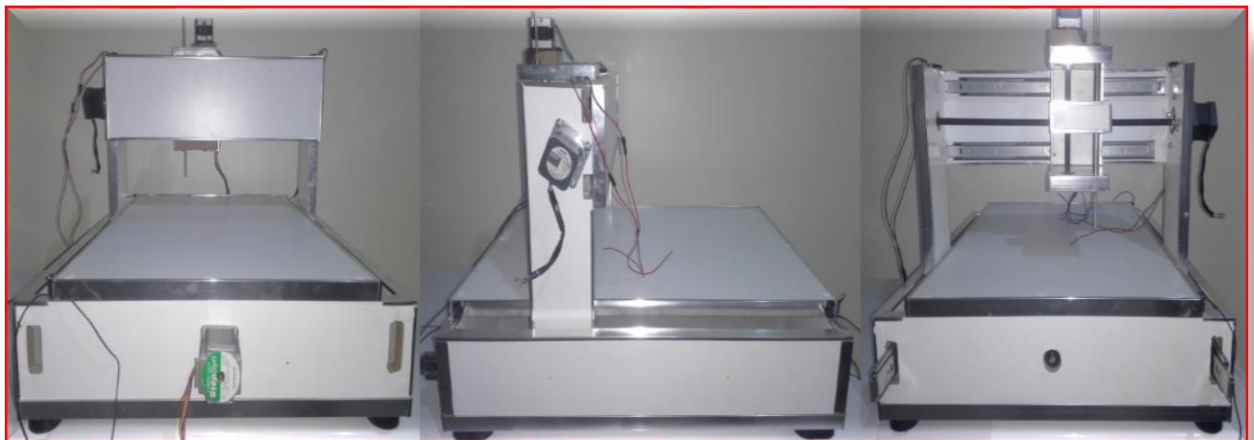


Fig III. 7 Partie opérative.

### III.2.2.1 Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsif en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire). Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation, [26].

La figure (III.8) montre le moteur pas à pas.

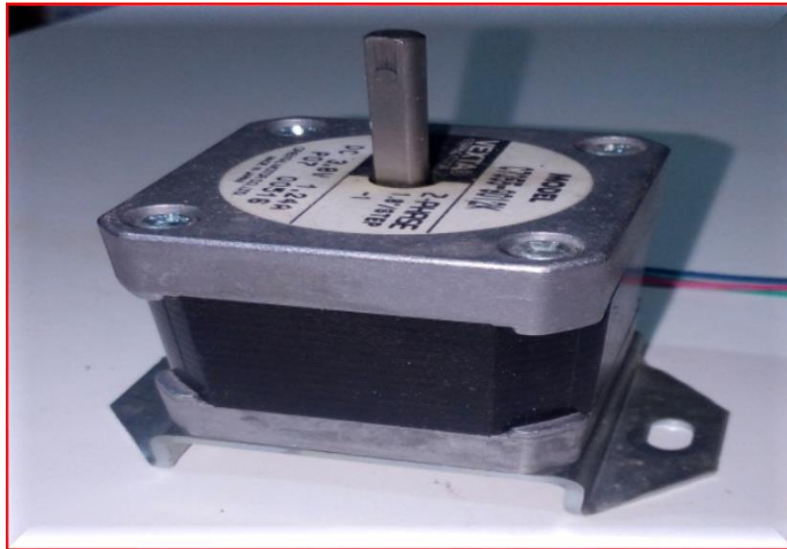


Fig III. 8 Moteur pas à pas.

## III.3 Description du micro-logiciel GRBL

Le GRBL est un micro-logiciel libre développé sur ARDUINO pour contrôler machine CNC (Computer Numéricâble Control), munis d'une tête mobile contrôlée en X, Y et Z par un ordinateur. GRBL interprète du G-code et déplace en conséquence un outil sur trois (3) axes (X, Y et Z). Il comprend de multiples optimisations sur l'usage et le déplacement des moteurs afin de gérer correctement les accélérations, les trajectoires.

La figure (III.9) représente la surface la plate forme de ce logiciel.

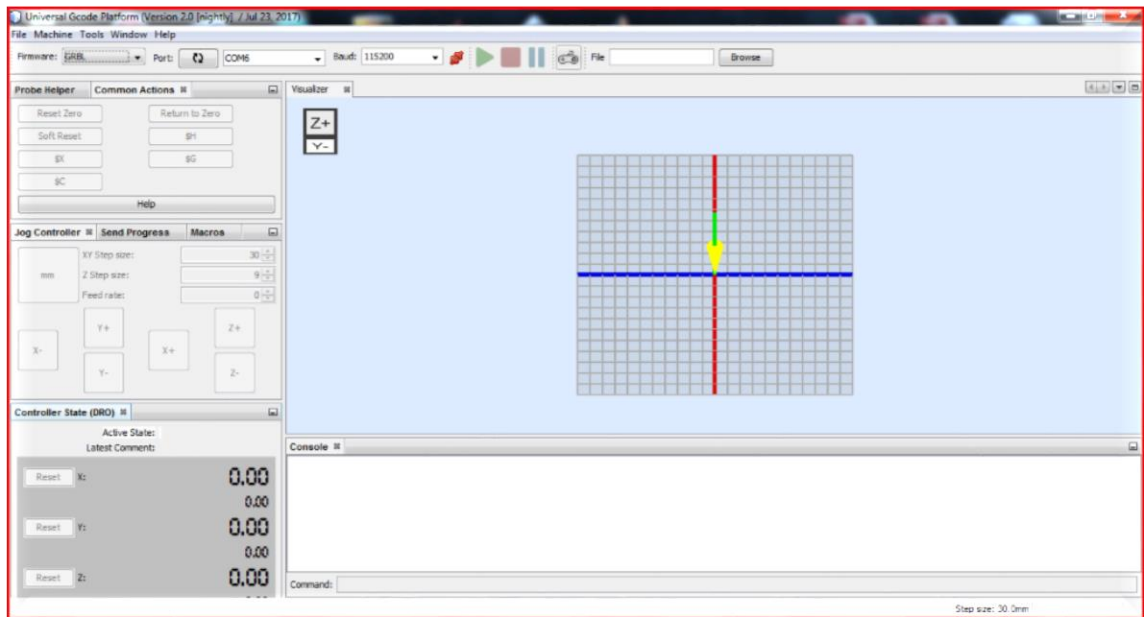


Fig III. 9 Interface du micro-logiciel GRBL.

### III.4 Caractéristiques de la machine

Le tableau (III.1) représente les caractéristiques du banc d'essai réalisé..

Tableau III. 1 Caractéristiques du banc d'essai réalisé dédié au CND-CF.

Dimensions de la surface de la table <ul style="list-style-type: none"> <li>• Longueur :</li> <li>• Largeur</li> </ul>	64(cm) 43(cm)
Encombrement de la machine <ul style="list-style-type: none"> <li>• Longueur</li> <li>• Largeur</li> <li>• Hauteur</li> </ul>	64(cm) 53(cm) 41(cm)
Déplacement maximale longitudinale de la table	47(cm)
Déplacement maximal transversal de la table	33(cm)
Déplacement maximale verticale de la broche	24(cm)
Moteur du mouvement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Type</li> <li>• Nombre de pas par tour</li> </ul>	Moteur pas à pas 200 (1.8° par pas)
Poids	17(kg)

### III.5 Architecture matériel du banc d'essai réalisé

Les composants matériels et mécaniques du banc d'essai réalisé sont:

#### III.5.1 Vis sans fin-écrou

La vis sans fin-écrou (Figure III.10) est une tige filetée qui permet à l'aide d'un écrou de transformer la vitesse de rotation de moteur en un mouvement de translation, et aussi elle assure des déplacements de grande précision.

Utilisez trois vis sans fin-écrou pour chacun des axes (X et Z) et l'axe (Y).

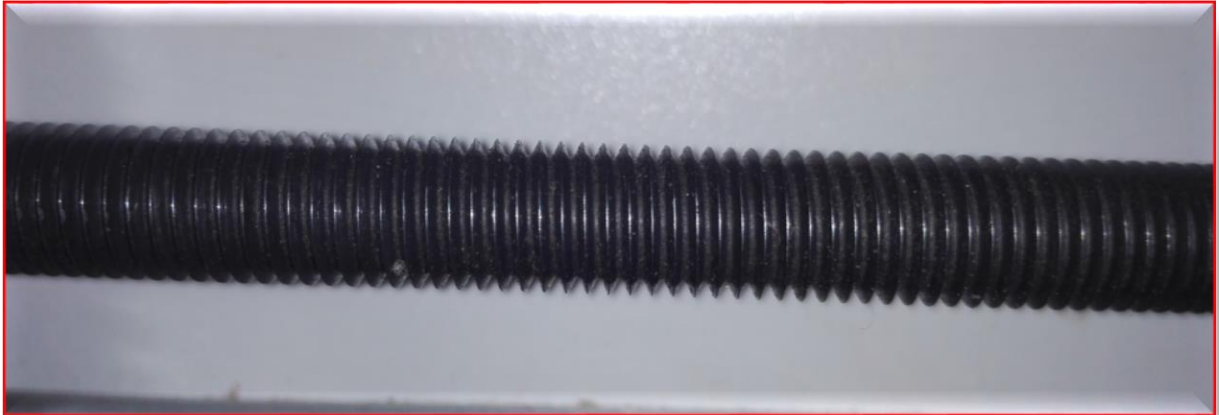


Fig III. 10 Vis sans fin-écrou.

#### III.5.2 Accouplement

En mécanique, un accouplement (Figure III.11) ou joint de transmission est un dispositif de liaison entre deux arbres en rotation, permettant la transmission du couple. On a Utilisé trois accouplements, un couplement pour chaque moteur.

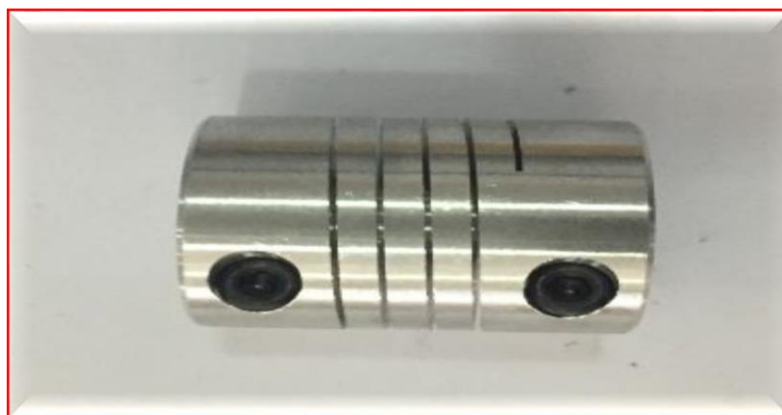


Fig III. 11 Accouplement.

### III.5.3 Rail de guidage

Elle permet de guider le mouvement de translation des roulements selon les trois axes de la machine. Les axes (X et Y) sont constitués de deux rails parallèles tandis que l'axe Z contient un seul rail.

La figure (III.12) représente le rail de guidage.



Fig III. 12 Rail de guidage.

### III.5.4 Moteur pas à pas

Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire avec une bonne précision de déplacement. Pour un bon fonctionnement de la machine on a opté pour l'utilisation de :

#### ➤ Références des moteurs utilisés

- Moteur pas à pas 130H6704-5040 pour l'axe X ;
- Moteur pas à pas PK245-01A-C62 1.8 pour l'axe Y ;
- Moteur pas à pas C7045-9012 pour l'axe Z.



Fig III. 13 Moteur pas à pas.

### III.5.5 Roulements

Les roulements (Figure III.14) sont des organes mécaniques servant à guider un arbre de transmission en rotation.



Fig III. 14 Roulements.

### III.6 Installation de pièces électroniques du banc d'essai

La figure (III.15) montre comment connecter des éléments de l'unité de commande

➤ **Éléments de l'unité de commande :**

- Carte ARDUINO (UNO) ;
- Driver de moteur pas a pas (TB6600, tb6560) ;
- Moteur pas à pas (moteur de l'axe X, moteur de l'axe Y, moteur de l'axe Z) ;
- fin de course.

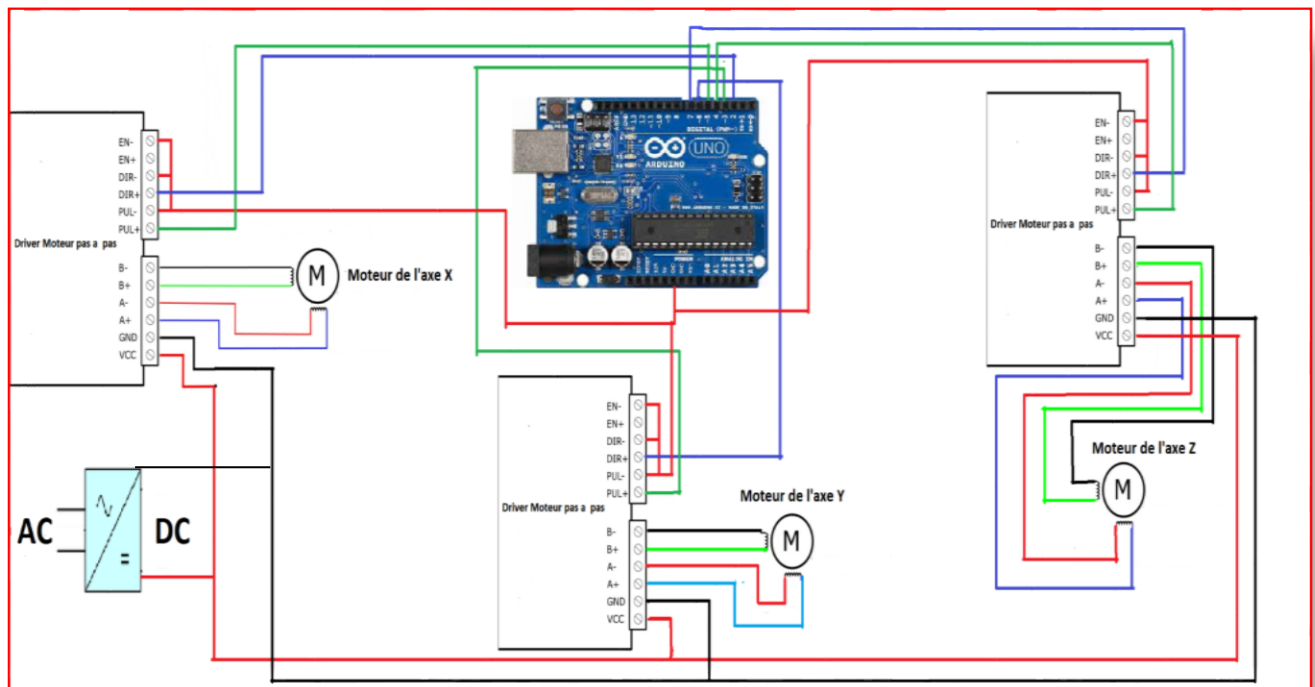


Fig III. 15 Installation de pièces électroniques.

### III.6.1 Pins utilisés de la carte ARDUINO(UNO)

Pour adapter le programme GRBL avec ARDUINO (UNO), on doit suivre la fiche technique présentée à la figure (III.16).

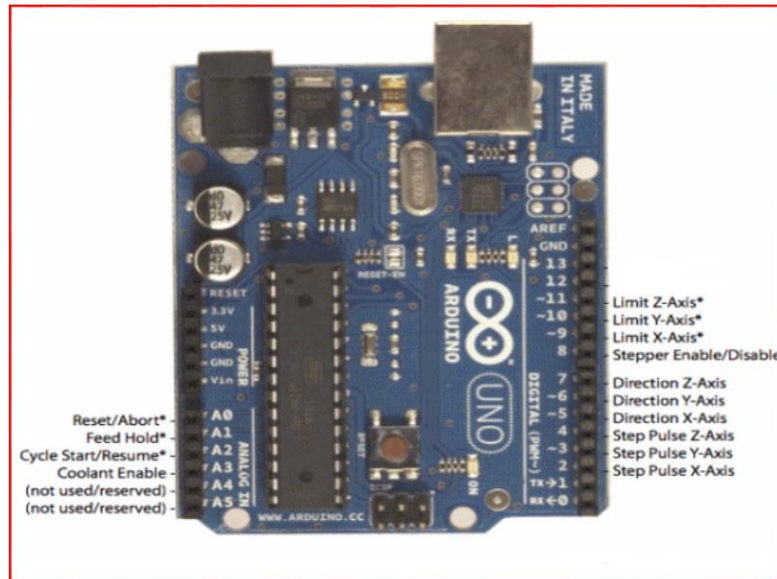


Fig III. 16 Pins utilisés pour l'ARDUINO(UNO).

### III.6.2 Pins utilisés de la driver tb6600

La figure (III.17) montre comment connecter un moteur pas à pas et une carte ARDUINO(UNO) avec Driver Moteur (TB6600).

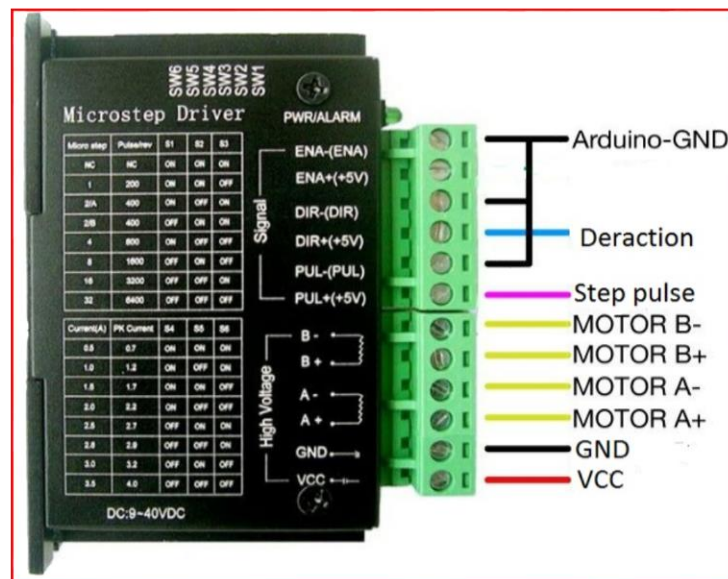


Fig III. 17 Pins utilisés pour le driver tb6600.

### III.6.3 Installation de fin de course

Pour connecter la fin de course avec la carte ARDUINO(UNO), on doit les câblés selon la figure (III.18.)

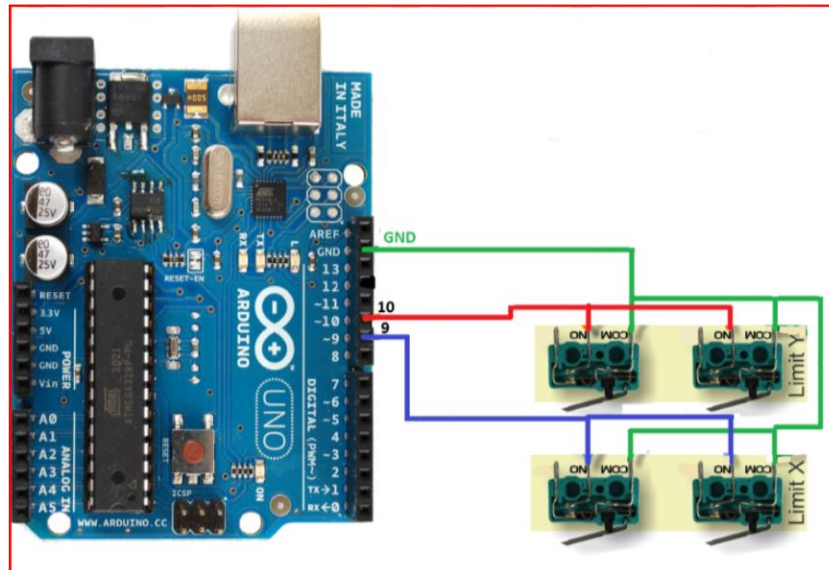


Fig III. 18 Connecter la fin de course par ARDUINO(UNO).

### III.7 Conclusion

*Dans ce chapitre, nous avons donné en premier lieu une vue générale du banc expérimental réalisé qui est dédié au CND-CF, puis nous avons passé en revue le différent élément qui le compose, tout en donnant les caractéristiques de chacun de ces éléments.*

*Une fois le banc d'essai réalisé il est donc nécessaire de passé au test pratique sur différents pièce cibles, ca sera l'objectif du dernier chapitre.*

## Chapitre IV Résultats Pratiques

### IV.1 Introduction

L'objectif visé à travers la réalisation du banc d'essai expérimental est d'automatiser le contrôle non destructif par courants de Foucault CND-CF afin d'obtenir un déplacement régulier du capteur inductif. Et de ce fait assuré une meilleure qualité des résultats pratique. Tout système de test doit comporter une chaîne de mesure qui se compose, en plus du moyen mécanique de déplacement, l'élément de détection à savoir le capteur, le système de conditionnement du capteur et l'interface de visualisation des résultats.

### IV.2 Chaîne d'acquisition pour détectons de défaut par CF

La chaîne d'acquisition est représentée par la figure (IV.1).

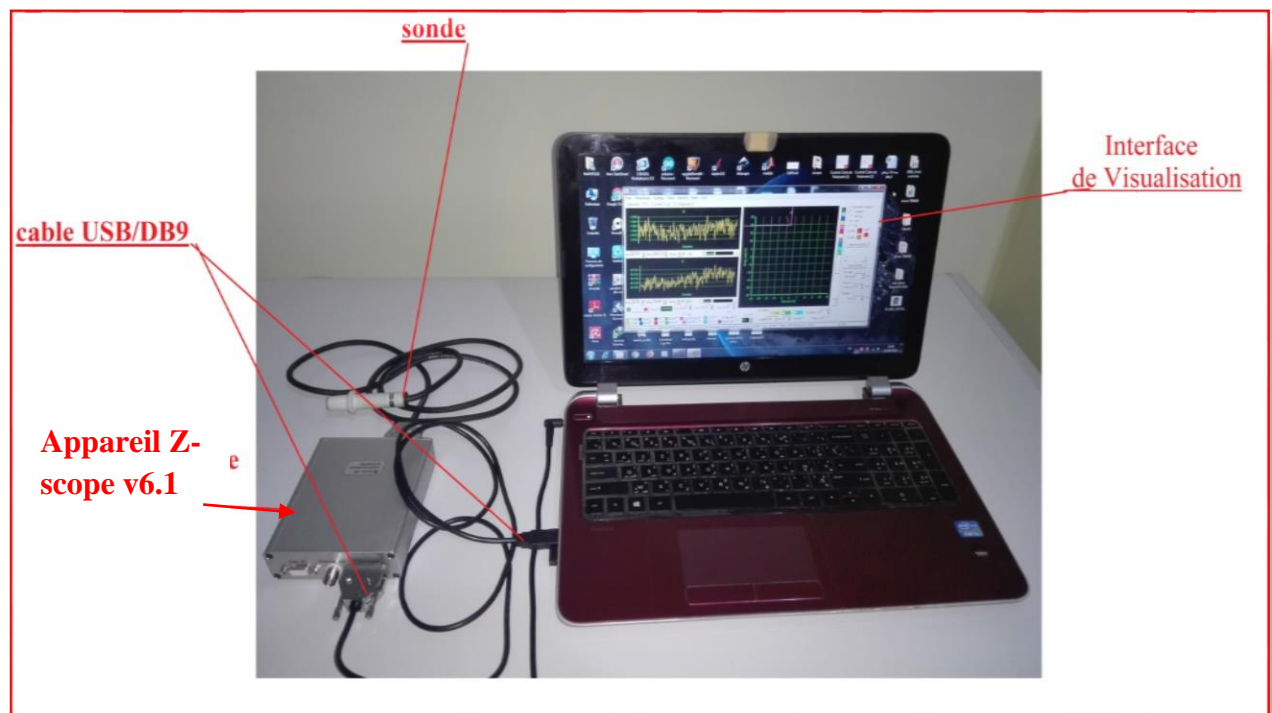


Fig IV.1 Chaîne d'acquisition.

### IV.3 Interface d'acquisition

Z scope est un appareil de mesure multifonctions il peut utiliser pour une large gamme d'applications et de mesure physique ou de contrôle non destructif :

- Mesure d'impédance ; avec l'application direct dans plusieurs domaines :
  - Contrôle non destructif par CF ;

- Contrôle non destructif par mesure couche d'isolation sur matériau conducteur ;
- caractérisation de matériau conducteur;
- Générateur de signal sinusoïdal ;
- Mesure d'amplitude et de phase d'signal.

Le Z scope est particulièrement adapter pour le contrôle non destructive par CF le principe de fonctionnement d'un capteur à CF est le suivant :

Un courant de fréquence est injecter dans un bobine L qui crée alors un champ magnétique dans son voisinage lorsqu'un objet conducteur se trouve a proximité de L, des courants induits appelé CF se développent dans cet objet et ils créent à leurs tours un champ magnétique secondaire qui a tendance à s'opposer au champ magnétique initial.

Le champ global qui est composé de champ initial et de champ secondaire a une influence sur une tension mesurée aux bornes de la bobine L.

$$v = \frac{d(\vec{B}.s)}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$\vec{B}$  : Étant le champ magnétique traversant la surface S de la bobine

Lorsque la circulation du courant induit est gênée par la présence de défauts de fissures ou changement de matière, le champ magnétique secondaire sera modifié (variation de l'intensité et la distribution spatiale des courants induits) d'où variation du champ globale et de même pour l'impédance du couple capteur-pièce.

#### IV.3.1 Interface de Visualisation des résultats (Z-scope)

L'interface de visualisation de résultats par (Z-scope) est représentée par la figure (IV. 2).

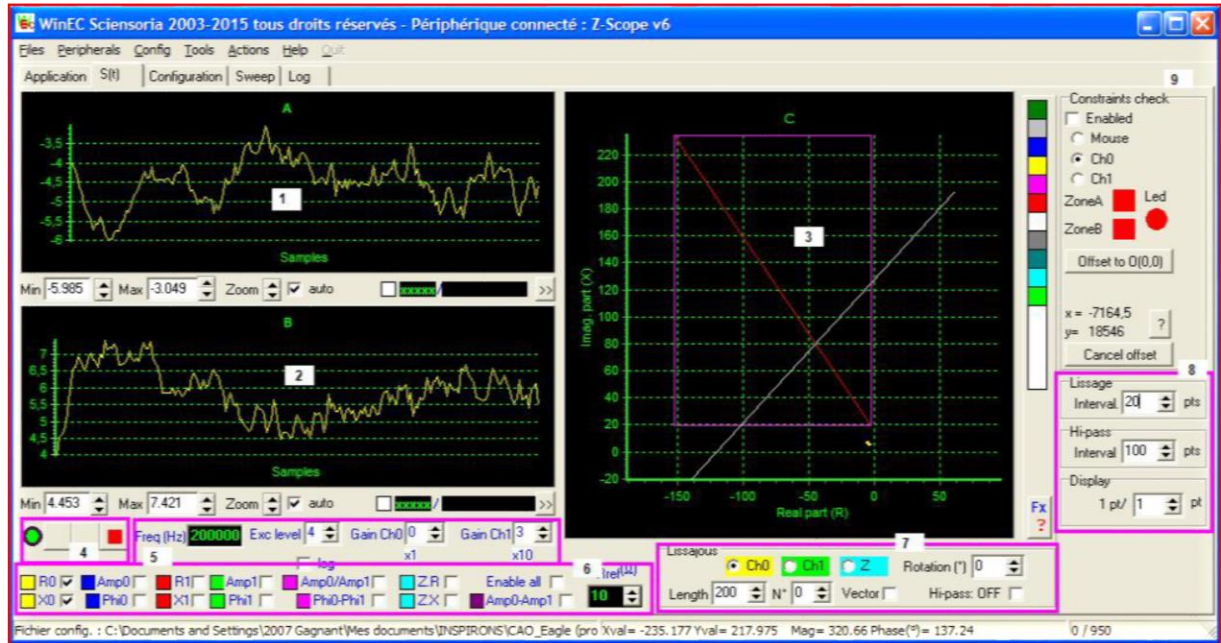


Fig IV. 2 Ecran de visualisation du Z-scope.

1. Diagramme A : les signaux R0, Amp0, R1, Amp1, Amp0/Amp1, Z.R peuvent être affichés sur ce diagramme.
2. Diagramme B : les signaux X0, Phi0, X1, Phi1, Phi0-Phi1, Amp0-Amp1 peuvent être affichés sur ce diagramme
3. Diagramme C : ce diagramme permet d'afficher un Lissajous. Les signaux R0,X0, R1,X1, ou Z peuvent être affichés sur ce diagramme.

➤ **Explication des notations :**

- R0 : partie réelle de la 1ère voie de mesure Ch0 ;
- X0 : partie imaginaire de la 1ère voie de mesure Ch0 ;
- Amp0 : amplitude de Ch0 ;
- Phi0 : phase de Ch0 ;
- R1 : partie réelle de la 2ème voie de mesure Ch1 ;
- X1 : partie imaginaire de la 2ème voie de mesure Ch1 ;
- Amp1 : amplitude de Ch1 ;
- Phi1 : phase de Ch1.

#### IV.4 Description des cibles

Nous disposons deux pièces cibles, une en acier et l'autre en aluminium. Les pièces utilisées lors du contrôle sont dimensionnées comme suit, (toutes les mesures sont en millimètre) :

➤ **Pièce en acier, échantillon 01 :**

Les caractéristiques géométriques de la cible 1 sont (largeur : 60 mm, longueur : 140 mm et profondeur : 12 mm).et trois fissures de (0.1mm) de largeur chacune et des profondeurs de (0.1 mm ,0.5mm et 1mm)

La figure (IV.3) montre la cible en acier (échantillon 01).



Fig IV. 3 Photo de la pièce en acier (échantillon 01).

➤ **Pièce en aluminium, échantillon 2:**

L'échantillon 2, figure (IV.4), est caractérisé par une géométrie dont les données sont : (largeur : 70 mm, longueur : 138 mm et profondeur : 10 mm).et trois fissures de largeur (0.1 mm) chacune et des profondeurs respectivement de (0.1 mm, 3 mm et 5 mm).

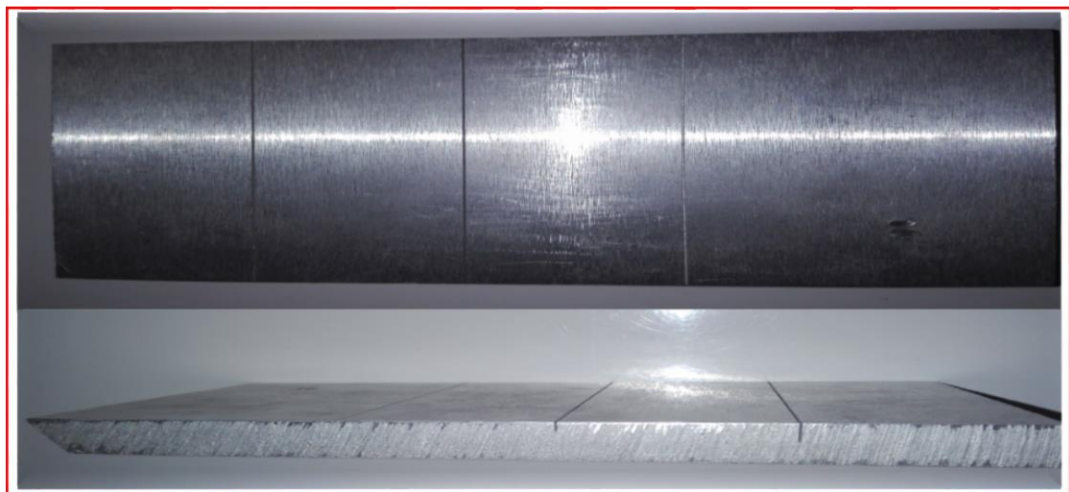


Fig IV. 4 Photo de la pièce en aluminium (échantillon 02).

## IV.5 Résultats pratiques

### IV.5.1 Résultats pratique pour détection de défaut par CF

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus lors des différents essais expérimentaux. Les tests élaborés ont pour but la détection des défauts par la mesure de l'impédance «capteur-cible ».

#### IV.5.1.1 Détection de fissures fines

➤ La figure (IV.5) illustre les résultats obtenus lors d'un contrôle sur une cible en aluminium contenant des fissures très fines de l'ordre de 0,1 mm de largeur et de profondeurs de : (0.1 mm, 3 mm et 5 mm)

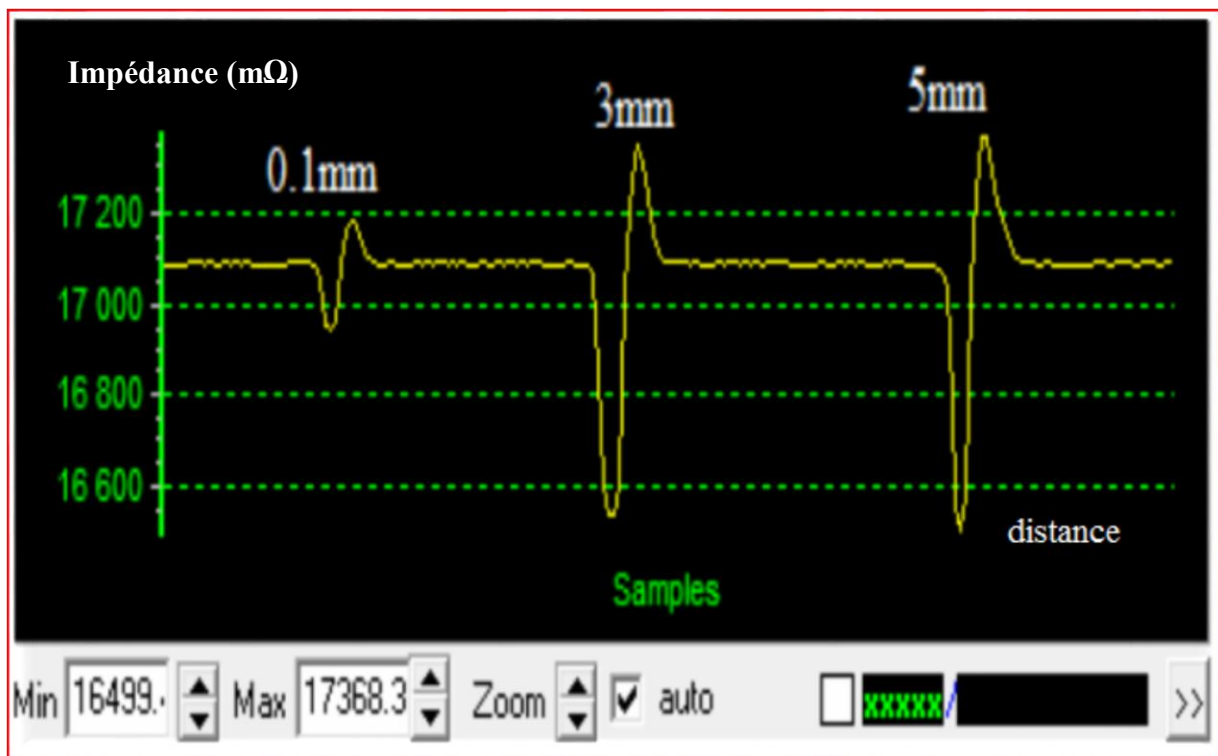


Fig IV. 5 Résultats obtenus d'un contrôle sur une cible en aluminium (échantillon 02).

➤ La figure (IV.6) illustre les résultats obtenus lors d'un contrôle sur une cible en acier contenant des fissures très fines de l'ordre de 0,1 mm de largeur et de profondeurs de : (0.1 mm ,0.5 mm et 1 mm).

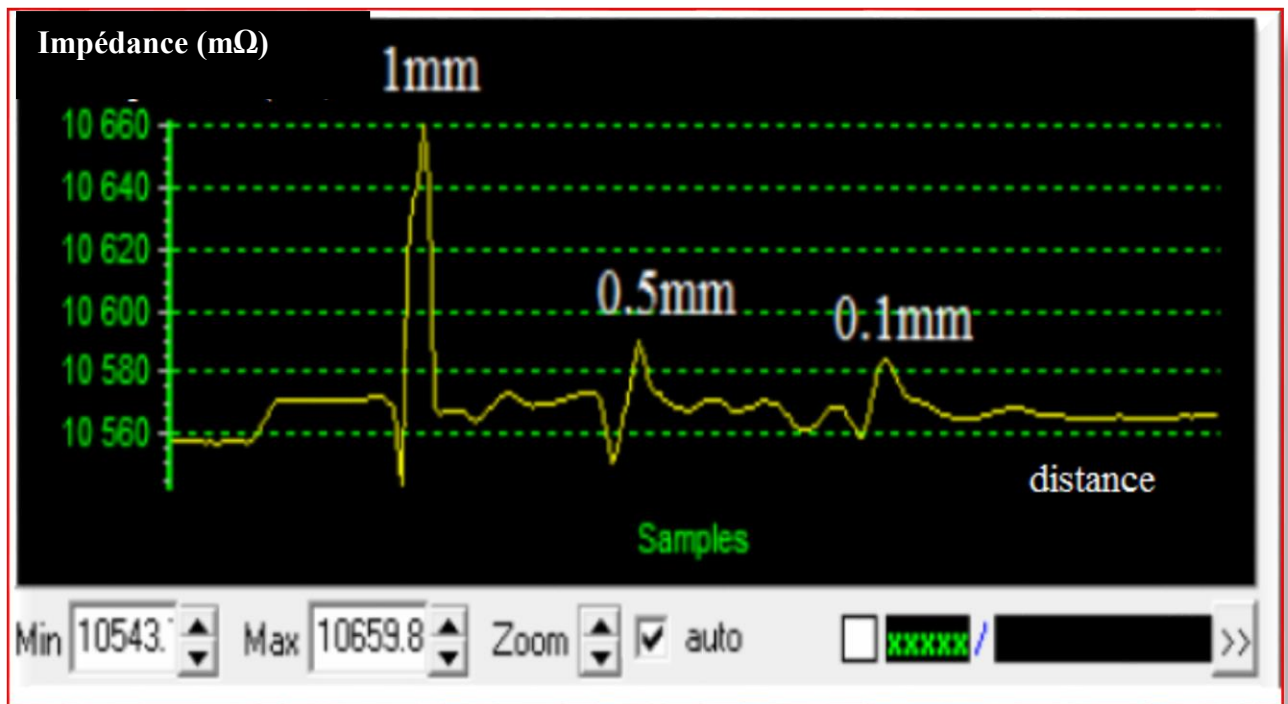


Fig IV. 6 Résultats obtenus d'un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01).

## IV.6 Détection de défaut par méthode de flux de fuite magnétique

### IV.6.1 Principe du contrôle par flux de fuite magnétique

Le dispositif de contrôle à flux de fuite Magnétique est un ensemble d'appareils mettant en œuvre des détecteurs ponctuels du champ magnétique. En effet, toute fissure débouchant ou sous-cutanées se comporte comme un entrefer créant ainsi la dispersion d'un flux magnétique hors de la pièce. Ce phénomène de dispersion est à la base du procédé magnétique de contrôle non destructif (CND) dans les aciers.

La figure (IV.7) montre le principe de cette méthode qui consiste à créer un champ magnétique dans la pièce qui en présence d'un défaut, subit des changements de direction et de comportement créant localement une fuite du flux magnétique. Ce flux de fuite est détecté par un capteur magnétique.

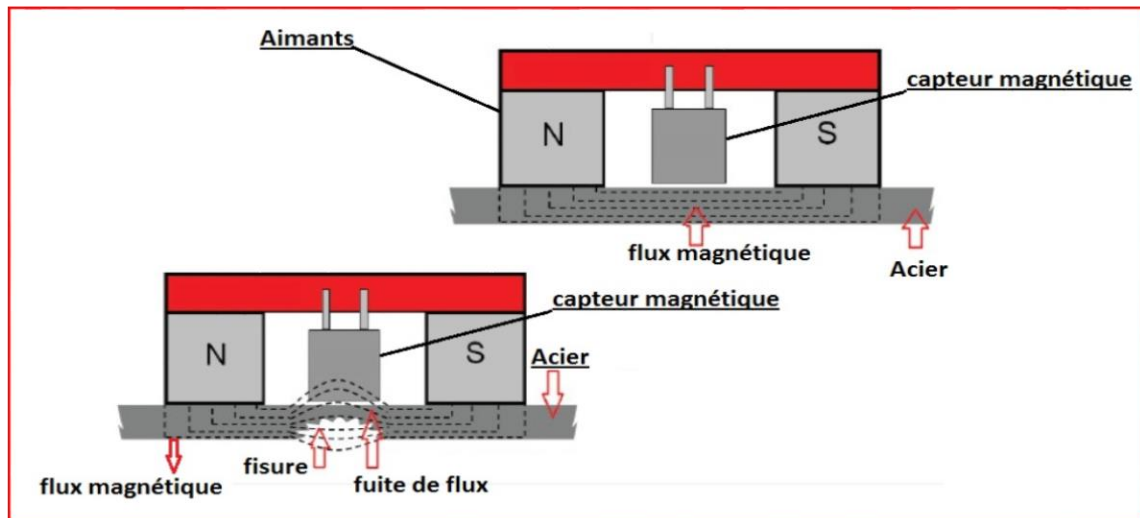


Fig IV. 7 Principe de contrôle par flux de fuite magnétique.

#### IV.6.2 Capteur de champ magnétique

Le capteur KY-024, figure(IV.8), est pour détection la variation de chape magnétique pour la pièce d'acier.

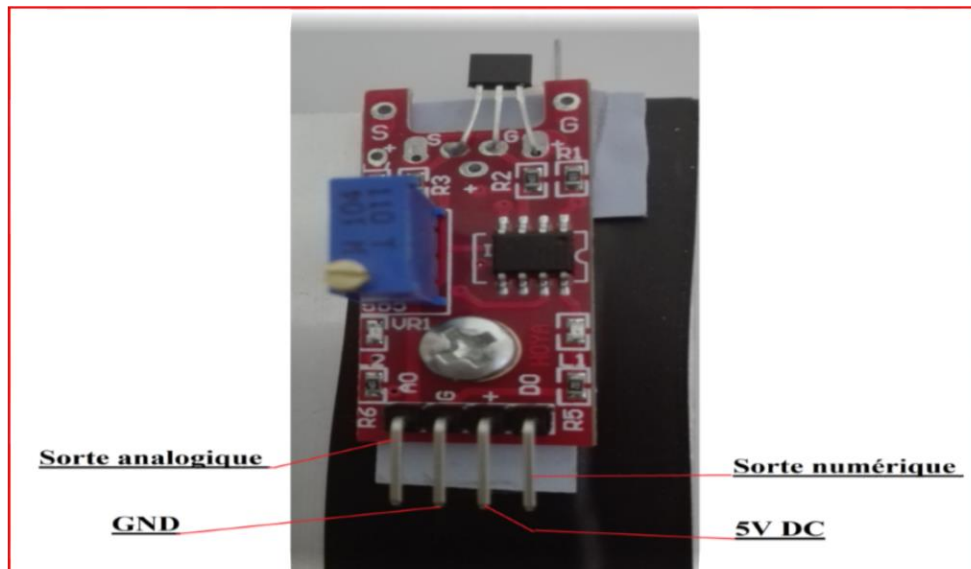


Fig IV. 8 Capteur KY-024.

La figure (IV.9) montre la disposition des deux aimants pour créer le champ magnétique.

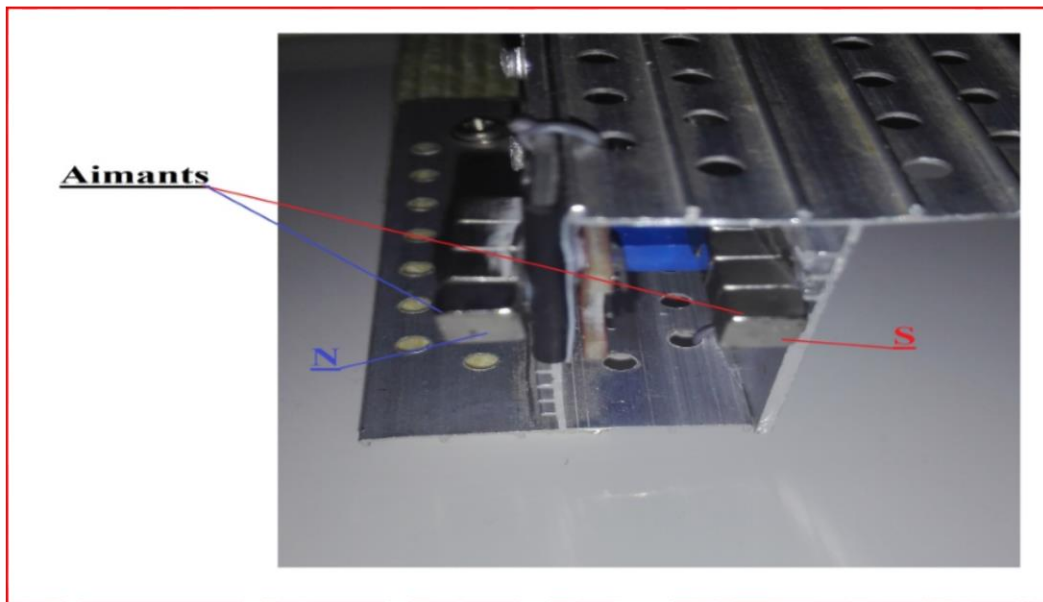


Fig IV. 9 Montage des aimants permanents.

#### IV.6.3 Résultats pratique pour détection de défaut par flux de fuit magnétique

Les tests élaborés ont pour but la détection des défauts par mesure du champ magnétique de fuite ; figure (IV.10).

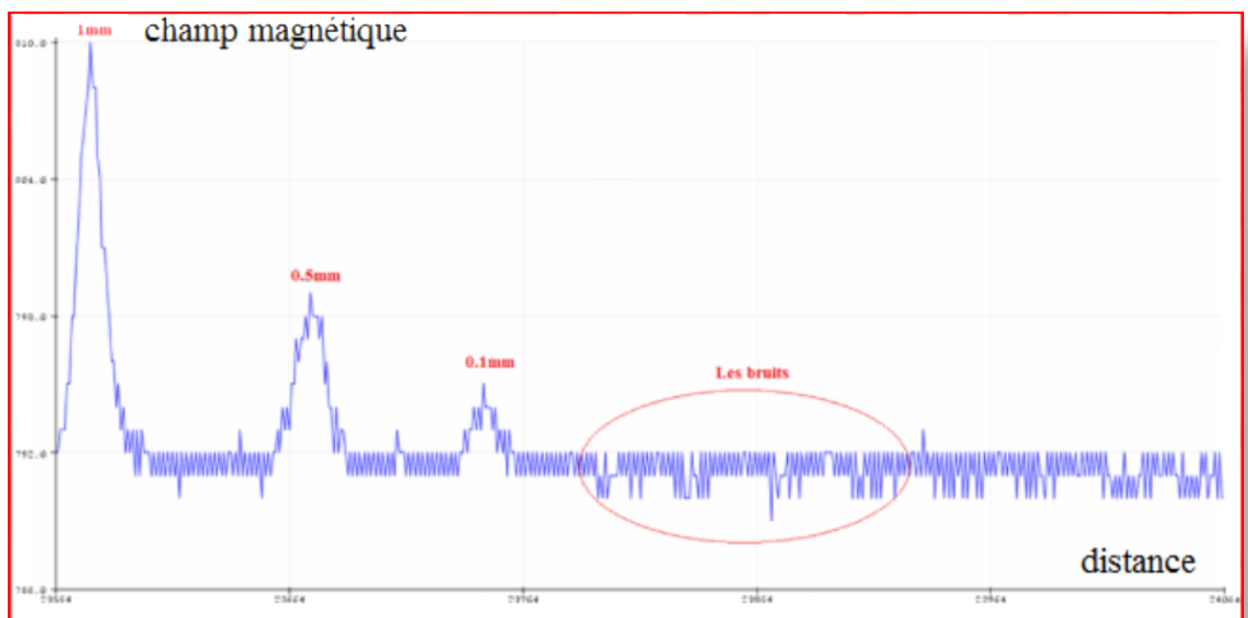


Fig IV. 10 Résultats obtenus sans filtrage (signal bruité) pour un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01).

D'après par la figure (IV.10), on remarque que les résultats obtenus lors d'un contrôle sur une cible en acier contenant des fissures très fines de l'ordre de 0,1 mm de largeur et de profondeurs de : (0.1 mm ,0.5mm et 1mm) sont bruités, mais on peut faire la nuance pour les différents défauts.

Pour améliorer le signal de détection (réduire l'effet du bruit), on à ajouté un condensateur de 20 $\mu$ F, figure (IV. 11).

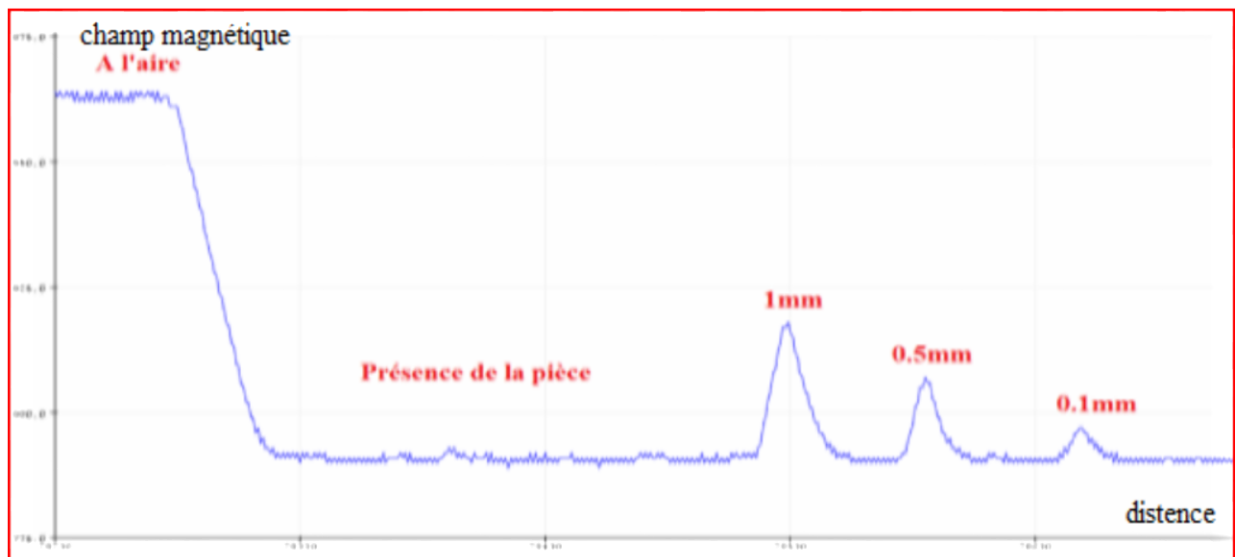


Fig IV. 11 Résultats obtenus avec filtrage d'un contrôle sur une cible en acier (échantillon 01).

## IV.7 Conclusion

*Les tests élaborés de la détection de défauts superficiels sur deux types de cibles, l'une en aluminium et l'autre en acier est cela au moyen de capteur à courants de Foucault pour la première et capteur à effet hall pour la seconde.*

*Les résultats obtenus montre une nette variation des signaux obtenus cela est dû à la variation des profondeurs des deux cibles utilisés et donc on peut confirmer que la détection de fissures très fines est rendu possible grâce au banc réalisé qui assure un déplacement stable le long de des pièces à contrôler*

## Conclusion générale

*De nombreuses techniques de contrôle non destructif CND existent. Celle dite des courants de Foucault (CF) est très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures.*

*La présence défaut dans la pièce à examiner par les courants de Foucault induits se manifeste par des variations au niveau du champ magnétique et de l'impédance du couple capteur-pièce. Ce type de contrôle de la cible dépend de très nombreux paramètres influents, notamment de la géométrie et des caractéristiques physiques du système.*

*Le bilan de ce travail est sans équivoque positif, relativement aux moyens dont on dispose, car on pu :*

- *Réaliser le banc expérimental pour un contrôle non destructif par courants de Foucault, afin d'assurer une régularité du déplacement du capteur selon les trois axes, X et Y pour la surface à contrôler et selon l'axe Z pour la variation du lift-off*
- *Détecter des fissures pièces ferromagnétiques et amagnétiques très fines, choses qui n'été pas envisageable au début de ce travail, sur des cibles ferromagnétiques de largeur 0.1mm et profondeur (0.1mm, 0.5mm et 1mm) sur des cibles amagnétiques de largeur 0.1mm et profondeur (0.1mm, 3mm et 5mm).*
- *Les signaux obtenus montrent une lisibilité très claire des variations des défauts signaux, d'où très bonne détection CND- CF ou CND à flux de fuite magnétique MFL*

## **Bibliographie**

- [1] HAMIA, "Rimond, Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault," université de caen/ basse normandie : s.n., mémoire de Master 2011.
- [2] BENSALAH Oussama, "Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel," Université de m'sila, m'sila, mémoire de Master 2012.
- [3] AISSANI Nacereddine, "utilisation des capteurs magnétiques a très haute sensibilité contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF)," Université de m'sila, m'sila, mémoire de Master 2015.
- [4] Ala-Eddine Lakhdari, "Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de foucault :application a la détection des fissures," mémoire de Master 2011.
- [5] EMNA amira fanaiech, "Développement d'un outil de simulation du procédé de contrôle non destructif des tubes ferromagnétiques par un capteur à flux de fuite," UNIVERSITE PARIS-SUD, thèse de doctorat 2012.
- [6] M. VIENS, "Essais mécanique et contrôle non destructif," Université du Québec Ecole de technologie supérieur.,.
- [7] J. DUMONT-FILLON, ""Contrôle non destructif (CND)," techniques de l'ingénieur 1996.
- [8] M. WANIN, "Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1et partie 2," techniques de l'ingénieur 1996.
- [9] M. LACROIX, "Essais non destructifs," techniques de l'ingénieur 1996.
- [10] YAHYA choua, "Application de la méthode des éléments finis," 2009.
- [11] TALEB M'HAMMED Mustapha et GHEDAMSI Elhachmi, "Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur," université kasdi merbah, ouargla, Mémoire Master 2012 /2013.
- [12] R. UNGER, T. BEUKER et M.E. BELLEMANN J. HAUEISEN, "Evaluation of inverse algorithms in the analysis of magnetic fluxleakage data. IEEE Transactions on Magnetics," 2002.
- [13] J. DUMONT-FILLON, "Contrôle non destructif (CND)," techniques de l'ingénieur1996.

- [14] M. LACROIX, "Essais non destructifs," techniques de l'ingénieur juillet 1996.
- [15] Dumont-Fillon, "Contrôle non destructif (CND)," Technique de l'ingénieur 1994.
- [16] C. NOCKEMANN et C. BELLON G.-R. TILLACK, "X-ray modeling for industrial applications. NDT & E International," octobre 2000.
- [17] Abdelhak ABDOU, "contrôle non destructif par courant de Foucault étude et réalisation d'un capteur inductif," université de batna, Diplôme d'Ingénieur 2006.
- [18] Houda ZAIDI, "Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples," Paris , Paris , 2012.
- [19] M. Busawon, D. Premel I.Dufour, "General analysis of inductive sensor based systems ," France, 1994.
- [20] Chiara ZORNI, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction," l'université paris-sud, 2012.
- [21] B.Maouche, "Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques- application à l'étude du contrôle non destructif par induction," université de Setif, Setif, Thèse de Doctorat 2007.
- [22] M.Bensetti, "Etude et modélisation de capteur destinés au contrôle non destructif par courant de Foucault. Mise en oeuvre de méthode d'inversion," l'université de Paris sud, Paris, Thèse de Docteur-XI, France, 14 Décembre 2004.
- [23] Biham Y., Marchand C., Tassiti C., Lissorgues G., Dufour E., Gilles J.P Bensetti M., "A hybrid Finite-Element Method for the modeling of Microcoils," *IEE Transaction on magnetics*, vol. 41, no. pp.1868-1871, p. 5, May 2005.
- [24] ZERGUINI SAKINA, "Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault," UNIVERSITE DE CONSTANTINE, CONSTANTINE, Thèse de doctorat en science 2009.
- [25] MOUZAOUI Melissa et TAZAMOUCHE Yanis., "Réalisation et automatisation d'une machine à commande," Université A.MIRA-BEJAIA, BEJAIA, MEMOIRE DE MASTER 2018.
- [26] Takashi Kenjo and Akira Sugawara, "stepping motors and their microprocessor controls," Oxford University Press, 2013.

## Résumé

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est très important il est utilisé pour des pièces conductrices et il est basé sur la variation de l'impédance apparente capteur-pièce à tester.

Dans par ce travail, en premier lieu, nous avons présentés les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite nous avons donnés une description rapide des capteurs à courants de Foucault.

Le but principal de ce mémoire est de réalisé un banc d'essai expérimental dédié au CND-CF afin d'automatisé la détection en minimisant l'intervention humaine et de ce fait rendre les signaux de détection fiables

Les mesures expérimentales accomplies en termes de caractérisation et d'évaluation de défaut sont très lisibles de telle sorte qu'on a pu détecter des défauts de l'ordre 0.1.mm de largeur et avec des profondeurs allant de 5 mm jusqu'à 0.1 mm avec une très bonne précision,

**Mots clés:** Contrôle non destructif (CND), courants de Foucault (CF), capteur inductif, banc d'essai expérimental.

## Abstract

Eddy current non-destructive setting is very important it is used for conductive parts and it is based on the variation of the apparent impedance sensor-piece to test.

In this work, in the first place, we presented the main methods of CND and in particular that of eddy currents, then we gave a quick description of the eddy current sensors.

The main goal of this thesis is to realize an experimental test bench dedicated to the CND-CF in order to automate the detection by minimizing the human intervention and thus make the detection signals reliable.

The experimental measurements carried out in terms of characterization and evaluation of the defect are very legible so that defects of the order 0.1.mm of width and with depths ranging from 5 mm up to 0.1 mm have been detected. with very good precision.

**Index Terms:** Non Destructive Testing (NDT), eddy currents(EC), inductive sensor, experimental test bench.

## ملخص

المراقبة غير الهدامة للتيارات الدوامة اختبار مهم جدا يتم استخدامه في قطع الموصل كهربائيا ويستند الى تباين في قيمة ممانعة بين القطعة و اللاقط المختبرة.

في هذا العمل، في المقام الأول، قدمنا الأساليب الرئيسية للاختبار الغير مدمر وخاصة التيارات الدوامة، ثم قدمنا وصفاً سريعاً لأجهزة استشعار التيار الدوامي.

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تحقيق مقعد اختبار تجريبي مخصص للمراقبة غير المدمرة بواسطة التيارات الدوامة من أجل عملية الكشف وذلك بتقليل من تدخل الإنسان وبالتالي جعل إشارات الكشف موثوقة.

القياسات التجريبية التي أجريت من حيث توصيف الخلل وتقييمه واضحة للغاية بعرض mm.0.1 وبأعماق تتراوح من 5 مم إلى 0.1 مم وبدقة جيدة جداً.

## فهرس المصطلحات

اختبار غير مدمر، التيارات الدوامة، مستشعر حثي، مقعد الاختبارات التجريبية.